



Identifikasi Kandungan Logam Berat Kadmium (Cd) pada Lumpur Sawah dan Beras (*Oryza sativa* L.) dari Lahan Sawah di Sekitar Perairan Danau Limboto

*(Identification of Cadmium (Cd) Heavy Metal Content in Paddy Soil and Rice (*Oryza sativa* L.) from Agricultural Fields Surrounding the Limboto Lake Watershed)*

Agung Nurwahid Mancu¹, Herlina Jusuf², Tri Septian Maksum³

^{1,2,3}Kesehatan Masyarakat, Fakultas Olahraga dan Kesehatan, Universitas Negeri Gorontalo
Agungnurwahid031@gmail.com¹, herlinajusuf@ung.ac.id², triseptian@ung.ac.id³

Article Info	Abstract
Article history: Received: 29 Juni 2026 Revised: 15 Juli 2026 Accepted: 16 Juli 2026 Keywords: Limboto Lake Heavy metal Cadmium Paddy soil Rice Kata Kunci: Danau Limboto Logam berat Kadmium Lumpur sawah Beras	Limboto Lake is a critically threatened lake experiencing declining environmental quality due to sedimentation and heavy metal contamination, including cadmium (Cd). This study aims to identify the Cd content in paddy soil and rice from agricultural fields surrounding the Limboto Lake watershed. This research employed a descriptive quantitative approach conducted at three stations (Bolihuangga, Hunggaluwa, and Dutulananaa). Sampling was carried out using a composite method to ensure field-representative data, followed by Cd analysis by Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results showed that Cd was detected in all paddy soil samples, with the highest to lowest concentrations found at Bolihuangga Station (0.29 ppm), Hunggaluwa Station (0.24 ppm), and Dutulananaa Station (0.23 ppm), respectively, all of which remained below the CCME quality standard of 0.6 ppm. In the rice samples, Cd was also detected, with the highest concentrations at Hunggaluwa Station (0.0024 mg/kg), followed by Bolihuangga (0.0020 mg/kg) and Dutulananaa (0.0019 mg/kg), all of which complied with the SNI 6128:2020 standard of 0.1 mg/kg. Although these levels are below the permissible thresholds, the presence of Cd indicates that heavy metals are entering the food chain. Given the persistent and bioaccumulative nature of Cd, this heavy metal will continue to accumulate in the environment and build up in body tissues. Regular environmental monitoring is required. It is recommended that communities and farmers reduce the excessive use of phosphated chemical fertilizers and transition to organic fertilizers or to more sly friendly agricultural methods to prevent long-term accumulation of hebemetilsan paddy fields. Abstrak Danau Limboto merupakan danau kritis yang mengalami penurunan kualitas lingkungan akibat sedimentasi dan kontaminasi logam berat, termasuk kadmium (Cd). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan Cd pada lumpur sawah dan beras di area sawah di sekitar perairan Danau Limboto. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif di tiga stasiun (Bolihuangga, Hunggaluwa, dan Dutulananaa). Pengambilan sampel dilakukan secara komposit untuk memastikan keterwakilan data di lapangan, kemudian analisis Cd menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Hasil penelitian menunjukkan Cd terdeteksi pada seluruh sampel lumpur sawah, dengan kadar tertinggi hingga terendah secara berturut-turut

terdapat di Stasiun Bolihuangga (0,29 ppm), Hunggaluwa (0,24 ppm), dan Dutulanaa (0,23 ppm) dan seluruhnya masih di bawah baku mutu CCME (0,6 ppm). Pada sampel beras, Cd juga terdeteksi dengan kadar tertinggi di Stasiun Hunggaluwa (0,0024 mg/kg), Bolihuangga (0,0020 mg/kg) dan Dutulanaa (0,0019 mg/kg) dan seluruhnya masih memenuhi standar SNI 6128:2020 (0,1 mg/kg). Meskipun berada di bawah ambang batas, keberadaan Cd menunjukkan adanya transfer logam berat ke dalam rantai makanan. Mengingat sifat Cd yang persisten dan bioakumulatif, logam berat ini akan terus mengendap di lingkungan dan menumpuk di dalam jaringan tubuh. Diperlukan pemantauan lingkungan secara berkala, masyarakat dan petani disarankan untuk mengurangi penggunaan pupuk kimia berbasis fosfat secara berlebihan serta beralih ke pupuk organik atau metode pertanian yang lebih ramah lingkungan guna mencegah akumulasi logam berat jangka panjang di lahan sawah.

Corresponding Author:

Tri Septian Maksum
Fakultas Olahraga dan Kesehatan
Universitas Negeri Gorontalo
triseptian@ung.ac.id

1. PENDAHULUAN

Logam berat merupakan kelompok unsur dengan densitas lebih dari 5 g/cm³ yang pada konsentrasi tertentu bersifat toksik dan dapat menimbulkan ancaman bagi organisme hidup. Logam berat memiliki karakteristik persisten, tidak dapat terdegradasi secara alami, serta mampu mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi di dalam rantai makanan. Keberadaan logam berat di lingkungan dapat berasal dari proses alami seperti pelapukan batuan dan erosi, maupun aktivitas antropogenik seperti industri, pertambangan, transportasi, limbah domestik, serta aktivitas pertanian intensif (Bahute et al., 2024). Salah satu logam berat yang menjadi perhatian global dalam isu pencemaran lingkungan adalah kadmium (Cd).

Kadmium (Cd) merupakan logam berat non-esensial yang bersifat toksik meskipun berada pada konsentrasi rendah. Cd memiliki sifat mobile, persisten, non-biodegradable, dan mudah terakumulasi di lingkungan maupun jaringan biologis (Wamaulana et al., 2022). Di lingkungan perairan, Cd cenderung berikatan dengan partikel organik dan mengendap di sedimen sehingga dapat bertahan dalam jangka waktu lama dan menjadi sumber pencemar yang berbahaya (Rahman et al., 2022). Sifat tersebut menyebabkan Cd menjadi salah satu kontaminan prioritas dalam berbagai kajian kesehatan lingkungan dan keamanan pangan.

