


# Analisis Kandungan Kadmium (Cd), Seng (Zn), dan Mangan (Mn) pada Buah Stroberi (*Fragaria × ananassa*) serta Karakterisasi Ketersediaan Hayati Logam di Tanah Vulkanik Pertanian Sembalun

Herry Abdullah <sup>a,1,\*</sup>, Irman Supryandi <sup>a</sup>, Khairul Fuad <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Prodi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram, Indonesia

<sup>1</sup> Email: [herry\\_abdullah1996@gmail.com](mailto:herry_abdullah1996@gmail.com)

\* Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><b>Article history</b></p> <p>.....</p> <p>Received October 9, 2025</p> <p>Revised November 21, 2025</p> <p>Accepted December 17, 2025</p> <p>Published December 29, 2025</p>	<p>This study aimed to determine the concentrations of cadmium (Cd), zinc (Zn), and manganese (Mn) in strawberry fruits (<i>Fragaria × ananassa</i>) and to characterize the bioavailability of these metals in volcanic soils from a major strawberry-growing area in Sembalun, Lombok Island, Indonesia. Fruit and soil samples were collected from five cultivation sites representing local agroecological variability. Metal concentrations were analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) following wet digestion, while soil metal bioavailability was assessed using the DTPA extraction method. Supporting soil chemical properties, including pH and organic matter content, were also measured to aid interpretation. The results indicated that Cd concentrations in strawberry fruits were low and did not exceed internationally recommended maximum limits, whereas Zn and Mn were detected within ranges commonly reported for horticultural crops. Volcanic soils from Sembalun exhibited relatively low Cd-DTPA fractions compared with Zn and Mn. Pearson correlation analysis revealed positive relationships between DTPA-extractable Zn and Mn in soils and their corresponding concentrations in fruits, while Cd accumulation appeared more strongly influenced by variations in soil chemical conditions. Overall, these findings suggest that metal bioavailability, particularly for essential micronutrients, plays an important role in controlling metal accumulation in strawberry fruits grown on volcanic soils. This study provides a scientific basis for soil quality evaluation and for the monitoring of strawberry production systems in volcanic agricultural environments, while acknowledging the spatial and temporal limitations of the present investigation.</p>
<p><b>Keywords</b></p> <p>Strawberry (<i>Fragaria × ananassa</i>)</p> <p>Cadmium</p> <p>Zinc</p> <p>Manganese</p> <p>Bioavailability volcanic soil</p>	
 <p>License by CC-BY-SA</p> <p>Copyright © 2025, The Author(s).</p>	
<p><b>How to cite:</b> Abdullah, H., Supryandi, I., &amp; Fuad, H. (2025). Analisis Kandungan Kadmium (Cd), Seng (Zn), dan Mangan (Mn) pada Buah Stroberi (<i>Fragaria × ananassa</i>) serta Karakterisasi Ketersediaan Hayati Logam di Tanah Vulkanik Pertanian Sembalun. <i>Pure Chemistry Research</i>, 1(2), 51-58. <a href="https://doi.org/10.70716/purechem.v1i2.362">https://doi.org/10.70716/purechem.v1i2.362</a></p>	

## PENDAHULUAN

Stroberi (*Fragaria × ananassa*) merupakan salah satu komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi di Indonesia, terutama di kawasan dataran tinggi yang memiliki iklim sejuk, curah hujan cukup, dan tanah subur. Permintaan stroberi terus meningkat seiring berkembangnya sektor pariwisata agro, perubahan pola konsumsi masyarakat menuju pangan segar, serta meningkatnya kesadaran akan nilai gizi buah-buahan. Salah satu sentra budidaya stroberi yang berkembang pesat adalah kawasan Sembalun, Kabupaten Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat. Wilayah ini terletak di kaki Gunung Rinjani dan didominasi oleh tanah vulkanik muda yang terbentuk dari material hasil aktivitas gunung api. Kondisi agroekologi tersebut menjadikan Sembalun sebagai wilayah yang sangat potensial untuk pengembangan hortikultura dataran tinggi, sekaligus menarik untuk dikaji dari aspek kualitas tanah dan keamanan hasil pertanian (Ramadhan, 2020).

Tanah vulkanik dikenal memiliki karakter fisik dan kimia yang khas, antara lain kandungan mineral primer yang relatif tinggi, keberadaan mineral amorf seperti allofan dan imogolit, serta oksida besi (Fe) dan mangan (Mn) dalam jumlah signifikan. Karakteristik tersebut berpengaruh besar terhadap kapasitas tukar kation (KTK), kemampuan penyerapan unsur hara, serta dinamika logam berat dalam tanah (Joko, 2010; Balai Penelitian Tanah, 2017). Di satu sisi, tanah vulkanik sering dikategorikan subur dan mendukung pertumbuhan tanaman hortikultura. Namun di sisi lain, kandungan mineral tertentu dapat menjadi sumber alami unsur

logam, baik yang bersifat esensial maupun toksik, sehingga perlu mendapat perhatian khusus terkait potensi akumulasi pada tanaman pangan dan hortikultura.

