TEKNOSAINS
MEDIA INFORMASI DAN TEKNOLOGI
Journal homepage: https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/teknosains/

Analisis keamanan konsumsi sawi hijau (*Brassica juncea* L.) terhadap kontaminasi Pb dan Cd berdasarkan variasi waktu panen

Sitty Nurqomariah Rivai[1*], Sitti Rahmah Sari[1]
[1]Program Studi D4 Teknologi Laboratorium Medis
Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Gorontalo
Jl. Prof. Dr. H. Mansoer Pateda, Gorontalo, Gorontalo, Indonesia. 96181
*E-mail: sittiqr@umgo.ac.id

Abstrak: Pencemaran tanah oleh logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) berpotensi menurunkan keamanan pangan melalui akumulasi logam pada sayuran. Penelitian ini bertujuan menganalisis keamanan konsumsi sawi hijau (*Brassica juncea* L.) yang ditanam pada tanah terkontaminasi Pb dan Cd berdasarkan variasi waktu panen. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok satu faktor dengan empat waktu panen (10, 15, 20, dan 25 hari setelah tanam), masing-masing dua ulangan. Tanah dikontaminasi menggunakan $Pb(NO_3)_2$ dan $CdSO_4$ berkonsentrasi 100 ppm, kemudian kadar Pb dan Cd pada akar dan tajuk dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Parameter yang diamati meliputi konsentrasi logam, *Bioconcentration Factor* (BCF), *Translocation Factor* (TF), dan dianalisis menggunakan One-Way ANOVA pada taraf signifikansi 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akumulasi Pb dan Cd meningkat seiring bertambahnya waktu panen, dengan konsentrasi tertinggi diperoleh pada hari ke-25, sedangkan konsentrasi terendah pada hari ke-10. Seluruh nilai BCF dan TF kurang dari 1, menunjukkan bahwa *B. juncea* berperan sebagai tanaman ekskluder melalui mekanisme fitostabilisasi. Hasil uji One-Way ANOVA menunjukkan bahwa variasi waktu panen tidak berpengaruh signifikan terhadap akumulasi Pb maupun Cd pada akar dan tajuk (seluruh $p > 0,05$). Berdasarkan batas maksimum cemaran logam berat menurut Peraturan BPOM RI Nomor 9 Tahun 2022, kadar Pb pada seluruh waktu panen masih berada di bawah ambang batas, sedangkan kadar Cd melebihi batas maksimum pada panen hari ke-25. Dengan demikian, pada kondisi penelitian ini sawi hijau masih aman dikonsumsi hingga 20 hari setelah tanam, meskipun secara deskriptif akumulasi logam meningkat seiring bertambahnya waktu panen.

Kata Kunci: akumulator, kadmium, logam berat, sawi hijau, timbal

Abstract: Soil contamination by heavy metals such as lead (Pb) and cadmium (Cd) is a serious environmental problem because these metals can enter the food chain and pose a threat to human health. This study aims to assess the safety of consuming green mustard (*Brassica juncea* L.) contaminated with Pb and Cd based on variations in harvest time. The study was conducted by contaminating the soil with $Pb(NO_3)_2$ and $CdSO_4$ at a concentration of 100 ppm, then harvesting the plants on days 10, 15, 20, and 25 after planting. The levels of Pb and Cd in the roots and shoots were analyzed using atomic absorption spectrophotometry. The results showed that Pb and Cd accumulation increased with longer harvest intervals, with higher concentrations in the roots compared to the shoots. The Bioconcentration Factor (BCF) and Translocation Factor (TF) values were generally less than 1, indicating that the plants act as excluders through phytostabilization mechanisms. From a food safety perspective, Pb levels in all treatments remained below the maximum permissible limit, while Cd levels exceeded the threshold at the 25-day harvest time. Thus, green mustard remains safe for consumption up to a 20-day harvest age under the contamination conditions studied. These findings underscore the importance of timing the harvest to minimize the risk of heavy metal exposure in vegetables grown on contaminated land.

Keywords: batteries, cadmium, heavy metals, green mustard, lead

Cara Sitasi:
Rivai, S. N., Sari, S. R. (2026). Analisis keamanan konsumsi sawi hijau (*Brassica juncea* L.) terhadap kontaminasi Pb dan Cd berdasarkan variasi waktu panen. *Teknosains: Media Informasi Sains dan Teknologi*, 20(2), 201-211. https://doi.org/10.24252/teknosains.v20i2.67049

Diajukan 15 April 2026; Ditinjau 11 Mei 2026; Diterima 1 Agustus 2026; Diterbitkan 10 Agustus 2026
Copyright © 2026. The authors. This is an open access article under the CC BY-SA license