Paparan Cd terhadap manusia dapat menimbulkan berbagai dampak kesehatan serius. Cd yang masuk ke dalam tubuh melalui makanan, minuman, maupun inhalasi akan terakumulasi terutama pada organ ginjal dan hati karena proses ekskresinya yang lambat (Girikallo et al., 2022). Paparan jangka panjang diketahui dapat menyebabkan gangguan fungsi ginjal, kerusakan hati, gangguan sistem pernapasan, gangguan metabolisme kalsium, hingga gangguan tulang dan risiko kanker (Pratiwiningsih et al., 2022). *International Agency for Research on Cancer* (IARC) juga mengklasifikasikan Cd sebagai karsinogen grup 1 bagi manusia. Oleh karena itu, keberadaan Cd pada lingkungan pertanian dan bahan pangan perlu menjadi perhatian serius karena berpotensi menimbulkan risiko kesehatan masyarakat secara kronis.

Salah satu media lingkungan yang rentan mengalami akumulasi Cd adalah sedimen atau lumpur pada ekosistem perairan dan pertanian. Sedimen berfungsi sebagai reservoir logam berat karena partikel logam yang terbawa aliran air cenderung mengendap dan terakumulasi di dasar perairan maupun lahan sawah. Dalam sistem pertanian, logam berat yang terdapat pada lumpur sawah dapat terserap oleh tanaman dan berpindah ke jaringan tanaman pangan. Tanaman padi (*Oryza sativa* L.) diketahui memiliki kemampuan menyerap logam berat melalui akar dan mentranslokasikannya ke bagian batang, daun, hingga bulir beras (Hamdan et al., 2020). Kondisi ini menyebabkan beras berpotensi menjadi jalur utama paparan Cd bagi manusia, terutama pada masyarakat yang menjadikan beras sebagai makanan pokok.

Penyerapan Cd oleh tanaman padi dipengaruhi oleh sifat kimia Cd yang menyerupai unsur hara esensial seperti Zn, Fe, dan Ca sehingga Cd dapat masuk melalui jalur transport ion pada akar tanaman. Cd yang berada di daerah perakaran akan diserap oleh akar, kemudian ditranslokasikan melalui jaringan xilem dan floem menuju bagian atas tanaman dan akhirnya terakumulasi pada bulir beras (Li et al., 2024). Proses tersebut meningkatkan potensi kontaminasi bahan pangan dan menimbulkan ancaman terhadap keamanan pangan masyarakat. Penelitian Zhang et al. (2025) menjelaskan bahwa Cd yang terakumulasi pada bulir padi

dapat meningkatkan risiko paparan kronis apabila beras dikonsumsi secara terus-menerus dalam jangka panjang.

Kontaminasi Cd pada lahan pertanian dapat berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun antropogenik. Salah satu sumber utama Cd dalam sistem pertanian adalah penggunaan pupuk kimia berbasis fosfat dan pestisida. Pupuk fosfat diketahui mengandung Cd sebagai unsur pengotor alami dari batuan fosfat yang digunakan sebagai bahan baku pupuk (Zou et al., 2023). Penggunaan pupuk fosfat secara terus-menerus dapat meningkatkan konsentrasi Cd di dalam tanah sehingga meningkatkan risiko penyerapan oleh tanaman pangan (Aulia et al., 2023). Selain itu, limpasan permukaan (*runoff*) dari lahan pertanian dapat membawa residu pupuk dan logam berat menuju badan air sehingga menyebabkan terjadinya siklus pencemaran antara lingkungan pertanian dan perairan.

Salah satu wilayah yang mengalami tekanan pencemaran lingkungan akibat aktivitas antropogenik adalah Danau Limboto di Provinsi Gorontalo. Danau Limboto merupakan danau terbesar di Provinsi Gorontalo yang memiliki fungsi penting sebagai sumber irigasi pertanian, sumber perikanan, serta penopang aktivitas sosial ekonomi masyarakat sekitar. Namun, dalam beberapa dekade terakhir kualitas lingkungan Danau Limboto mengalami penurunan yang signifikan. Danau ini mengalami sedimentasi tinggi, pendangkalan, penyusutan luas perairan, serta peningkatan beban pencemaran akibat aktivitas domestik, pertanian, dan perubahan tata guna lahan di daerah tangkapan air (Rahim et al., 2020).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa Danau Limboto telah mengalami pencemaran logam berat pada media air, sedimen, dan biota perairan. Noor (2020) melaporkan bahwa kadar Cd pada air Danau Limboto berada pada kisaran 0,0011–0,0069 ppm dan kadar Cd pada ikan nila berkisar 0,0114–0,0181 ppm. Meskipun nilai tersebut masih berada di bawah ambang batas baku mutu, kandungan Cd pada sedimen tercatat mencapai 4,267–5,935 ppm dan telah melampaui baku mutu *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME) sebesar 0,6 ppm. Temuan tersebut menunjukkan bahwa sedimen Danau Limboto telah mengalami akumulasi logam berat Cd dalam jangka panjang dan berpotensi menjadi sumber pencemar sekunder bagi lingkungan di sekitarnya.

Penelitian lain oleh Hadiyanto et al. (2022) juga menunjukkan bahwa sedimen Danau Limboto memiliki kandungan logam berat lebih tinggi dibandingkan media air dan biota perairan. Tingginya konsentrasi logam berat pada sedimen menunjukkan bahwa sedimen berfungsi sebagai media akumulasi utama logam berat di Danau Limboto. Kondisi tersebut diperburuk oleh aktivitas pertanian di sekitar danau yang menggunakan pupuk dan pestisida kimia secara intensif. Residu bahan kimia pertanian tersebut dapat terbawa limpasan permukaan menuju badan air dan akhirnya mengendap sebagai sedimen yang kaya logam berat.

Permasalahan lingkungan di Danau Limboto semakin kompleks dengan adanya sedimentasi dan luapan air danau yang sering terjadi pada musim penghujan. Berdasarkan observasi lapangan, beberapa area persawahan di sekitar Danau Limboto berada pada wilayah sempadan danau yang memiliki keterkaitan langsung dengan sistem hidrologi danau. Ketika terjadi peningkatan muka air dan luapan danau, sedimen yang mengandung Cd berpotensi terbawa menuju area sawah dan mengendap pada lumpur sawah. Kondisi ini menyebabkan lahan pertanian di sekitar Danau Limboto berpotensi mengalami akumulasi logam berat Cd.