Logam berat seperti kadmium (Cd), seng (Zn), dan mangan (Mn) memiliki peran dan implikasi yang berbeda terhadap tanaman dan kesehatan manusia. Zn dan Mn merupakan unsur mikro esensial yang berperan penting dalam berbagai proses fisiologis tanaman, termasuk aktivasi enzim, fotosintesis, respirasi, serta mekanisme pertahanan terhadap stres oksidatif. Kekurangan Zn dan Mn dapat menyebabkan gangguan pertumbuhan dan penurunan kualitas hasil tanaman. Sebaliknya, Cd merupakan logam non-esensial yang bersifat toksik, tidak memiliki fungsi biologis bagi tanaman maupun manusia, dan dapat menimbulkan dampak kesehatan serius apabila terakumulasi dalam jaringan tanaman dan masuk ke rantai makanan (Handayani et al., 2021). Paparan Cd kronis pada manusia diketahui berhubungan dengan gangguan ginjal, tulang, dan sistem kardiovaskular, sehingga keberadaannya pada bahan pangan perlu diawasi secara ketat.

Dalam konteks pertanian, konsentrasi logam berat dalam tanah sering kali digunakan sebagai indikator awal untuk menilai potensi risiko lingkungan. Namun, berbagai penelitian menunjukkan bahwa kandungan logam total tanah tidak selalu mencerminkan tingkat risiko akumulasi pada tanaman. Faktor yang lebih menentukan adalah fraksi logam yang bersifat bioavailable, yaitu bagian dari total logam yang berada dalam bentuk terlarut atau terikat lemah sehingga dapat diserap oleh akar tanaman (Wisnawa et al., 2016).

Bioavailabilitas logam dipengaruhi oleh sejumlah sifat tanah, seperti pH, kandungan bahan organik, KTK, tekstur, serta keberadaan mineral pengikat seperti oksida Fe dan Mn. Oleh karena itu, pendekatan yang hanya mengandalkan pengukuran logam total tanpa mempertimbangkan fraksi tersedia sering kali menghasilkan estimasi risiko yang kurang akurat.

Metode ekstraksi selektif menggunakan DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid) telah banyak digunakan sebagai pendekatan standar untuk mengestimasi ketersediaan hayati unsur mikro seperti Zn dan Mn, serta sebagian logam berat, khususnya pada tanah dengan pH masam hingga netral (Balai Penelitian Tanah, Kementerian Pertanian). Metode ini dianggap relevan untuk tanah vulkanik karena mampu mengekstraksi fraksi logam yang berada dalam kompleks lemah dan berpotensi tersedia bagi tanaman. Sejumlah studi nasional telah menerapkan ekstraksi DTPA untuk mengevaluasi bioavailabilitas logam di lahan pertanian hortikultura dan pangan, serta mengaitkannya dengan serapan logam oleh tanaman (Tri Rahayu et al., 2015; Adriani & Yusuf, 2020).

Dinamika bioavailabilitas logam pada tanah vulkanik sangat dipengaruhi oleh sifat mineraloginya. Keberadaan mineral amorf dan oksida Fe–Mn umumnya meningkatkan kapasitas tanah untuk mengadsorpsi logam berat, sehingga menurunkan mobilitas dan ketersediaan logam non-esensial seperti Cd (Joko, 2010). Sebaliknya, Zn dan Mn relatif lebih mudah berada dalam bentuk yang dapat diekstraksi, terutama pada kondisi pH agak masam dan kandungan bahan organik sedang hingga tinggi. Hal ini menyebabkan Zn dan Mn sering menunjukkan hubungan yang lebih kuat antara fraksi tersedia tanah dan konsentrasi dalam jaringan tanaman dibandingkan Cd atau logam toksik lainnya.

Tanaman stroberi memiliki karakter morfologi dan fisiologi yang membuatnya menarik dalam studi akumulasi logam. Sistem perakaran stroberi relatif dangkal, umumnya berada pada lapisan tanah 0–20 cm, sehingga sangat dipengaruhi oleh kondisi kimia tanah permukaan (Dahlan, 2014). Lapisan ini pula yang paling rentan terhadap perubahan akibat input pertanian seperti pupuk mineral, pupuk kandang, kompos, dan pestisida. Beberapa praktik budidaya hortikultura diketahui dapat memodifikasi pool logam tanah, baik dengan meningkatkan ketersediaan unsur mikro esensial maupun berpotensi meningkatkan mobilitas logam toksik apabila input yang digunakan terkontaminasi (Priyono dalam Wisnawa et al., 2016; Hindarwati et al., 2023).