PENDAHULUAN

Pencemaran tanah oleh logam berat telah menjadi masalah lingkungan yang serius dalam Pencemaran tanah oleh logam berat telah menjadi masalah lingkungan yang serius dalam beberapa dekade terakhir (Donald & Raphael, 2022). Peningkatan konsentrasi logam berat di lingkungan tidak hanya menurunkan kualitas tanah dan fungsi ekosistem, tetapi juga berpotensi masuk ke rantai pangan dan membahayakan kesehatan manusia (Shakoor et al., 2017). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa keberadaan logam berat pada lahan pertanian berkaitan dengan aktivitas antropogenik, seperti kegiatan industri, pertambangan, penggunaan pupuk dan pestisida secara intensif, serta pemanfaatan air irigasi yang terkontaminasi. Akumulasi logam berat di dalam tanah kemudian dapat diserap oleh tanaman pangan sehingga memengaruhi kualitas hasil pertanian dan meningkatkan risiko paparan logam berat bagi manusia (Mahfudiawati, & Turnip, 2016; Junyo & Handayanto, 2017). Alegbe et al. (2025), melaporkan bahwa sayuran yang dibudidayakan menggunakan air irigasi yang berasal dari kolam maupun limbah domestik berpotensi mengakumulasi logam berat akibat kontaminasi tanah dan air irigasi, sehingga meningkatkan risiko paparan logam berat melalui konsumsi sayuran. Oleh karena itu, akumulasi logam berat pada tanaman pangan menjadi perhatian penting karena berhubungan langsung dengan keamanan pangan dan kesehatan masyarakat (Fitriyah et al., 2025).

Sawi hijau (*Brassica juncea* L.) merupakan salah satu sayuran daun yang banyak dikonsumsi masyarakat karena memiliki kandungan vitamin, mineral, dan serat yang tinggi, masa panen yang relatif singkat, serta nilai ekonomi yang baik sehingga banyak dibudidayakan sebagai komoditas hortikultura (Alegbe et al., 2025; Roychowdhury et al., 2017). Komoditas petsai/sawi termasuk salah satu dari 18 komoditas strategis hortikultura nasional dengan produksi yang terus dipantau melalui publikasi Statistik Hortikultura Badan Pusat Statistik (Badan Pusat Statistik, 2025). Tingginya tingkat konsumsi sawi hijau menyebabkan aspek keamanan produk menjadi sangat penting, terutama apabila tanaman dibudidayakan pada lahan yang berpotensi mengandung logam berat. Logam berat seperti Pb dan Cd dapat diserap melalui sistem perakaran, kemudian diakumulasikan pada jaringan tanaman melalui proses translokasi sehingga berpotensi meningkatkan risiko paparan bagi konsumen apabila kadarnya melebihi batas yang diperbolehkan (Shakoor et al., 2017; Mohamed et al., 2025; Alegbe et al., 2025).

Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia Nomor 9 Tahun 2022 menetapkan batas maksimum cemaran timbal (Pb) dan kadmium (Cd) pada sayuran masing-masing sebesar 0,20 ppm dan 0,05 ppm (BPOM RI, 2022). Selain itu, Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 menetapkan baku mutu tanah untuk Pb sebesar 1 ppm dan Cd sebesar 0,3 ppm (Kemenkes RI, 2023). Batasan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan logam berat perlu dievaluasi tidak hanya dari aspek kualitas lingkungan, tetapi juga dari aspek keamanan konsumsi produk pertanian.

Akumulasi logam berat di dalam tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah lamanya paparan logam di dalam media tanam. Semakin lama tanaman tumbuh pada tanah yang mengandung Pb dan Cd, semakin besar peluang ion logam diserap oleh sistem perakaran dan terakumulasi di dalam jaringan tanaman. Setelah memasuki akar, dinding sel berperan sebagai penghalang pertama yang membatasi masuknya ion logam ke dalam sitoplasma. Gugus karboksil, hidroksil, pektin, selulosa, dan lignin pada dinding sel mampu mengikat ion logam melalui mekanisme pertukaran ion dan kelasi sehingga sebagian logam diimobilisasi pada akar, sedangkan sebagian

lainnya ditranslokasikan menuju tajuk melalui jaringan xilem (Cheng et al., 2025). Selain itu, logam yang berhasil memasuki sel dapat disekuestrasi ke dalam vakuola sebagai mekanisme detoksifikasi untuk mengurangi toksisitas terhadap sel tanaman. Pada tanaman famili Brassicaceae, peningkatan kandungan lignin, selulosa, dan modifikasi pektin pada dinding sel akar dilaporkan meningkatkan retensi Cd di akar sehingga menurunkan faktor translokasi menuju tajuk (Liao et al., 2025). Oleh karena itu, lamanya waktu panen diperkirakan memengaruhi tingkat akumulasi Pb dan Cd pada jaringan tanaman yang dikonsumsi.

Brassica juncea diketahui mampu tumbuh pada media yang mengandung logam berat dan memiliki kemampuan mengakumulasi Pb dan Cd pada jaringan tanaman. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa akumulasi logam pada tanaman ini umumnya lebih tinggi pada akar dibandingkan tajuk dengan nilai *Translocation Factor* (TF) yang umumnya kurang dari satu, menunjukkan bahwa translokasi logam menuju tajuk berlangsung secara terbatas (Roychowdhury et al., 2017; Nurlaili et al., 2020). Dominasi akumulasi pada akar terjadi karena ion logam berinteraksi dengan gugus karboksil dan hidroksil pada dinding sel akar melalui mekanisme adsorpsi dan pertukaran ion sehingga sebagian besar logam tertahan pada jaringan akar (Mohamed et al., 2025). Karakteristik tersebut menjadikan *Brassica juncea* sering digunakan sebagai tanaman model dalam penelitian akumulasi logam berat maupun pada penelitian fitoremediasi (Bakshe & Jugade, 2023). Dalam fitoremediasi dikenal mekanisme fitoekstraksi dan fitostabilisasi (Sarwar et al., 2017; Yanitch et al., 2020). Meskipun demikian, dalam penelitian ini pembahasan difokuskan pada pola akumulasi logam yang berkaitan dengan keamanan konsumsi tanaman.