Selain berasal dari sedimentasi danau, penggunaan pupuk NPK berbasis fosfat oleh petani di sekitar Danau Limboto juga berpotensi meningkatkan kadar Cd pada lahan pertanian. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa pupuk NPK merupakan salah satu sumber utama Cd dalam sistem pertanian karena mengandung unsur pengotor Cd dari bahan baku fosfat (Jaya & Prasetya, 2025). Penggunaan pupuk berbasis fosfat secara berlebihan dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi Cd di dalam tanah dan meningkatkan risiko penyerapan oleh tanaman padi (Qina et al., 2021 dalam Jaya & Prasetya, 2025). Hadiyanto et al. (2022) juga melaporkan bahwa konsentrasi fosfat di Danau Limboto berkisar antara 1,96–5,0 mg/L dan telah melampaui baku mutu kualitas air sebesar 0,2 mg/L berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021. Tingginya kadar fosfat tersebut menunjukkan adanya pengaruh aktivitas pertanian terhadap kualitas lingkungan Danau Limboto.

Provinsi Gorontalo sendiri merupakan salah satu daerah dengan sektor pertanian padi yang cukup besar. Kabupaten Gorontalo memiliki luas area persawahan terbesar di Provinsi Gorontalo, dengan produksi padi yang terus meningkat setiap tahun (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2025). Kondisi ini menunjukkan bahwa keberlanjutan kualitas lingkungan pertanian sangat penting untuk menjaga ketahanan pangan regional. Apabila lahan sawah mengalami kontaminasi logam berat Cd, maka terdapat risiko masuknya Cd ke dalam rantai pangan melalui konsumsi beras oleh masyarakat.

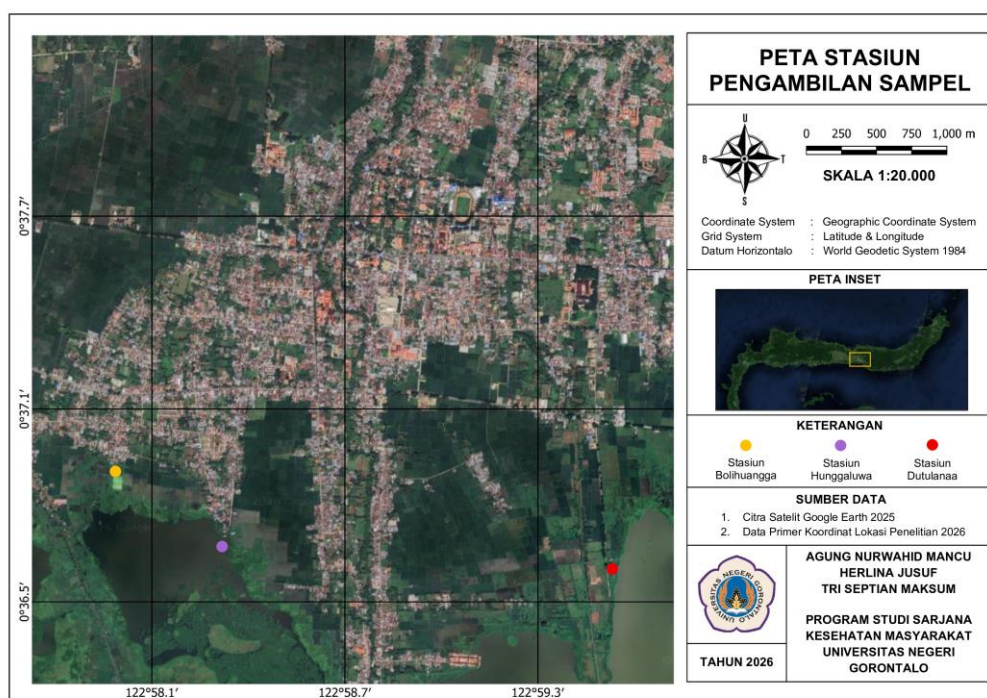
Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji kandungan logam berat di Danau Limboto, namun sebagian besar hanya berfokus pada media air, sedimen danau, dan biota perairan. Kajian mengenai kandungan Cd pada lumpur sawah dan beras yang berasal dari lahan sawah di sekitar Danau Limboto masih sangat terbatas. Padahal, area sawah tersebut memiliki hubungan ekologis dan hidrologis langsung dengan Danau Limboto sehingga berpotensi menjadi jalur perpindahan logam berat dari lingkungan perairan menuju

tanaman pangan. Keterbatasan kajian tersebut menunjukkan adanya *research gap* terkait potensi kontaminasi Cd pada sistem pertanian di sekitar Danau Limboto.

Selain itu, beberapa penelitian terdahulu umumnya hanya menilai keberadaan logam berat pada satu media lingkungan, seperti air atau sedimen, tanpa menghubungkannya dengan media pertanian dan bahan pangan. Padahal, kajian yang mengintegrasikan analisis pada lumpur sawah dan beras sangat penting untuk memahami potensi transfer Cd dari lingkungan ke rantai makanan. Dengan demikian, penelitian ini memiliki kebaruan dalam aspek objek dan unit analisis penelitian, yaitu mengidentifikasi kandungan logam berat Cd secara langsung pada lumpur sawah dan beras dari area persawahan yang berada di sekitar perairan Danau Limboto. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan logam berat kadmium (Cd) pada lumpur sawah dan beras (*Oryza sativa* L.) dari lahan sawah di sekitar perairan Danau Limboto.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif laboratorium yang bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan logam berat kadmium (Cd) pada lumpur sawah dan beras (*Oryza sativa* L.) dari lahan sawah di sekitar perairan Danau Limboto. Pendekatan deskriptif dipilih karena penelitian ini berfokus pada penggambaran kondisi aktual kandungan Cd pada media lingkungan dan bahan pangan tanpa memberikan perlakuan tertentu terhadap objek penelitian. Penelitian dilaksanakan pada area persawahan yang berada di sekitar perairan Danau Limboto, Provinsi Gorontalo, yang meliputi tiga stasiun pengambilan sampel, yaitu Kelurahan Bolihuangga, Kelurahan Hunggaluwa, dan Kelurahan Dutulanaa. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada kedekatan area persawahan dengan badan perairan Danau Limboto serta potensi paparan logam berat akibat aktivitas pertanian dan sedimentasi danau. Penelitian dilaksanakan pada tahun 2026.