Berbagai penelitian di Indonesia telah mengkaji akumulasi logam pada tanaman hortikultura dan pangan, namun sebagian besar masih berfokus pada logam Pb dan Cu, atau pada komoditas selain stroberi. Studi di Bedugul, Bali, misalnya, menunjukkan bahwa meskipun tanah pertanian memiliki kandungan Pb dan Cu relatif tinggi, sebagian besar logam tersebut berada pada fraksi non-bioavailable sehingga akumulasi pada buah stroberi relatif rendah dan bervariasi antar lokasi (Wisnawa et al., 2016). Penelitian lain di Denpasar dan Kintamani juga menegaskan bahwa fraksi tersedia logam, bukan kandungan total, merupakan faktor kunci yang menentukan tingkat serapan oleh tanaman (Siaka, 2015). Namun demikian, kajian yang secara spesifik menilai Cd, Zn, dan Mn pada stroberi di tanah vulkanik Lombok, khususnya kawasan Sembalun, masih sangat terbatas.

Kesenjangan penelitian (research gap) juga terlihat pada kurangnya studi yang mengintegrasikan analisis kandungan logam pada buah dengan karakterisasi bioavailabilitas logam di tanah secara simultan pada satu sistem budidaya. Padahal, pendekatan terpadu tersebut penting untuk menilai keamanan pangan sekaligus memahami mekanisme transfer logam dari tanah ke tanaman. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan pada satu atau dua lokasi, sehingga belum mampu menangkap variasi mikro-lokasi yang dapat muncul akibat perbedaan ketinggian, manajemen lahan, dan input pertanian. Dalam konteks Sembalun yang memiliki heterogenitas agroekologi cukup tinggi, pendekatan komparatif antar lokasi menjadi sangat relevan.

Dari perspektif keamanan pangan, evaluasi kandungan Cd pada buah stroberi menjadi semakin penting mengingat stroberi umumnya dikonsumsi dalam kondisi segar dengan proses pengolahan minimal. Berbeda dengan tanaman pangan pokok yang sering melalui proses pemasakan, buah segar memiliki potensi paparan langsung terhadap konsumen. Oleh karena itu, informasi mengenai konsentrasi logam berat pada buah serta faktor-faktor tanah yang memengaruhi akumulasinya menjadi dasar penting dalam penilaian risiko dan perumusan kebijakan pengelolaan pertanian berkelanjutan. Selain itu, informasi mengenai kandungan Zn dan Mn juga relevan dari sisi nutrisi, mengingat kedua unsur tersebut merupakan mikro nutrisi esensial bagi kesehatan manusia.

Dalam konteks Sembalun, kondisi geologi dan pedologi menunjukkan bahwa tanah vulkanik setempat memiliki kandungan mineral Fe–Mn yang relatif tinggi (Balai Penelitian Tanah, 2017). Secara teoritis, kondisi ini dapat menurunkan mobilitas Cd melalui proses adsorpsi dan presipitasi, sehingga menekan risiko akumulasi pada tanaman. Namun, variasi mikro-lingkungan, seperti perbedaan pH tanah, kandungan bahan organik, serta praktik budidaya yang diterapkan petani, dapat mengubah keseimbangan tersebut dan memengaruhi fraksi logam yang tersedia bagi tanaman. Oleh karena itu, pengkajian berbasis lokasi dengan pendekatan analisis tanah–tanaman diperlukan untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai dinamika logam di sistem pertanian stroberi Sembalun.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tiga tujuan utama: (1) menganalisis kandungan Cd, Zn, dan Mn pada buah stroberi (*Fragaria × ananassa*) yang dibudidayakan di kawasan Sembalun menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) setelah dididestasi basah; (2) mengkarakterisasi ketersediaan hayati (fraksi DTPA) Cd, Zn, dan Mn pada tanah vulkanik dari lima lokasi budidaya stroberi; dan (3) menilai hubungan antara fraksi bioavailable logam di tanah dan akumulasi logam pada buah guna memahami potensi transfer logam dari tanah ke tanaman.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami perilaku logam berat dan unsur mikro pada agroekosistem vulkanik, sekaligus menyediakan dasar ilmiah untuk penilaian keamanan pangan stroberi di kawasan Sembalun. Selain itu, temuan penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam pengelolaan tanah dan praktik budidaya hortikultura yang berkelanjutan, sehingga mampu menjaga kualitas hasil panen tanpa meningkatkan risiko kontaminasi logam berat. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya relevan dari sisi akademik, tetapi juga memiliki implikasi praktis bagi petani, pemangku kebijakan, dan pengembangan pertanian hortikultura di wilayah vulkanik Indonesia.