Kemampuan tanaman dalam menyerap logam dari media tanam umumnya dievaluasi menggunakan *Bioconcentration Factor* (BCF), sedangkan distribusi logam dari akar menuju tajuk dinilai menggunakan *Translocation Factor* (TF). Nilai BCF menggambarkan efisiensi akumulasi logam dari tanah ke jaringan tanaman, sedangkan TF menunjukkan kemampuan logam berpindah menuju bagian tanaman yang dikonsumsi. Kedua parameter tersebut penting digunakan untuk menjelaskan mekanisme akumulasi logam sekaligus mengevaluasi tingkat keamanan konsumsi sawi hijau yang dipanen pada waktu berbeda.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji kemampuan Brassica juncea dalam mengakumulasi logam berat. Shakoor et al. (2017), meneliti penyerapan kadmium oleh tanaman ini, Gurajala et al. (2019), membandingkan kemampuan akumulasi beberapa genotipe *Brassica juncea*, sedangkan Fitriyah et al. (2025) menganalisis kadar Pb dan Cd pada sawi hijau yang dipanen pada umur tertentu. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih menitikberatkan pada kemampuan akumulasi logam atau potensi tanaman sebagai fitoremediator. Kajian yang secara khusus menghubungkan variasi waktu panen dengan pola akumulasi Pb dan Cd serta implikasinya terhadap keamanan konsumsi berdasarkan parameter BCF dan TF masih terbatas.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis keamanan konsumsi sawi hijau (*Brassica juncea* L.) yang ditanam pada media terkontaminasi Pb dan Cd berdasarkan variasi waktu panen, serta mengevaluasi pola akumulasi logam menggunakan parameter *Bioconcentration Factor* (BCF) dan *Translocation Factor* (TF). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam menentukan waktu panen yang lebih aman untuk meminimalkan risiko paparan Pb dan Cd melalui konsumsi sayuran.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di kebun rumah atau lahan demonstrasi, Laboratorium Kimia Universitas Negeri Gorontalo, dan UPTD Balai Laboratorium Kesehatan Daerah Provinsi Gorontalo selama satu bulan. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan satu faktor, yaitu variasi waktu panen yang terdiri atas empat taraf, yaitu hari ke-10, ke-15, ke-20, dan ke-25 setelah transplanting. Percobaan dilakukan secara terpisah untuk logam timbal (Pb) dan kadmium (Cd), masing-masing dengan dua ulangan, serta dilengkapi dua ulangan kontrol tanpa penambahan logam untuk setiap jenis logam. Dengan demikian, total satuan percobaan yang digunakan adalah 20 polybag, masing-masing ditanami satu tanaman sawi hijau (*Brassica juncea* L.).

Media tanam berupa campuran tanah dan kompos (kotoran hewan). Sebelum perlakuan, tanah dianalisis untuk menentukan kadar awal logam berat, kemudian ditimbang sebanyak 5 kg dan dimasukkan ke dalam masing-masing polybag. Bibit sawi hijau diperoleh dari toko pertanian dan disemai pada media tanah selama dua minggu hingga memiliki sistem perakaran yang cukup kuat untuk dipindahkan ke media perlakuan. Selama masa pembibitan, tanaman disiram sekali sehari pada sore hari.

Kontaminasi media tanam dilakukan menggunakan larutan Pb dan Cd secara terpisah dengan konsentrasi 100 ppm. Larutan Pb dibuat dengan melarutkan 0,1 g $Pb(NO_3)_2$, sedangkan larutan Cd dibuat dengan melarutkan 0,1 g $CdSO_4$ ke dalam akuades, kemudian masing-masing diencerkan hingga volume 1.000 mL menggunakan labu ukur. Sebanyak 500 mL larutan logam ditambahkan ke setiap polybag yang berisi 5 kg media tanam. Polybag tanpa penambahan logam digunakan sebagai kelompok kontrol.

Bibit berumur dua minggu dipindahkan ke polybag yang telah disiapkan dan diaklimatisasi selama tujuh hari untuk memungkinkan penyesuaian fisiologis terhadap media tanam. Selama masa penelitian, tanaman disiram setiap hari untuk menjaga kelembapan media. Tanaman dipanen pada hari ke-10, ke-15, ke-20, dan ke-25 setelah transplanting. Pada setiap waktu panen, seluruh bagian tanaman dicabut secara hati-hati, dicuci menggunakan akuades untuk menghilangkan sisa tanah yang menempel, kemudian dipisahkan menjadi bagian akar dan tajuk. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi Pb dan Cd pada akar dan tajuk, nilai *Bioconcentration Factor* (BCF), serta *Translocation Factor* (TF).

Sampel akar dan tajuk masing-masing ditimbang sebanyak 1 g, kemudian didigesti menggunakan 10 mL HNO_3 65% dengan *microwave digester* pada suhu 180°C selama 25 menit. Setelah didinginkan, hasil digesti disaring menggunakan kertas saring ke dalam labu ukur 50 mL, kemudian diencerkan hingga tanda batas menggunakan akuades. Konsentrasi Pb dan Cd selanjutnya dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) pada panjang gelombang 283,3 nm untuk Pb (SNI 06-6989.45-2005) dan 228,8 nm untuk Cd (SNI 06-6989.16-2004).