Gambar 1. Peta Stasiun Pengambilan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh area persawahan yang berada di sekitar perairan Danau Limboto. Sampel penelitian terdiri atas sampel lumpur sawah dan sampel beras yang berasal dari area persawahan di tiga stasiun penelitian. Pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling* dengan mempertimbangkan keterkaitan langsung area sawah dengan sistem hidrologi Danau Limboto dan aktivitas pertanian masyarakat setempat. Pada masing-masing stasiun dilakukan pengambilan sampel secara komposit untuk memperoleh data yang representatif terhadap kondisi lingkungan pada setiap lokasi penelitian. Teknik komposit dilakukan dengan menggabungkan lima titik pengambilan sampel dalam satu area sawah pada setiap stasiun sehingga dapat menggambarkan kondisi rata-rata kandungan Cd pada lokasi tersebut.

Sampel lumpur sawah diambil pada lapisan permukaan tanah sawah menggunakan alat bantu berupa sekop kecil yang bersih dan bebas kontaminasi. Lumpur sawah dari beberapa titik pada masing-masing stasiun kemudian dicampurkan menjadi satu sampel komposit dan dimasukkan ke dalam wadah steril yang telah diberi label. Sebelum pengambilan sampel, dilakukan pengukuran pH lumpur sawah menggunakan alat

soil pH meter untuk mengetahui kondisi keasaman lumpur sawah yang dapat memengaruhi mobilitas dan ketersediaan hayati logam berat Cd di lingkungan sawah. Sampel lumpur sawah kemudian disimpan dalam kondisi tertutup dan dibawa ke laboratorium untuk dilakukan preparasi dan analisis lebih lanjut.

Pengambilan sampel beras dilakukan pada tanaman padi yang telah dipanen di area persawahan sekitar Danau Limboto. Sampel beras berasal dari hasil panen petani pada masing-masing stasiun penelitian. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam wadah bersih dan diberi label sesuai lokasi pengambilan sampel sebelum dilakukan analisis laboratorium. Penggunaan sampel beras dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi transfer logam berat Cd dari media lingkungan pertanian ke bahan pangan yang dikonsumsi masyarakat.

Analisis kandungan logam berat Cd pada sampel lumpur sawah dan beras dilakukan di laboratorium menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) atau Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). Metode AAS dipilih karena memiliki sensitivitas dan akurasi yang tinggi dalam mendeteksi logam berat pada konsentrasi rendah. Sebelum proses pengukuran, sampel lumpur sawah dan beras terlebih dahulu melalui tahap preparasi yang meliputi pengeringan, penghancuran, penimbangan, dan destruksi menggunakan larutan kimia agar logam Cd dapat terlarut secara sempurna. Larutan hasil destruksi kemudian dianalisis menggunakan alat AAS untuk menentukan konsentrasi Cd berdasarkan absorbansi sampel terhadap panjang gelombang spesifik logam Cd.

Instrumen utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alat *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) untuk pengukuran kadar Cd, pH meter untuk pengukuran derajat keasaman lumpur sawah, alat gelas laboratorium, timbangan analitik, hot plate, oven, serta perangkat preparasi sampel lainnya. Bahan yang digunakan meliputi sampel lumpur sawah dan beras, aquades, larutan asam nitrat (HNO_3), dan bahan kimia laboratorium lain yang digunakan pada proses destruksi sampel. Seluruh proses analisis laboratorium dilakukan di UPTD Laboratorium Kesehatan Masyarakat Provinsi Gorontalo sesuai prosedur pengujian logam berat menggunakan metode AAS.

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung kadar Cd pada sampel lumpur sawah dan beras serta pengukuran pH lumpur sawah. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari berbagai sumber ilmiah, laporan penelitian terdahulu, regulasi pemerintah, dan literatur yang relevan dengan pencemaran logam berat Cd pada lingkungan pertanian dan perairan Danau Limboto.

Teknik analisis data dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan hasil pengukuran kadar Cd pada lumpur sawah dan beras terhadap baku mutu yang berlaku. Kadar Cd pada lumpur sawah dibandingkan dengan baku mutu sedimen berdasarkan *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME) tahun 1997 sebesar 0,6 ppm, sedangkan kadar Cd pada beras dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 6128:2020 sebesar 0,1 mg/kg. Hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan diinterpretasikan untuk menggambarkan kondisi pencemaran Cd pada area persawahan di sekitar Danau Limboto serta potensi risikonya terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengukuran pH Lumpur Sawah

Hasil pengukuran pH lumpur sawah menunjukkan bahwa seluruh lokasi penelitian memiliki kondisi tanah yang bersifat asam hingga sangat masam. Nilai pH pada Stasiun Bolihuangga sebesar 4,0, Stasiun Hunggaluwa sebesar 3,5, dan Stasiun Dutulananaa sebesar 5,0. Berdasarkan klasifikasi Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Kementerian Pertanian Tahun 2023, nilai pH tersebut termasuk kategori masam hingga sangat masam.

Tabel 1. Nilai pH pada Lumpur Sawah

Stasiun Sampling	Nilai pH	Kategori Berdasarkan Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk, Kementerian Pertanian Tahun 2023
Bolihuangga	4,0	Sangat masam
Hunggaluwa	3,5	Sangat masam
Dutulanaa	5,0	Masam

Kondisi tanah yang asam memiliki pengaruh besar terhadap perilaku logam berat di lingkungan. Pada pH rendah, ion Cd^{2+} menjadi lebih mudah larut sehingga meningkatkan mobilitas dan ketersediaan hayati logam berat dalam tanah. Semakin rendah nilai pH tanah, maka semakin besar potensi Cd untuk diserap oleh akar tanaman padi. Hal ini disebabkan karena ion H^+ pada tanah asam dapat menggantikan ion logam yang terikat pada partikel tanah sehingga Cd lebih mudah terlepas ke larutan tanah.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Ferina et al. (2020) yang menyatakan bahwa kondisi tanah asam meningkatkan kelarutan logam berat dan memperbesar potensi translokasi Cd ke tanaman. Li et al.,

(2024) juga menjelaskan bahwa peningkatan mobilitas Cd pada tanah asam dapat memperbesar risiko pencemaran tanaman pangan karena Cd lebih mudah tersedia bagi tanaman.

Selain memengaruhi mobilitas Cd, kondisi tanah masam juga dapat memengaruhi aktivitas mikroorganisme tanah dan ketersediaan unsur hara esensial. Pada tanah yang terlalu asam, aktivitas mikroorganisme pengurai bahan organik dapat menurun sehingga memengaruhi keseimbangan biogeokimia tanah. Kondisi tersebut dapat menyebabkan tanaman lebih rentan menyerap logam berat karena kompetisi dengan unsur hara esensial menjadi berkurang.