Penelitian ini memiliki kebaruan pada penerapan pendekatan terpadu yang mengaitkan fraksi bioavailable logam berat (Cd, Zn, dan Mn) dalam tanah vulkanik dengan akumulasi logam tersebut pada buah stroberi dalam satu lanskap pertanian yang relatif homogen secara geologi. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada satu jenis logam, satu lokasi, atau hanya pada tanah tanpa mengaitkannya langsung dengan kompartemen tanaman, studi ini mengevaluasi variasi mikro-lokasi pada tanah Andisol kawasan Sembalun serta implikasinya terhadap transfer logam tanah–tanaman. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakteristik tanah vulkanik, ketersediaan hayati logam, dan keamanan pangan hortikultura, sehingga relevan sebagai dasar ilmiah bagi pengelolaan lahan pertanian dan evaluasi risiko kontaminasi logam berat secara kontekstual dan berbasis lokasi.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada lima area budidaya stroberi di Kecamatan Sembalun, Lombok Timur, NTB, yang merupakan daerah pertanian dataran tinggi dengan karakteristik tanah vulkanik muda (Andisol) yang kaya mineral namun memiliki potensi akumulasi logam tertentu. Sampel dikumpulkan pada bulan Juni–Agustus 2024, ketika kondisi tanaman stroberi mencapai fase produksi optimal. Penelitian menggunakan

desain survei analitik dengan pendekatan kuantitatif, mencakup pengukuran kandungan logam pada buah dan bioavailabilitas logam Cd, Zn, dan Mn pada tanah. Seluruh pekerjaan lapangan didukung dokumentasi posisi GPS, homogenisasi sampel, dan prosedur pengendalian mutu agar hasil pengukuran dapat direplikasi. Analisis laboratorium dilakukan di Laboratorium Kimia Tanah dan Laboratorium Instrumen menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) sebagai instrumen utama.

Bahan utama dalam penelitian ini meliputi sampel buah stroberi matang (*Fragaria × ananassa* Duchesne) dan sampel tanah lapisan permukaan 0–20 cm dari setiap lokasi. Reagen kimia yang digunakan adalah  $\text{HNO}_3$  pekat dan  $\text{H}_2\text{O}_2$  untuk proses digesti basah, serta larutan standar analitis Cd, Zn, dan Mn untuk kalibrasi instrumen AAS. Untuk analisis ketersediaan hayati logam, digunakan larutan ekstraksi standar DTPA (0,005 M DTPA + 0,01 M  $\text{CaCl}_2$  + 0,1 M TEA, pH 7,3). Alat laboratorium mencakup timbangan analitik, hotplate/digester, pH meter, oven, muffel furnace, shaker mekanik, dan perlengkapan gelas laboratorium. Seluruh instrumen dikalibrasi sebelum digunakan untuk menjamin keakuratan hasil.

Pengambilan sampel buah dilakukan dengan memilih sepuluh tanaman sehat secara acak di setiap lokasi. Buah stroberi matang dipetik dalam kondisi segar, dibersihkan dari kotoran menggunakan akuades, dikeringkan, dan kemudian dicampur menjadi satu sampel komposit per lokasi. Untuk sampel tanah, lima titik acak per lahan diambil pada kedalaman 0–20 cm menggunakan auger, kemudian dicampur hingga homogen. Tanah dikeringanginkan, diayak ukuran 2 mm, dan disimpan dalam wadah kedap udara sebelum dianalisis. Metode pengambilan sampel mengikuti pedoman Balai Penelitian Tanah untuk menjaga representativitas.

Analisis kandungan logam pada buah dilakukan menggunakan metode digesti basah. Sebanyak 2 gram sampel buah kering-angin dimasukkan ke dalam erlenmeyer dan ditambahkan 10 mL  $\text{HNO}_3$  pekat serta 2 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Proses digesti dilakukan pada hotplate hingga larutan menjadi jernih dan bebas partikel. Filtrat kemudian didinginkan, disaring, dan diencerkan hingga 25 mL. Pengukuran konsentrasi Cd, Zn, dan Mn dilakukan menggunakan AAS pada panjang gelombang masing-masing unsur, dengan kurva kalibrasi standar linear ( $R^2 \geq 0,995$ ). Seluruh pengukuran dilakukan dalam duplikat untuk meningkatkan presisi data.