Potensi akumulasi logam pada tanaman dievaluasi menggunakan *Bioconcentration Factor* (BCF) dan *Translocation Factor* (TF) yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{BCF} = \frac{\text{Rata–rata konsentrasi logam berat pada akar dan tajuk}}{\text{Konsentrasi logam berat pada tanah}}$$

Keterangan:
BCF = *Bioconcentration Factor*;
Rata-rata konsentrasi logam berat pada akar dan tajuk = rata-rata kadar Pb atau Cd pada jaringan tanaman (mg/kg);
Konsentrasi logam berat pada tanah = kadar Pb atau Cd pada tanah (mg/kg).

Sedangkan *Translocation Factor* (TF) dihitung menggunakan persamaan:

$$TF=\frac{\text{Konsentrasi logam berat pada tajuk}}{\text{Konsentrasi logam berat pada akar}}$$

Keterangan:
TF = *Translocation Factor*;
Konsentrasi logam berat pada tajuk = kadar Pb atau Cd pada bagian tajuk (mg/kg);
Konsentrasi logam berat pada akar = kadar Pb atau Cd pada bagian akar (mg/kg).

Data dianalisis menggunakan *One-Way Analysis of Variance* (ANOVA) sesuai dengan Rancangan Acak Kelompok (RAK) menggunakan perangkat lunak IBM SPSS Statistics pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) untuk mengetahui pengaruh variasi waktu panen terhadap akumulasi Pb dan Cd, serta nilai BCF dan TF.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis awal tanah yang digunakan sebagai media tanam telah mengandung Pb sebesar 0,02 ppm dan Cd sebesar 0,007 ppm (Tabel 1). Nilai tersebut masih berada pada kisaran normal sehingga menunjukkan bahwa media tanam belum mengalami pencemaran logam berat yang tinggi. Keberadaan logam pada tanah diduga berasal dari sumber antropogenik, seperti penggunaan pupuk, deposisi atmosfer, limbah domestik, maupun aktivitas industri di sekitar lingkungan pertanian. Oleh karena itu, analisis kadar awal logam penting dilakukan untuk memastikan bahwa peningkatan konsentrasi logam pada tanaman selama penelitian terutama dipengaruhi oleh perlakuan kontaminasi buatan.

Tabel 1. Konsentrasi logam berat dasar dalam tanah

Parameter	Nilai (ppm)	Kriteria
Kadar Pb awal dalam tanah	0,02	Kisaran normal
Kadar Cd tanah awal	0,007	Kisaran normal

Analisis Konsentrasi Timbal dan Kadmium dalam Sawi Hijau

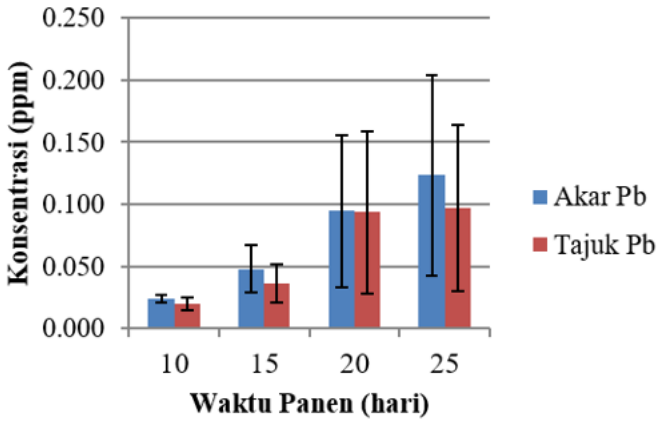
Berdasarkan hasil penelitian, konsentrasi Pb dan Cd dalam jaringan sawi hijau pada perlakuan logam cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu panen (Tabel 2 dan Tabel 3; Gambar 1 dan Gambar 2). Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa lamanya paparan tanaman terhadap logam berat dalam media tanam memengaruhi jumlah logam yang terakumulasi di dalam jaringan. Selama fase pertumbuhan, ion Pb dan Cd diserap melalui sistem perakaran dan ditranslokasikan ke bagian atas tanaman melalui pembuluh xilem. Oleh karena itu, semakin lama tanaman berada pada media yang terkontaminasi, semakin besar peluang terjadinya akumulasi logam akibat proses penyerapan yang berlangsung secara kontinu (Balagopal *et al*., 2025; Bhat *et al*., 2025).

Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3, tanaman pada perlakuan kontrol juga menunjukkan sedikit peningkatan konsentrasi Pb dan Cd selama periode pengamatan. Peningkatan ini diduga disebabkan oleh keberadaan logam latar belakang dalam media tanam (Tabel 1), sehingga tanaman tetap menyerap sejumlah kecil logam meskipun tanpa penambahan kontaminan buatan. Namun demikian, peningkatan konsentrasi logam pada perlakuan kontrol jauh lebih rendah dibandingkan perlakuan yang diberi kontaminasi Pb dan Cd sebesar 100 ppm, sehingga menunjukkan bahwa akumulasi logam pada tanaman uji terutama dipengaruhi oleh perlakuan kontaminasi yang diberikan.