3.2 Hasil Pengukuran Kadar Kadmium (Cd) pada Lumpur Sawah

Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa seluruh sampel lumpur sawah pada tiga stasiun penelitian terdeteksi mengandung logam berat Cd. Kadar Cd tertinggi ditemukan pada Stasiun Bolihuangga sebesar 0,29 ppm, diikuti Stasiun Hunggaluwa sebesar 0,24 ppm, dan Stasiun Dutulanaa sebesar 0,23 ppm.

Apabila dibandingkan dengan baku mutu berdasarkan *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME) sebesar 0,6 ppm, seluruh hasil pengukuran masih berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi lumpur sawah di lokasi penelitian masih memenuhi standar kualitas lingkungan untuk parameter Cd.

Tabel 2. Kadar Kadmium (Cd) pada Sampel Lumpur Sawah

Stasiun Sampling	Kadar Cd (ppm)	Baku Mutu CCME (ppm)
Bolihuangga	0,29	0,6
Hunggaluwa	0,24	0,6
Dutulanaa	0,23	0,6

Meskipun masih berada di bawah baku mutu, keberadaan Cd pada seluruh sampel lumpur sawah menunjukkan bahwa area persawahan di sekitar Danau Limboto telah mengalami paparan logam berat. Keberadaan Cd pada lumpur sawah diduga berasal dari kombinasi faktor alamiah dan aktivitas antropogenik. Salah satu sumber utama yang diduga berkontribusi adalah sedimentasi dari Danau Limboto. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa sedimen Danau Limboto telah mengandung Cd dengan konsentrasi 4,267–5,935 ppm, melebihi baku mutu sedimen CCME sebesar 0,6 ppm.

Tingginya kandungan Cd pada sedimen Danau Limboto menunjukkan bahwa sedimen danau telah berfungsi sebagai reservoir logam berat dalam jangka panjang. Pada musim penghujan, luapan air danau dapat membawa sedimen yang mengandung Cd menuju area persawahan di sekitarnya. Proses deposisi sedimen tersebut memungkinkan terjadinya perpindahan logam berat dari ekosistem perairan ke ekosistem pertanian. Kondisi ini memperlihatkan adanya keterkaitan ekologis antara kualitas lingkungan Danau Limboto dan kualitas lahan pertanian di sekitarnya. Mekanisme ini diperkuat oleh temuan Pahira dan Rinaldy (2026) yang menyatakan bahwa paparan air tercemar secara berkelanjutan mampu meningkatkan kandungan Cd tanah sawah hingga 2–3 kali lipat dibandingkan irigasi yang tidak tercemar.

Meskipun demikian, terdapat perbedaan mencolok antara kadar Cd sedimen danau dengan lumpur sawah (0,23–0,29 ppm). Fenomena ini mengindikasikan adanya proses pencucian (*leaching*) pada sistem irigasi terbuka. Air yang menggenang atau mengalir melarutkan fraksi Cd yang bersifat *mobile*, lalu membawanya keluar dari lapisan olah tanah melalui aliran permukaan.

Selain faktor hidrologi, aktivitas antropogenik lokal berupa aplikasi pupuk NPK berbasis fosfat secara intensif (3 kali per musim tanam: 7, 14, dan 35 HST) turut berkontribusi meningkatkan residu Cd. Secara alami, batuan fosfat mengandung Cd sebagai unsur pengotor dalam struktur mineralnya. Ketika batuan tersebut diolah menjadi pupuk dan diaplikasikan, Cd ikut terlepas ke lingkungan sehingga peningkatan kadar fosfat dengan peningkatan Cd (Wangge et al., 2021; Zou et al., 2023).

Mobilitas dan ketersediaan hayati (*bioavailability*) Cd di lokasi penelitian juga dipengaruhi oleh kondisi kimia tanah yang bersifat masam hingga sangat masam (pH 3,5–5,0). Pada pH rendah, konsentrasi ion hidrogen (H^+) meningkat dan berkompetisi dengan ion Cd^{2+} dalam menempati koloid tanah. Dominasi ion H^+ mendorong ion Cd^{2+} keluar ke fase terlarut, menjadikannya lebih *mobile* dan mudah diserap oleh sistem perakaran padi (Nungula et al., 2024; Zulfiqar et al., 2022).

Secara ekologis, keberadaan Cd ini menimbulkan tekanan lingkungan (*environmental stress*) yang laten. Sebagai logam berat yang bersifat *non-biodegradable* dan persisten, Cd tidak dapat terurai dan bertahan lama di alam (Zulfiqar et al., 2023). Dalam jangka panjang, akumulasi Cd berpotensi mengganggu aktivitas mikroorganisme tanah, menurunkan kesuburan, mengganggu keseimbangan biogeokimia, serta menghambat dekomposisi bahan organik, terutama pada kondisi masam (Li et al., 2024; Perera et al., 2024).

Walaupun konsentrasi Cd saat ini masih berada di bawah ambang batas baku mutu, sifatnya yang persisten serta adanya input berulang dari pupuk dan sedimen danau berisiko meningkatkan konsentrasi secara gradual. Letak sawah di sempadan danau menciptakan siklus bolak-balik (*recycling*) kontaminan yang kontinu melalui luapan air dan aliran permukaan (*runoff*). Oleh karena itu, pemantauan berkala mutlak diperlukan untuk mengantisipasi dampak akumulasi jangka panjang dalam sistem lingkungan ini.

3.3 Hasil Pengukuran Kadar Kadmium (Cd) pada Sampel Beras

Hasil pengujian kadar Cd pada sampel beras menunjukkan bahwa seluruh sampel beras dari tiga stasiun penelitian terdeteksi mengandung logam berat Cd. Kadar Cd tertinggi ditemukan pada Stasiun Hunggaluwa sebesar 0,0024 mg/kg, diikuti oleh Stasiun Bolihuangga sebesar 0,0020 mg/kg, dan kadar terendah pada Stasiun Dutulanaa sebesar 0,0019 mg/kg.

Apabila dibandingkan dengan standar keamanan pangan berdasarkan SNI 6128 Tahun 2020 sebesar 0,1 mg/kg, seluruh sampel beras masih berada jauh di bawah batas maksimum cemaran Cd yang diperbolehkan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa beras yang berasal dari area persawahan sekitar Danau Limboto pada saat penelitian masih tergolong aman untuk dikonsumsi dari aspek cemaran logam berat Cd.