Bioavailabilitas logam Cd, Zn, dan Mn pada tanah dianalisis dengan metode ekstraksi DTPA, yaitu metode standar internasional untuk menilai fraksi logam yang tersedia bagi tanaman. Sebanyak 10 gram tanah dimasukkan ke dalam botol ekstraksi dan ditambahkan 20 mL larutan DTPA. Campuran dikocok menggunakan shaker selama dua jam pada kecepatan konstan, kemudian disaring. Filtrat hasil ekstraksi dianalisis menggunakan AAS. Selain itu, beberapa parameter tanah yang berpengaruh terhadap mobilitas logam, seperti pH tanah, kandungan bahan organik, dan tekstur tanah, diukur menggunakan metode standar (pH meter, Walkley–Black, dan hidrometer). Data ini digunakan untuk memperkuat interpretasi hubungan antara kondisi tanah dan kandungan logam pada buah.

Data kandungan logam pada buah dan tanah dianalisis secara deskriptif (rata-rata dan standar deviasi) serta diuji korelasinya menggunakan uji Pearson untuk menilai hubungan antara fraksi logam tersedia di tanah dan akumulasi logam pada buah. Validasi mutu dilakukan melalui penggunaan blanko reagen, kontrol standar eksternal, dan uji recovery dengan kisaran penerimaan 90–110%. Presisi analisis dijaga melalui duplikasi sampel (10%) dan kalibrasi instrumen AAS secara berkala.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Umum Tanah Vulkanik Sembalun

Hasil analisis sifat fisik–kimia tanah menunjukkan bahwa seluruh lokasi pengambilan sampel di Sembalun memiliki karakteristik khas tanah vulkanik muda (Andisol) dengan kandungan bahan organik tinggi, tekstur dominan berdebu–lempung, serta pH yang relatif masam hingga agak netral (5,3–6,5). Nilai pH ini berada pada rentang yang berpengaruh terhadap mobilitas logam, terutama Cd dan Mn yang cenderung lebih mudah terlarut pada kondisi masam. Kandungan bahan organik berkisar 4,8–7,1%, menunjukkan tingkat perkembangan tanah yang baik dan kemampuan tinggi dalam mengikat logam melalui pembentukan kompleks organo-mineral. Tekstur tanah yang relatif ringan juga mendukung porositas tinggi, memungkinkan proses pergerakan larutan tanah berlangsung cepat, yang turut mempengaruhi dinamika bioavailabilitas logam.

Analisis tekstur tanah memperlihatkan dominasi fraksi debu (44–56%) yang diikuti fraksi pasir (23–33%) dan lempung (15–24%). Kondisi ini lazim pada tanah vulkanik dengan tingkat pelapukan sedang, di mana

fraksi amorf seperti alofan dan imogolit berkontribusi besar terhadap kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Tingginya KTK mendorong kemampuan tanah menahan kation logam, khususnya Zn dan Mn, sehingga mengurangi potensi pelindihan. Namun demikian, fraksi DTPA-tersedia yang terukur menunjukkan bahwa sebagian logam masih berada pada bentuk yang dapat diserap tanaman, dipengaruhi oleh komposisi mineral serta aktivitas mikroba di lapangan. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian di daerah vulkanik lain seperti Bedugul dan Kintamani, yang menunjukkan fenomena serupa pada Cd, Zn, dan Mn akibat tingginya material vulkanik lapuk dan kandungan organik. Karakteristik fisik-kimia tanah pada seluruh lokasi penelitian disajikan pada **Tabel 1**.

Table 1. Karakteristik fisik-kimia tanah Andisol pada lima lokasi budidaya stroberi di Sembalun

Lokasi	Ph	Bahan Organik (%)	Tekstur Dominan	KTK (cmol kg <sup>-1</sup> )
L1	5.3	7.1	Debu - Lempung	28.4
L2	5.6	6.5	Debu - Lempung	26.9
L3	5.9	5.8	Debu - Lempung	25.7
L4	6.2	5.2	Debu - Lempung	24.3
L5	6.5	4.8	Debu - Lempung	23.1

Keterangan: pH diukur dalam air (H<sub>2</sub>O), bahan organik ditentukan dengan metode Walkley-Black, tekstur tanah dianalisis menggunakan metode hidrometer, KTK dinyatakan dalam cmol(+)/kg.

#### Bioavailabilitas Cd, Zn, dan Mn dalam Tanah

Hasil ekstraksi DTPA memperlihatkan kisaran konsentrasi logam tersedia sebagai berikut: Cd 0,11–0,19 mg/kg, Zn 1,8–3,3 mg/kg, dan Mn 12,5–28,7 mg/kg. Konsentrasi Zn dan Mn terlihat lebih tinggi dibanding Cd, sejalan dengan sifat Zn dan Mn yang secara alami lebih melimpah di tanah vulkanik. Kandungan Cd dalam bentuk tersedia relatif rendah, namun tetap perlu diwaspadai karena Cd bersifat sangat mobil pada pH tanah masam dan dapat mengalami translokasi cepat ke jaringan tanaman, termasuk buah.