Tabel 2. Konsentrasi timbal (Pb) pada akar dan tajuk sawi hijau pada berbagai waktu panen

Waktu panen	Kontrol akar (ppm)	Akar (ppm) Mean ± SD	Kontrol tajuk (ppm)	Tajuk (ppm) Mean ± SD
Hari ke-10	0,020	0.025 ± 0.001	0.014	0.023 ± 0.001
Hari ke-15	0,026	0.059 ± 0.003	0.019	0.045 ± 0.004
Hari ke-20	0,029	0.127 ± 0.034	0.023	0.129 ± 0.035
Hari ke-25	0,030	0.170 ± 0.003	0.029	0.131 ± 0.046

Keterangan: Nilai merupakan rerata ± standar deviasi (n = 2)

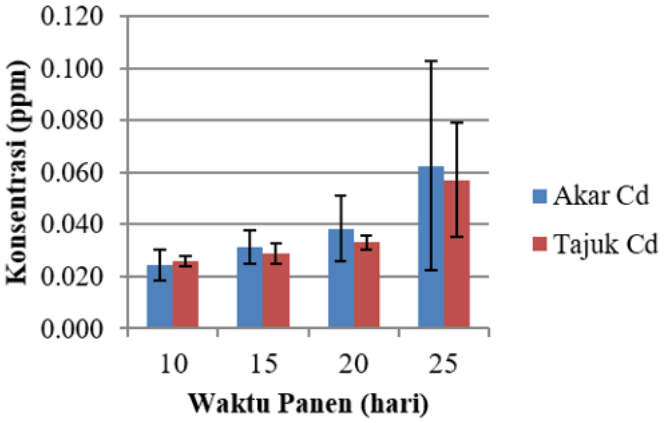


Gambar 1. Konsentrasi timbal (Pb) dalam sawi hijau pada waktu panen yang berbeda

Tabel 3. Konsentrasi kadmium (Cd) pada akar dan tajuk sawi hijau pada berbagai waktu panen

Waktu panen	Kontrol akar (ppm)	Akar (ppm) Mean ± SD	Kontrol tajuk (ppm)	Tajuk (ppm) Mean ± SD
Hari ke-10	0.019	0.027 ± 0.006	0.024	0.027 ± 0.002
Hari ke-15	0.024	0.035 ± 0.001	0.025	0.031 ± 0.004
Hari ke-20	0.026	0.045 ± 0.009	0.030	0.035 ± 0.001
Hari ke-25	0.029	0.079 ± 0.040	0.033	0.069 ± 0.010

Keterangan: Nilai merupakan rerata ± standar deviasi (n = 2)



Gambar 2. Konsentrasi kadmium (Cd) dalam sawi hijau pada waktu panen yang berbeda

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2, akumulasi Pb dan Cd secara konsisten lebih tinggi pada akar dibandingkan tajuk di seluruh waktu panen. Hasil ini menunjukkan bahwa akar merupakan organ utama yang berperan dalam penyerapan sekaligus akumulasi logam berat. Sebagai organ yang pertama kali berinteraksi dengan tanah, akar memiliki dinding sel yang tersusun atas pektin, selulosa, dan lignin yang mengandung gugus karboksil serta hidroksil, sehingga mampu mengikat ion logam melalui mekanisme

pertukaran ion dan kelasi. Selain itu, sebagian ion logam disekuestrasi ke dalam vakuola sebagai mekanisme adaptasi fisiologis tanaman terhadap cekaman logam berat. Dinding sel akar juga berfungsi sebagai penghalang awal (*barrier*) yang membatasi masuknya ion logam ke dalam simplas, sehingga sebagian besar Pb dan Cd tetap tertahan pada jaringan akar dan hanya sebagian yang ditranslokasikan ke tajuk (Liao et al., 2024; Cheng et al., 2025).

Pola distribusi tersebut sejalan dengan karakteristik fisiologi kedua logam. Timbal (Pb) memiliki mobilitas yang relatif rendah di dalam tanaman sehingga cenderung tertahan pada sistem perakaran. Sebaliknya, kadmium (Cd) memiliki mobilitas yang lebih tinggi sehingga sebagian ion dapat ditranslokasikan menuju tajuk. Namun, pada penelitian ini akumulasi Cd tetap lebih tinggi pada akar dibandingkan tajuk, yang menunjukkan bahwa mekanisme retensi logam pada akar masih lebih dominan daripada proses translokasi. Temuan ini konsisten dengan penelitian Gurajala et al. (2019), yang melaporkan bahwa *Brassica juncea* cenderung mengakumulasi Pb dan Cd pada jaringan akar. Demikian pula, Ratnawati & Fatmasari (2018) menyatakan bahwa akar merupakan titik masuk utama logam berat dari tanah sehingga konsentrasi logam pada akar umumnya lebih tinggi dibandingkan tajuk.

Konsentrasi Cd tertinggi diperoleh pada panen hari ke-25 (Tabel 3). Hasil ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu panen, semakin lama pula durasi paparan tanaman terhadap Cd sehingga akumulasi logam berlangsung secara bertahap hingga mencapai konsentrasi tertinggi pada akhir periode pengamatan. Selain karena lamanya waktu paparan, peningkatan akumulasi Cd juga berkaitan dengan sifat Cd yang lebih mudah bergerak di dalam jaringan tanaman dibandingkan Pb, sehingga proses penyerapan dan translokasinya tetap berlangsung selama fase pertumbuhan hingga waktu panen terakhir.