Tabel 3. Kadar Kadmium (Cd) pada Sampel Beras

Stasiun Sampling	Kadar Cd (mg/kg)	Baku Mutu SNI (mg/kg)
Bolihuangga	0,0020	0,1
Hunggaluwa	0,0024	0,1
Dutulanaa	0,0019	0,1

Keberadaan kadmium (Cd) pada butiran beras membuktikan terjadinya translokasi logam dari lumpur sawah ke bagian tanaman yang dikonsumsi manusia, di mana tanaman padi (*Oryza sativa* L.) terbukti memiliki kemampuan akumulasi logam berat yang lebih tinggi dibandingkan tumbuhan sereal lainnya (Wakhle et al., 2025). Proses masuknya kontaminan ini dimulai ketika ion Cd^{2+} diserap oleh akar, bergerak menuju tajuk tanaman melalui jaringan xilem, hingga akhirnya terakumulasi di dalam bulir beras melalui jaringan floem selama fase pengisian.

Dalam penelitian ini, ditemukan fenomena menarik di mana kadar Cd pada beras tertinggi justru berada di Stasiun Hunggaluwa (0,0024 mg/kg) meskipun konsentrasi Cd lumpur sawahnya sebesar 0,24 ppm lebih rendah daripada Stasiun Bolihuangga (0,29 ppm). Kondisi tersebut menegaskan bahwa penyerapan Cd tidak hanya bergantung pada total logam di media tanam, melainkan dikontrol ketat oleh keasaman tanah, mengingat Stasiun Hunggaluwa memiliki pH sangat masam yaitu 3,5. Penurunan nilai pH terbukti memiliki korelasi negatif yang signifikan terhadap ketersediaan Cd, di mana kondisi masam meningkatkan konsentrasi ion hidrogen (H^+) yang berkompetisi dengan ion Cd^{2+} pada koloid tanah, sehingga mendorong logam terlepas ke fase terlarut dan memicu penyerapan yang lebih masif oleh sistem perakaran (Ferina et al., 2020). Kendati demikian, kadar Cd pada beras dari lokasi penelitian secara umum tergolong rendah yang disebabkan oleh mekanisme fisiologis tanaman padi yang aktif membatasi translokasi logam ke biji dengan cara menahan dan menyimpannya di dalam jaringan vegetatif seperti akar, batang, dan daun (Meriem, 2023). Pola mobilitas logam serta pengaruh pH tanah yang asam ini sejalan dengan temuan Redu et al. (2020) (0,006–0,008 mg/kg) dan Agustin et al. (2025) (1,15 mg/kg) yang juga mengonfirmasi korelasi serupa serta mengidentifikasi aplikasi pupuk anorganik berbasis fosfat sebagai salah satu sumber pengotor Cd di lahan pertanian.

Meskipun konsentrasi Cd pada seluruh sampel beras (0,0019–0,0024 mg/kg) saat ini masih berada jauh di bawah batas maksimum SNI 6128:2020 yaitu sebesar 0,1 mg/kg, temuan ini harus disikapi sebagai sinyal waspada dini (*early warning*) bagi kesehatan masyarakat. Sifat toksisitas Cd yang persisten dan *non-biodegradable* menyebabkannya mudah berakumulasi di dalam tubuh manusia melalui jalur paparan oral akibat konsumsi pangan harian yang rutin (Alengebawy et al., 2021). Logam berat ini memiliki waktu paruh biologis (*half-life*) yang sangat panjang berkisar antara 10 hingga 30 tahun, sehingga berisiko memicu akumulasi jangka panjang pada organ-organ vital seperti ginjal, hati, paru-paru, dan tulang (Shobowale et al., 2025).

Melalui Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), kelompok anak-anak diidentifikasi memiliki nilai *Hazard Quotient* (HQ) tertinggi dibandingkan kelompok usia lainnya, menandakan bahwa mereka merupakan kelompok yang paling rentan akibat proporsi tingkat konsumsi yang tinggi namun tidak sebanding dengan massa tubuh yang kecil (Handayani et al., 2022). Oleh karena itu, paparan kronis akibat konsumsi berulang dalam hitungan dekade ke depan dikhawatirkan dapat meningkatkan beban tubuh (*body burden*) hingga melampaui batas toleransi fisiologis manusia karena sifat kadmium sebagai karsinogen Grup 1. Implikasi dari temuan ini menekankan mendesaknya langkah-langkah preventif yang nyata, seperti pemberian edukasi kepada petani setempat mengenai penggunaan pupuk ramah lingkungan, upaya remediasi lahan sawah yang tercemar, serta pelaksanaan pengawasan keamanan pangan secara berkala oleh instansi kesehatan terkait demi mencegah peningkatan kasus penyakit degeneratif di masa depan.

Meskipun kadar Cd pada beras masih berada di bawah standar keamanan pangan, keberadaan logam berat Cd tetap perlu menjadi perhatian karena Cd bersifat persisten dan bioakumulatif. Paparan Cd dalam jangka panjang melalui konsumsi pangan dapat meningkatkan risiko gangguan ginjal, gangguan metabolisme kalsium, kerusakan tulang, dan penyakit kronis lainnya. Oleh karena itu, pemantauan kualitas lingkungan pertanian dan keamanan pangan di sekitar Danau Limboto perlu dilakukan secara berkala guna mengantisipasi peningkatan akumulasi Cd di masa mendatang.

4 KESIMPULAN DAN SARAN/REKOMENDASI

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai identifikasi kandungan logam berat kadmium (Cd) pada lumpur sawah dan beras (*Oryza sativa* L.) dari lahan sawah di sekitar perairan Danau Limboto, dapat disimpulkan bahwa seluruh sampel lumpur sawah pada tiga stasiun penelitian terdeteksi mengandung logam berat Cd. Kadar Cd tertinggi ditemukan pada Stasiun Bolihuangga sebesar 0,29 ppm, diikuti Stasiun Hunggaluwa sebesar 0,24 ppm, dan Stasiun Dutulanaa sebesar 0,23 ppm. Namun, seluruh kadar Cd pada lumpur sawah masih berada di bawah baku mutu sedimen menurut *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME) sebesar 0,6 ppm.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa seluruh sampel beras dari area persawahan sekitar Danau Limboto terdeteksi mengandung logam berat Cd. Kadar Cd tertinggi pada beras ditemukan di Stasiun Hunggaluwa sebesar 0,0024 mg/kg, diikuti Stasiun Bolihuangga sebesar 0,0020 mg/kg, dan Stasiun Dutulanaa sebesar 0,0019 mg/kg. Seluruh kadar Cd pada beras masih berada di bawah ambang batas maksimum cemaran logam berat berdasarkan SNI 6128:2020 sebesar 0,1 mg/kg sehingga beras pada lokasi penelitian masih tergolong aman untuk dikonsumsi.