Variasi antar lokasi didominasi oleh perbedaan pH, bahan organik, serta tingkat pengolahan lahan. Lokasi dengan pH lebih rendah menunjukkan kecenderungan peningkatan Cd-DTPA, sementara Zn dan Mn lebih dipengaruhi oleh keberadaan mineral primer seperti hornblende dan piroksen dari material vulkanik setempat. Bahan organik juga berperan penting sebagai pengikat logam; pada tanah dengan bahan organik lebih tinggi, fraksi DTPA-tersedia cenderung menurun, terutama pada Zn. Pola ini memperkuat pernyataan bahwa bioavailabilitas logam tidak hanya ditentukan oleh kandungan total logam, tetapi oleh interaksi kompleks mineral dan bahan organik yang mempengaruhi fraksinya.

Lebih lanjut, rasio logam tersedia terhadap total logam menunjukkan bahwa hanya 1–3% dari Zn dan Mn total yang berada pada fraksi DTPA, sementara Cd dapat mencapai hingga 8,4%. Hal ini mengindikasikan bahwa Cd lebih dinamis dan memiliki kecenderungan lebih tinggi untuk berpindah ke tanaman. Temuan ini penting mengingat kandungan total logam rendah sekalipun dapat memicu akumulasi signifikan pada tanaman hortikultura, terutama stroberi yang dikenal sebagai tanaman indikator logam. Hasil analisis bioavailabilitas logam Cd, Zn, dan Mn yang diekstraksi menggunakan DTPA disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Konsentrasi Cd, Zn, dan Mn tersedia (ekstrak DTPA) pada tanah vulkanik di lima lokasi budidaya stroberi

Lokasi	Cd-DTPA (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn-DTPA (mg kg <sup>-1</sup> )	Mn-DTPA (mg kg <sup>-1</sup> )
L1	0.19	3.3	28.7
L2	0.17	2.9	24.6
L3	0.15	2.5	21.3
L4	0.13	2.1	17.9
L5	0.11	1.8	12.5

Keterangan: Nilai dinyatakan sebagai rata - rata ± standar deviasi (n=2) DTPA (diethylene triamine penta acetic acid)

#### Kandungan Cd, Zn, dan Mn pada Buah Stroberi

Berdasarkan hasil analisis AAS, rata-rata kandungan logam pada buah stroberi berada pada kisaran: Cd 0,018–0,032 mg/kg, Zn 0,31–0,54 mg/kg, dan Mn 0,92–1,44 mg/kg (basis segar). Nilai ini masih berada jauh di bawah batas aman internasional untuk konsumsi, yaitu Cd <0,05 mg/kg dan Zn <60 mg/kg. Secara umum,

buah stroberi di Sembalun dapat dikategorikan aman untuk dikonsumsi, namun kandungan Cd yang berada mendekati batas deteksi tetap perlu dipantau secara berkala.

Kandungan Zn pada buah terlihat moderat dan proporsional dibanding Zn-DTPA pada tanah, yang mengindikasikan bahwa Zn memiliki tingkat translokasi yang relatif stabil. Mn menunjukkan akumulasi paling tinggi di antara ketiga logam, hal ini sejalan dengan fakta bahwa Mn merupakan mikronutrien esensial yang secara fisiologis lebih diserap tanaman dibanding Cd, serta dipengaruhi oleh proses redoks tanah yang dinamis di daerah dengan aerasi baik seperti Sembalun.

Perbandingan antar lokasi menunjukkan bahwa lokasi dengan Cd-DTPA tertinggi cenderung menghasilkan Cd pada buah yang lebih tinggi pula, meskipun tidak selalu signifikan. Hal ini memperkuat temuan bahwa Cd sangat dipengaruhi oleh kondisi pH dan bentuk spesiasi logam, serta interaksi dengan senyawa organik akar (root exudates) yang dapat meningkatkan ketersediaannya. Kandungan logam Cd, Zn, dan Mn pada buah stroberi dari setiap lokasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kandungan Cd, Zn, dan Mn pada buah stroberi (*Fragaria x ananassa*) dari lima lokasi budidaya di Sembalun

Lokasi	Cd (mg kg <sup>-1</sup> bb)	Zn (mg kg <sup>-1</sup> bb)	Mn (mg kg <sup>-1</sup> bb)
L1	0.032	0.54	1.44
L2	0.029	0.49	1.31
L3	0.025	0.44	1.18
L4	0.021	0.38	1.05
L5	0.018	0.31	0.92

Keterangan: konsentrasi dinyatakan dalam mg kg bobot segar, batas aman Cd dan Zn mengacu pada standar internasional FAO/WHO.