Implikasi terhadap Keamanan Konsumsi

Berdasarkan hasil penelitian, konsentrasi Pb pada sawi hijau yang dipanen pada umur 10, 15, 20, dan 25 hari berada di bawah batas maksimum yang diizinkan yang ditetapkan oleh Badan Pengawas Obat dan Makanan Indonesia (BPOM RI, 2022), yang menetapkan batas maksimum Pb sebesar 0.20 ppm untuk sayuran. Sebaliknya, konsentrasi Cd pada sawi hijau yang dipanen pada umur 25 hari melebihi batas maksimum yang diizinkan sebesar 0.05 ppm sebagaimana diatur dalam Peraturan BPOM RI No. 9 Tahun 2022. Melebihi ambang batas ini menunjukkan bahwa sayuran tersebut tidak lagi aman untuk dikonsumsi karena potensi risiko kesehatan yang terkait dengan peningkatan paparan kadmium.

Secara keseluruhan, berdasarkan hasil penelitian sawi hijau mampu menyerap Pb dan Cd dengan tingkat akumulasi yang relatif rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa sawi hijau masih memenuhi batas keamanan konsumsi, khususnya hingga umur panen 20 hari setelah tanam, ketika konsentrasi Pb dan Cd tetap di bawah batas peraturan. Meskipun kadar Pb pada seluruh waktu panen masih berada di bawah ambang batas BPOM, peningkatan kadar Cd hingga melebihi batas maksimum pada panen hari ke-25 memperlihatkan adanya potensi risiko kesehatan apabila tanaman dipanen terlalu lama pada lahan yang tercemar. Akumulasi Cd pada tanaman pangan menjadi perhatian karena logam ini bersifat nondegradabel, mudah terakumulasi dalam rantai makanan, dan paparan kronisnya dapat menyebabkan gangguan fungsi ginjal, kerusakan tulang, serta berbagai efek toksik pada manusia (Balagopal et al., 2025). Oleh karena itu, waktu panen merupakan faktor penting yang perlu diperhatikan untuk menjamin keamanan konsumsi

sawi hijau yang dibudidayakan pada lahan terkontaminasi logam berat, terutama untuk mencegah akumulasi Cd yang melebihi ambang batas keamanan pangan.

Faktor Biokonsentrasi (BCF)

Faktor biokonsentrasi (BCF) didefinisikan sebagai rasio antara konsentrasi logam berat yang terakumulasi dalam jaringan tanaman (akar dan tajuk) dan konsentrasi logam yang ada di dalam tanah sebagai media tanam. Oleh karena itu, BCF merupakan parameter kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan tanaman dalam mengakumulasi logam berat dari tanah yang terkontaminasi (Sharma et al., 2023).

Nilai BCF yang diperoleh pada penelitian ini secara konsisten kurang dari 1 untuk Pb maupun Cd (Tabel 4 dan Tabel 5), menunjukkan bahwa kemampuan akumulasi logam oleh sawi hijau tergolong rendah. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa efisiensi perpindahan logam dari tanah menuju jaringan tanaman relatif kecil karena sebagian besar ion logam masih tertahan di media tanam maupun pada jaringan akar melalui mekanisme pengikatan dinding sel dan sekuestrasi vakuola (Balagopal et al., 2025; Cheng et al., 2025). Akibatnya, hanya sebagian kecil logam yang dapat terakumulasi dalam jaringan tanaman.

Tabel 4. Nilai faktor biokonsentrasi (BCF) untuk Pb dalam sawi hijau

Waktu Panen	Konsentrasi Logam (X, ppm)	Konsentrasi Tanah (Y, ppm)	BCF
Hari ke-10	0.024	100.02	$2{,}3 \times 10^{-4}$
Hari ke-15	0.052	100.02	$5{,}2 \times 10^{-4}$
Hari ke-20	0.128	100.02	$1{,}3 \times 10^{-3}$
Hari ke-25	0.150	100.02	$1{,}5 \times 10^{-3}$

Tabel 5. Nilai faktor biokonsentrasi (BCF) untuk Cd dalam sawi hijau

Waktu Panen	Konsentrasi Logam (X, ppm)	Konsentrasi Tanah (Y, ppm)	BCF
Hari ke-10	0.027	100.007	$2{,}7 \times 10^{-4}$
Hari ke-15	0.033	100.007	$3{,}3 \times 10^{-4}$
Hari ke-20	0.040	100.007	$4{,}0 \times 10^{-4}$
Hari ke-25	0.074	100.007	$7{,}4 \times 10^{-4}$

Hasil ini sejalan dengan Gurajala et al. (2019) yang melaporkan bahwa sawi hijau memiliki kemampuan akumulasi Pb dan Cd yang terbatas dan cenderung mempertahankan logam pada sistem perakaran dibandingkan mentranslokasikannya ke bagian tajuk.

Faktor Translokasi (TF)

Faktor translokasi (TF) didefinisikan sebagai rasio konsentrasi logam berat di tajuk terhadap konsentrasi logam berat di akar. Parameter ini mencerminkan kemampuan logam untuk diangkut dari akar ke bagian tanaman di atas tanah dan umumnya digunakan untuk menentukan apakah suatu tanaman menunjukkan karakteristik fitoremediasi atau fitostabilisasi (Sharma et al., 2023).