Nilai pH lumpur sawah pada lokasi penelitian berada pada kondisi masam hingga sangat masam, yaitu berkisar antara 3,5–5,0. Kondisi pH yang rendah diduga memengaruhi mobilitas dan ketersediaan hayati Cd dalam tanah sehingga meningkatkan potensi penyerapan Cd oleh tanaman padi. Meskipun kadar Cd pada lumpur sawah masih berada di bawah baku mutu, keberadaan Cd pada lumpur sawah dan beras menunjukkan adanya potensi transfer logam berat dari lingkungan pertanian ke bahan pangan di sekitar perairan Danau Limboto.

4.2 Saran/Rekomendasi

Perlu dilakukan pemantauan berkala terhadap kandungan logam berat Cd pada media lingkungan pertanian, khususnya lumpur sawah, air irigasi, dan beras di sekitar perairan Danau Limboto guna mencegah peningkatan akumulasi logam berat yang dapat berdampak terhadap kesehatan masyarakat dan keamanan pangan.

Petani di sekitar Danau Limboto disarankan untuk lebih bijak dalam penggunaan pupuk kimia berbasis fosfat dan mulai menerapkan praktik pertanian ramah lingkungan guna meminimalkan potensi akumulasi logam berat pada lahan pertanian. Selain itu, perlu dilakukan upaya pengelolaan lingkungan Danau Limboto secara terpadu untuk mengurangi sedimentasi dan pencemaran yang dapat memengaruhi kualitas ekosistem persawahan di sekitarnya.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji faktor-faktor lain yang memengaruhi penyerapan Cd oleh tanaman padi, seperti kandungan bahan organik tanah, kapasitas tukar kation, dan penggunaan jenis pupuk tertentu. Disarankan untuk melakukan analisis risiko kesehatan lingkungan akibat paparan Cd melalui konsumsi beras. Selain itu, pada penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengukuran kadar logam berat Cd pada masyarakat sekitar yang mengonsumsi beras dari lahan sawah di sekitar perairan Danau Limboto baik dengan melakukan pemeriksaan urin, rambut, kuku maupun darah, untuk melihat apakah paparan logam berat ini telah terakumulasi dan masuk ke manusia dan berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan kronis pada masyarakat.

REFERENSI

- Agustin, Y. S., Syahrani, L. P. W., Taqwim, M. H. A., Arlysia, V., & Herbowo, A. C. F. (2025). Kandungan Kadmium (Cd) pada Jenis Beras C4 Super, C4 Raja, Mentik, dan Rojolele. *ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research*, 26(2), 59. <https://doi.org/10.20961/enviro.v26i2.98161>
- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M.-Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Aulia, A. J., Ridwan, I., & Tambung, A. (2023). Bioremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Kadmium (Cd) dari Tempat Pembuangan Akhir Sampah Tamangapa di Kota Makassar Menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* untuk Budidaya Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.). *Jurnal Lanskap Dan Lingkungan (Julia)*, 1(2), 108–119. <https://doi.org/10.20956/julia.v1i2.34909>
- Bahute, F. O., Nakoe, M. R., & Jusuf, H. (2024). Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) sebagai Agen Penyerap Logam Berat Mangan (Mn) dari Limbah Cair Industri Tahu: *Jurnal Kolaboratif Sains*, 7(6), 2228–2238. <https://doi.org/10.56338/jks.v7i6.5499>
- Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Kementerian Pertanian. (2023). Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk.
- Ferina, P., Rosariastuti, R., & Dewi, W. (2020). Cadmium Mapping and Contamination Potential on Different Paddy Field Managements in Sragen Regency, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(1).