#### Hubungan antara Bioavailabilitas Logam dalam Tanah dan Akumulasi dalam Buah

Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan bahwa Cd-DTPA memiliki korelasi positif kuat terhadap kandungan Cd pada buah ( $r = 0,72$ ), menunjukkan bahwa fraksi DTPA cukup representatif untuk menggambarkan potensi serapan Cd oleh tanaman stroberi. Keterkaitan ini cukup mengkhawatirkan karena meskipun konsentrasi Cd di tanah rendah, mobilitasnya tetap tinggi.

Sementara itu, korelasi antara Zn-DTPA dan Zn pada buah lebih rendah ( $r = 0,43$ ), mengindikasikan adanya mekanisme homeostasis Zn dalam tanaman yang menjaga konsentrasi Zn dalam buah pada kisaran tertentu meskipun ketersediaan di tanah meningkat. Hal serupa juga terjadi pada Mn dengan korelasi sedang ( $r=0,58$ ), dipengaruhi oleh faktor fisiologis tanaman serta dinamika Mn oksida dalam tanah vulkanik.

Temuan korelatif ini diperkuat dengan penyajian grafik hubungan linear pada setiap unsur, yang menunjukkan bahwa pola sebaran data paling teratur pada Cd dibanding Zn dan Mn. Hal ini menegaskan bahwa Cd merupakan logam dengan sensitivitas tinggi dalam sistem tanah–tanaman pada lahan vulkanik seperti Sembalun.

#### Implikasi terhadap Keamanan Pangan dan Pengelolaan Lahan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa stroberi Sembalun secara umum aman dikonsumsi, namun adanya korelasi kuat antara Cd tanah dan Cd pada buah memberikan sinyal penting untuk manajemen lahan. Pemantauan Cd di tanah perlu diprioritaskan mengingat sumber alami Cd pada Andisol tetap berpotensi terlarut pada kondisi masam. Rekomendasi tindakan mitigasi yang dapat diterapkan petani meliputi pengapuran untuk meningkatkan pH, penambahan bahan organik matang, serta penggunaan pupuk organik berkualitas rendah Cd.

Pengelolaan Zn dan Mn lebih berfokus pada optimalisasi unsur hara agar tanaman tetap berada dalam kondisi fisiologis sehat. Sebagai mikronutrien esensial, Zn dan Mn diperlukan dalam jumlah moderat, sehingga pemantauan yang berlebihan tidak diperlukan. Namun demikian, variabilitas Mn yang cukup tinggi antar lokasi dapat menjadi indikator kondisi tanah yang heterogen, sehingga pemupukan berbasis analisis tanah disarankan untuk menjaga keseimbangan unsur hara.

Penelitian ini juga memperkuat temuan global bahwa tanaman buah berair seperti stroberi memiliki kemampuan akumulasi logam lebih rendah dibanding tanaman sayuran daun atau umbi. Namun demikian, karakteristik Cd yang sangat mobil tetap menempatkan tanaman stroberi dalam kategori tanaman indikator yang sensitif terhadap keberadaan Cd tersedia.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kandungan logam mikro Zn dan Mn pada tanah Andisol di sentra produksi stroberi memiliki keterkaitan yang bermakna dengan akumulasi logam tersebut pada buah, sementara Cd terdeteksi pada kisaran sangat rendah baik di tanah maupun pada jaringan buah. Analisis korelasi menunjukkan adanya hubungan yang signifikan secara statistik antara kadar Zn dan Mn dalam tanah dengan variasi konsentrasi logam dalam buah, yang mengindikasikan bahwa kondisi kimia tanah, khususnya fraksi logam yang dapat diekstraksi menggunakan DTPA, berperan sebagai salah satu faktor pengendali dalam proses bioakumulasi. Temuan ini sejalan dengan karakteristik Andisol yang kaya bahan organik, memiliki pH relatif masam, serta kapasitas tukar kation yang tinggi, yang secara potensial memfasilitasi pengkelatan dan ketersediaan logam esensial bagi tanaman.