Nilai TF yang diperoleh (Tabel 6 dan Tabel 7) sebagian besar berada pada atau di bawah 1, meskipun pada beberapa perlakuan nilainya mendekati atau sedikit melebihi 1. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa translokasi Pb dan Cd dari akar menuju tajuk berlangsung secara terbatas. Nilai TF yang mendekati satu mengindikasikan bahwa sebagian logam yang diserap oleh akar telah mulai ditranslokasikan ke tajuk melalui

jaringan xilem seiring meningkatnya waktu paparan. Namun, sebagian besar ion logam tetap tertahan pada akar akibat mekanisme pengikatan oleh komponen dinding sel, seperti pektin, selulosa, dan lignin, serta sekuestrasi ke dalam vakuola yang berfungsi mengurangi toksisitas logam terhadap sel tanaman (Cheng et al., 2025; Balagopal et al., 2025). Mekanisme retensi tersebut membatasi perpindahan logam ke bagian atas tanaman sehingga nilai TF secara umum tetap berada pada atau di bawah 1. Dengan demikian, sawi hijau pada penelitian ini menunjukkan kecenderungan mekanisme fitostabilisasi yang lebih dominan dibandingkan fitoekstraksi (Bhat et al., 2025).

Temuan ini sejalan dengan hasil distribusi logam pada Gambar 1 dan Gambar 2 yang menunjukkan bahwa konsentrasi Pb dan Cd secara konsisten lebih tinggi pada akar dibandingkan tajuk, sehingga memperkuat indikasi bahwa mekanisme retensi logam di akar lebih dominan daripada proses translokasinya ke bagian atas tanaman.

Tabel 6. Nilai faktor translokasi (TF) Pb dalam sawi hijau

Waktu Panen	Konsentrasi Logam		Nilai TF
	Kandungan Pb dalam tajuk (ppm)	Kandungan Pb dalam akar (ppm)	
Hari ke-10	0.023	0.025	0.92
Hari ke-15	0.045	0.059	0.76
Hari ke-20	0.129	0.127	1.02
Hari ke-25	0.131	0.170	0.77

Tabel 7. Nilai faktor translokasi (TF) Cd dalam sawi hijau

Waktu Panen	Konsentrasi Logam		Nilai TF
	Kandungan Cd dalam tajuk (ppm)	Kandungan Cd dalam Akar (ppm)	
Hari ke-10	0.027	0.027	1.00
Hari ke-15	0.031	0.035	0.88
Hari ke-20	0.035	0.045	0.77
Hari ke-25	0.069	0.079	0.87

Analisis *One Way ANOVA*

Berdasarkan data yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2, nilai deviasi standar konsentrasi Pb dalam jaringan akar menunjukkan tren peningkatan seiring dengan waktu panen yang lebih lama, meningkat dari 0.003 pada Hari ke-10 menjadi 0.081 pada Hari ke-25. Pola serupa diamati pada jaringan tajuk, meskipun nilainya relatif lebih rendah dan menunjukkan beberapa fluktuasi. Untuk Cd, nilai deviasi standar baik pada akar maupun tajuk juga menunjukkan tren peningkatan seiring waktu, dengan nilai yang secara konsisten lebih tinggi diamati pada akar dibandingkan dengan tajuk.

Tabel 8. Hasil uji F (*One Way ANOVA*)

Logam	Bagian Tumbuhan	Nilai F	Sign.
Pb	Akar	2.274	0.157
Pb	Tajuk	2.046	0.186
Cd	Akar	1.768	0.231
Cd	Tajuk	4.001	0.154

Hasil analisis *One Way ANOVA* (Tabel 8) menunjukkan bahwa variasi waktu panen tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap akumulasi Pb maupun Cd pada akar dan tajuk sawi hijau ($p > 0,05$). Meskipun demikian, secara deskriptif terlihat adanya kecenderungan peningkatan konsentrasi Pb dan Cd seiring bertambahnya waktu panen (Gambar 1 dan Gambar 2). Tidak signifikannya hasil ANOVA mengindikasikan bahwa

peningkatan akumulasi logam selama rentang panen 10–25 hari belum cukup besar dibandingkan variasi antarulangan. Selain itu, jumlah ulangan yang relatif sedikit (n = 2) juga dapat menyebabkan daya uji statistik menjadi rendah sehingga perbedaan antarperlakuan belum terdeteksi secara signifikan.

KESIMPULAN

Sawi hijau (*Brassica juncea* L.) menunjukkan kemampuan menyerap logam berat Pb dan Cd dengan tingkat akumulasi yang relatif rendah. Nilai faktor biokonsentrasi (BCF < 1) dan faktor translokasi (TF < 1) menunjukkan bahwa tanaman ini tidak berperan sebagai akumulator, melainkan cenderung sebagai ekskluder dengan mekanisme fitostabilisasi, yang ditandai dengan penahanan logam berat pada jaringan akar dan keterbatasan translokasinya ke tajuk. Analisis statistik menggunakan *One Way ANOVA* menunjukkan bahwa variasi waktu panen tidak berpengaruh signifikan terhadap akumulasi Pb dan Cd (p> 0,05). Namun demikian, secara deskriptif terlihat adanya kecenderungan peningkatan akumulasi logam seiring bertambahnya waktu panen. Dari perspektif keamanan konsumsi, kadar Pb pada seluruh waktu panen masih berada di bawah batas maksimum yang diizinkan, sedangkan kadar Cd melebihi ambang batas pada waktu panen 25 hari. Berdasarkan kondisi kontaminasi pada penelitian ini, sawi hijau masih memenuhi batas keamanan konsumsi hingga umur panen 20 hari, sedangkan panen pada hari ke-25 berpotensi meningkatkan risiko paparan Cd. Dengan demikian, waktu panen menjadi faktor kunci yang perlu dipertimbangkan dalam meminimalkan risiko paparan logam berat pada budidaya sawi hijau di lahan terkontaminasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Alegbe, P. J., Appiah-Brempong, M., & Awuah, E. (2025). Heavy metal contamination in vegetables and associated health risks. *Scientific African*, 28, e02603. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02603.