- https://www.researchgate.net/publication/346814640_Cadmium_mapping_and_contamination_potential_on_different_paddy_field_managements_in_Sragen_Regency_Indonesia
- Girikallo, G. G., Joseph, W. B. S., & Maddusa, S. S. (2022). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Logam Berat Cadmium (Cd) pada Masyarakat Sekitar Sungai yang Mengonsumsi Ikan Nilem (*Osteochillus Vittatus*) dari Sungai Desa Bakan Kecamatan Lolayan Kabupaten Bolaang Mongondow. *KESMAS: Jurnal Kesehatan Masyarakat Universitas Sam Ratulangi*, 11(2). <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/kesmas/article/view/39234>
- Hadiyanto, H., Hasim, H., & Juliana, J. (2022). Mercury, Lead, and Cadmium Heavy Metal Content in Water, Fish, and Sediment in Limboto Lake. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.46252/jsai-fpik-unipa.2022.Vol.6.No.1.195>
- Hamdan, D. D., Mohd Azman, A. S., Musa, F., & Sabullah, M. K. (2020). Distribution of Selected Heavy Metals Bioaccumulation in Various Parts of Indigenous Rice (Bokilong, Ponsulak and Taragang) in North Borneo. *Borneo Journal of Resource Science and Technology*, 10(1), 61–69. <https://doi.org/10.33736/bjrst.2317.2020>
- Handayani, C. O., Sukarjo, S., Dewi, T., & Zu'amah, H. (2022). Logam Berat dan Probabilistik Penilaian Risiko Kesehatan Melalui Konsumsi Beras dari Lahan Sawah di Hulu Sungai Citarum. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 21(2), 225–234. <https://doi.org/10.14710/jkli.21.2.225-234>
- Jaya, F., & Prasetya, A. T. (2025). Validation of the Analytical Method for Cadmium (Cd) in Rice (*Oryza sativa*) using the SNI 6989-84:2019. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 14(2). <https://doi.org/10.15294/ijcs.v14i2.20607>
- Li, C., Wang, H., Yang, Y., Liu, H., Fang, X., Zhang, Y., & Lv, J. (2024). Inhibition of Microbially Mediated Total Organic Carbon Decomposition in Different Types of Cadmium Contaminated Soils with Wheat Straw Addition. *Scientific Reports*, 14(1), 15114. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64267-2>
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2025). Luas Sawah Pada Fase Pertanaman Padi, Data Satelit Landsat 8 Edisi 221 Periode 28 Juli - 12 Agustus 2025.
- Meriem, S. (2023). Mitigasi Cekaman Kadmium (Cd) pada Tanaman Padi (*Oryza sativa* L.): Pendekatan Fisiologi dan Molekuler. *Berita Biologi Jurnal Ilmu-Ilmu Hayati*, 20(1), 61–75. <https://doi.org/10.14203/beritabiologi.v20i1.3991>
- Noor, S. Y. (2020). Konsentrasi Logam Berat Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada Air, Sedimen dan Ikan Nila (*Oreochromis niloticus* Linn.) di Danau Limboto. *Seminar Nasional Peningkatan Mutu Pendidikan*, 1(1). <https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/2001677>
- Nungula, E. Z., Raza, M. A., Nasar, J., Maitra, S., Seleiman, M. F., Ranjan, S., Padhan, S. R., Sow, S., Gaikwad, D. J., & Gitari, H. H. (2024). Cadmium in Soil and Plants: A Review. In A. K. Jha & N. Kumar (Eds), *Cadmium Toxicity in Water: Challenges and Solutions* (pp. 21–43). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54005-9_2
- Pahira, S. H., & Rinaldy, R. (2026). Heavy Metal Accumulation in Rice Paddy Soils and Grains Irrigated with Polluted River Water in Indonesia. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, 72, 57–64. <https://doi.org/10.60923/issn.2281-4485/22603>
- Perera, A. J. D., Li, L., Carey, M., Moreno-Jiménez, E., Flagmeier, M., Marwa, E., De Silva, P. M. C. S., Nguyen, M. N., Meharg, A. A., & Meharg, C. (2024). Trans-Global Biogeochemistry of Soil to Grain Transport of Arsenic and Cadmium. *Exposure and Health*, 16(4), 925–942. <https://doi.org/10.1007/s12403-023-00600-w>
- Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021. Retrieved 28 May 2026, from <http://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>
- Pratiwiningsih, R. E., Ramadhan, M. F., & Sari, W. Y. (2022). Uji Kandungan Logam Berat Kadmium (Cd) pada Beras di Daerah Maos dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). *Serulingmas Health Jurnal (SHJ)*, 2(1). <https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/3373137>
- Rahim, T. R., Hasim, H., & Juliana, J. (2020). Aquatic Quality Parameter at Lake Limboto. *Jurnal Pascasarjana*, 5(1), 93–98.
- Rahman, A., Haeruddin, H., & Ghofar, A. (2022). Konsentrasi Karbon Organik dan Logam Berat (Cu, Fe, Mn, Pb) Sedimen di Sungai Garang dan Banjir Kanal Barat, Semarang. *JFMR-Journal of Fisheries and Marine Research*, 6(3), 14–19. <https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2022.006.03.3>
- Redu, I., Mutiara, C., & Hutubessy, J. (2020). Analisis Ketersediaan Kadmium di Tanah dan Beras yang Terdapat di Desa Detusoko Barat. *AGRICA: Journal of Sustainable Dryland Agriculture*, 13(2), 117–124.
- Shobowale, K. O., Suleiman, A., Badmus, K. O., Aliu, T. B., Bello, U. S., & Abdulkabir, A. O. (2025). The Persistent Threat of Cadmium: From Environmental Exposure to Multi-Organ Toxicity and

- Carcinogenesis. *AROC in Pharmaceutical and Biotechnology*, 05(02), 01–18. <https://doi.org/10.53858/bnas05010118>
- Wakhle, B., Sharma, S., Patel, K. S., Pandey, P. K., Blažević, A., Fiket, Ž., Yurdakul, S., Varol, S., Martín-Ramos, P., Al-Yousef, H. M., & Mothana, R. A. (2025). Multi-Element Exposure and Health Risks of Grains from Ambagarh Chowki, Chhattisgarh, India. *Toxics*, 13(1), 56. <https://doi.org/10.3390/toxics13010056>
- Wamaulana, F., Hasyimuddin, H., & Fakhruddin, A. (2022). Analisis Logam Berat Kadmium (Cd) pada Sampel Pangan Segar Asal Tumbuhan (PSAT) di BBKP Makassar. *Filogeni: Jurnal Mahasiswa Biologi*, 2(2), 53–58. <https://doi.org/10.24252/filogeni.v2i2.29379>
- Wangge, E., Sito, E., & Mutiara, C. (2021). Uji Kadar Cemaran Logam Berat Kadmium dari dalam Tanah Sawah dan Beras (*Oryza sativa* L.) Di Kelurahan Lape Kecamatan Aesesa Kabupaten Nagekeo. *AGRICA*, 14(2), 152–157. <https://doi.org/10.37478/agr.v14i2.1482>
- Zhang, Q., Dou, W., Wang, Z., Xu, X., & Jiang, T. (2025). Safety Risk Assessment and Classification of Cadmium in Grain Processing Products. *Foods*, 14(11), 1882. <https://doi.org/10.3390/foods14111882>
- Zou, C., Shi, Z., Yang, Y., Zhang, J., Hou, Y., & Zhang, N. (2023). The Characteristics, Enrichment, and Migration Mechanism of Cadmium in Phosphate Rock and Phosphogypsum of the Qingping Phosphate Deposit, Southwest China. *Minerals*, 13(1), 107. <https://doi.org/10.3390/min13010107>
- Zulfiqar, U., Haider, F. U., Maqsood, M. F., Mohy-Ud-Din, W., Shabaan, M., Ahmad, M., Kaleem, M., Ishfaq, M., Aslam, Z., & Shahzad, B. (2023). Recent Advances in Microbial-Assisted Remediation of Cadmium-Contaminated Soil. *Plants*, 12(17), 3147. <https://doi.org/10.3390/plants12173147>
- Zulfiqar, U., Jiang, W., Xiukang, W., Hussain, S., Ahmad, M., Maqsood, M. F., Ali, N., Ishfaq, M., Kaleem, M., Haider, F. U., Farooq, N., Naveed, M., Kucerik, J., Brtnicky, M., & Mustafa, A. (2022). Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.773815>