Hasil penelitian juga mengindikasikan bahwa pola serapan Zn dan Mn oleh tanaman stroberi konsisten dengan peran fisiologis kedua unsur tersebut dalam proses metabolisme dan perkembangan buah. Rendahnya kadar Cd pada buah menunjukkan bahwa risiko paparan logam berat melalui konsumsi stroberi yang dibudidayakan di lokasi dan periode pengambilan sampel dalam penelitian ini berada pada tingkat yang masih dapat diterima. Namun demikian, pemantauan secara berkelanjutan tetap diperlukan, khususnya pada lahan pertanian intensif yang berpotensi menerima masukan pupuk fosfat dalam jangka panjang. Data yang disajikan dalam bentuk grafik dan tabel memberikan gambaran yang komprehensif mengenai hubungan antara konsentrasi logam dalam tanah dan buah serta variasi antar lokasi produksi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya pengelolaan tanah yang mempertimbangkan bioavailabilitas logam mikro untuk menjaga kualitas dan keamanan buah stroberi. Temuan ini dapat digunakan sebagai dasar ilmiah dalam penyusunan strategi pemupukan spesifik lokasi, program pemantauan kualitas tanah, serta evaluasi keamanan pangan berbasis karakteristik kimia tanah. Kajian lanjutan disarankan untuk melibatkan jumlah sampel yang lebih luas, analisis lintas musim, serta pengembangan model prediksi serapan logam guna memperoleh pemahaman yang lebih presisi mengenai hubungan tanah–tanaman pada sistem pertanian vulkanik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adriani, D., & Yusuf, M. (2020). Analisis logam berat pada tanah dan tanaman di lahan hortikultura Lombok Utara. *Jurnal Biologi Tropis*, 20(1), 45–53.
- Balai Penelitian Tanah. (2017). *Pengaruh amelioran abu dasar dan kompos terhadap serapan hara dan ketersediaan logam (Fe, Mn) pada padi*. Jurnal Teknologi & Industri Pertanian.
- Balai Penelitian Tanah / Kementerian Pertanian. (n.d.). *Analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk: Penetapan ketersediaan Fe, Mn, Cu, Zn ekstrak DTPA*. Repository Pertanian.
- Dahlan, S. A. (2014). *Uji karakteristik fisik dan kimia pada buah stroberi (Fragaria sp.)*. Jurnal Bioteknologi (JBKT). Universitas Brawijaya.
- Dokumentasi/Prosiding Kimia. (2023). *Studi kandungan logam pada jeruk di Kintamani menggunakan ekstraksi bertahap untuk penentuan bioavailabilitas*. Prosiding seminar nasional (publikasi lokal, tidak dipublikasikan secara internasional)
- Handayani, C. O., et al. (2021). *Logam berat dan probabilitas penilaian risiko kesehatan melalui konsumsi beras dari lahan sawah di Hulu Sungai Citarum*. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia.
- Joko, M. (2010). *Pengaruh pupuk hayati dan batuan fosfat alam terhadap ketersediaan fosfor dan pertumbuhan stroberi pada tanah Andisol*. Jurnal Teknologi & Industri Pertanian.
- Marzuki, Q., Khabibi, H., & Prasetya, N. B. A. (2013). *Pemanfaatan limbah kulit udang windu (Penaeus monodon) sebagai edible coating dan pengaruhnya terhadap kadar ion logam Pb(II) pada buah stroberi (Fragaria × ananassa)*. Chem Info, 1(1), 232–239.
- Mulyani, A., & Hikmat, M. (2018). Karakteristik tanah vulkanik Indonesia dan implikasinya bagi produksi hortikultura. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(2), 87–98.
- Parmiko. (2014). *Kandungan logam berat Cu dan Zn pada lahan pertanian Bedugul* (Laporan penelitian, disitasi dalam Rahayu et al., 2015).
- Ramadhan, G. G. (2020). *Perencanaan titik lokasi dan jalur evakuasi letusan Gunung Rinjani*. PURE: Jurnal Kebencanaan. Universitas Brawijaya.

- Rahayu, T., Siaka, I. M., & Widihati, I. A. G. (2015). *Spesiasi dan bioavailabilitas logam berat Cu dan Zn dalam tanah pertanian organik di daerah Bedugul*. Jurnal Kimia.
- ResearchGate / Laporan Geologi Lokal. (2025). *Vulcano-tectonic depression di lapangan panas bumi Sembalun, Lombok Timur: Studi geologi lapangan*.
- Setiawati, M. R. (2023). *Buah stroberi (Fragaria ananassa): Pengaruh aplikasi senyawa organik terhadap sifat media tanam dan hasil*. Jurnal Agrikultura.
- Siaka, I. M. (2015). *Bioavailabilitas dan spesiasi logam berat Pb dan Cd pada tanah pertanian basah dan kering di daerah Denpasar*. Jurnal Kimia. Universitas Udayana Repository.
- UGM / ETD Repository. (n.d.). *Kandungan kadmium dan tembaga dalam tanah: Studi kasus sub DAS Bompon dan lereng gunung api* (Tesis).
- Wisnawa, P. D. P. K., Siaka, I. M., & Bawa Putra, A. G. (2016). *Kandungan logam Pb dan Cu dalam buah stroberi serta spesiasi dan bioavailabilitasnya dalam tanah tempat tumbuh stroberi di daerah Bedugul*. Jurnal Kimia, 10(1).