Badan Pusat Statistik. (2025). *Statistik hortikultura 2024*. Badan Pusat Statistik.

Bakshe, P., & Jugade, R. (2023). Phytostabilization and rhizofiltration of toxic heavy metals by heavy metal accumulator plants for sustainable management of contaminated industrial sites: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10(February), 100293. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100293.

Balagopal, A., Alva, A., Chandrasekhar, H.K., Thorat, S.A., Kaniyassery, A., Koley, A., et al., 2025. The fate of heavy metals and metalloids in plant systems – A comprehensive review. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 107, 1114–1170. https://doi.org/10.1080/02772248.2025.2515403.

Bhat, B. A., Rather, M. A., Bilal, T., Nazir, R., Qadir, R. U., Mir, R. A., 2025. Plant hyperaccumulators: A state-of-the-art review on mechanism of heavy metal transport and sequestration. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1631378. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1631378.

BPOM RI. (2022). Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Nomor 9 Tahun 2022 tentang Persyaratan Cemaran Logam Berat dalam Pangan Olahan. Jakarta.

Cheng, Z., Wang, C., Tang, F., Zhou, Y., Zhu, C., & Ding, Y. (2025). The cell wall functions in plant heavy metal response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 299, 118326. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118326.

Donald, A. N., & Raphael, P. B. (2022). Environmental heavy metal pollution: Physicochemical remediation strategies to the rescue, 10(2), 31–45. https://doi.org/10.12691/jephh-10-2-1.

Fitriyah, R. H., Saing, B., & Nuraliyah, A. (2025). Analisis kadar logam berat Cd dan Pb pada sawi hijau yang dipanen pada usia 2, 3, dan 4 minggu dengan metode AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*) 2025. *Kocenin Serial Konferensi,* 1–6.

Gurajala, H. K., Cao, X., Tang, L., Ramesh, T. M., Lu, M., & Yang, X. (2019). Comparative assessment of indian mustard (*Brassica juncea* L.) genotypes for phytoremediation of Cd and Pb contaminated soils. *Environmental Pollution*, 254. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113085.

Junyo, G., & Handayanto, E. (2017). Potensi tiga varietas tanaman sawi sebagai akumulator merkuri pada tanah. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 4(1), 421–429.

Liao, Q., Xiao, H., Chen, L., Shen, C., Wang, B., Zhou, W., Fu, H., Zheng, Z., Huang, B., Xin, J., & Huang, Y. (2025). Potassium alters cadmium accumulation and translocation by regulating root cell wall biosynthesis in *Brassica napus*. *Scientia Horticulturae*, 339, 113833. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113833.

Mahfudiawati, M., P.W, E. R., & Turnip, M. (2016). Pertumbuhan tanaman sawi hijau (*Brassica rapa* var. parachinensis) akibat perlakuan logam berat kadmium (Cd). *Jurnal Protobiont*, 5(2), 18–24. https://doi.org/10.26418/protobiont.v5i2.15928.

Mohamed, H. I., Ullah, I., Toor, M. D., Tanveer, N. A., Din, M. M. U., Sultan, Y., … Rehman, M. U. (2025). Heavy metals toxicity in plants: Understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation: A review. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(95), 1-44. https://doi.org/10.1186/s40643-025-00930-4.

Nurlaili, R. A., Rahayu, Y. S., & Dewi, S. K. (2020). Pengaruh mikoriza vesikular arbuskular (MVA) dan silika (Si) terhadap pertumbuhan tanaman *Brassica juncea* pada tanah tercemar kadmium (Cd). *LenteraBio*, 9(3), 185–193. https://doi.org/10.26740/lenterabio.v9n3.p185-193.

Ratnawati, R., & Fatmasari, R. D. (2018). Fitoremediasi tanah tercemar logam timbal (Pb) Menggunakan tanaman lidah mertua (*Sansevieria trifasciata*) dan jengger ayam (*Celosia plumosa*). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(2), 62–69. https://doi.org/https://doi.org/10.29080/alard.v3i2.333.

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan. Jakarta.

Roychowdhury, R., Roy, M., Zaman, S., & Mitra, A. (2017). Bioaccumulation of heavy metals in *Brassica juncea*: an indicator species for phytoremediation. *International Journal for Innovative Research in Multidisciplinary Field*, 3(9), 92–95.

Sarwar, N., Imran, M., Rashid, M., Ishaque, W., Asif, M., Matloob, A., … Hussain, S. (2017). Chemosphere phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116.

Shakoor, A., Abdullah, M., Sarfraz, R., Altaf, M. A., & Batool, S. (2017). A comprehensive review on phytoremediation of cadmium (Cd) by Mustard (*Brassica juncea* L.) and Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 10(3), 88–98.

Sharma, J. K., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment, *Front. Plant Sci*. 14, 1–13. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876.

Yanitch, A., Kadri, H., Frenette-dussault, C., Joly, S., Pitre, F. E., & Labrecque, M. (2020). A four-year phytoremediation trial to decontaminate soil polluted by wood preservatives: phytoextraction of arsenic, chromium, copper, dioxins and furans. *International Journal of Phytoremediation*, 22(1), 1–10. https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1785387.