

**Efek Konsentrasi Asam Sitrat Terhadap Toleransi Fisiologis Marigold (*Tagetes Erecta* L.)
Di Bawah Cekaman Kadmium*****The Effect of Citric Acid Concentration on the Physiological Tolerance of
Marigold (*Tagetes erecta* L.) Under Cadmium Stress***Nasriyatul Fitriyah*, Sunawan¹ dan Anis Rosyidah²¹Departemen Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Islam Malang
Jl. MT. Haryono No. 193 Malang 65144, Jawa Timur, Indonesia*Korespondensi : nasriyatul54321@gmail.com**ABSTRACT**

*Cadmium is a non-essential heavy metal toxic to plants even at low concentrations. Combining *Tagetes erecta* L. with citric acid as a chelating agent offers a promising phytoremediation approach for Cd-contaminated soils. This study examined the effect of citric acid concentration on physiological tolerance of marigold under cadmium stress and identified the most effective dose. The experiment was conducted at the Faculty of Agriculture greenhouse, Islamic University of Malang, September–December 2025, using a randomized block design with six treatments, three replications: Control (no Cd, no acid), A₀ (Cd+0 mM), A₁ (Cd+2 mM), A₂ (Cd+4 mM), A₃ (Cd+6 mM), and A₄ (Cd+8 mM), Cd at 100 mg/polybag (20 mg/kg soil). Parameters included plant height, chlorosis score, phytotoxicity index, fresh weight, and translocation factor, analyzed using 5% ANOVA. Citric acid significantly affected all parameters. A₀ produced the tallest plants (41 cm) via sublethal Cd hormesis. A₄ maintained the highest chlorophyll (66 µg/mL) and most negative phytotoxicity index. A₃ produced the highest fresh weight (9.18 g). Highest translocation factors occurred in A₁ (3.85%) and A₂ (3.92%), with poorer physiological conditions. Citric acid acted biphasically: low doses increased Cd bioavailability without protecting physiology, while high doses effectively chelated Cd, protecting plant function overall.*

Keywords: *Cadmium, citric acid, marigold, phytoremediation, physiological tolerance*

ABSTRAK

Kadmium merupakan logam berat non esensial yang toksik bagi tanaman meskipun pada konsentrasi rendah. Fitoremediasi menggunakan *Tagetes erecta* L. dikombinasikan asam sitrat sebagai pengkhelat alami merupakan pendekatan untuk meremediasi tanah tercemar Cd. Penelitian bertujuan mengetahui efek konsentrasi asam sitrat terhadap toleransi fisiologis marigold di bawah cekaman kadmium serta menentukan konsentrasi paling efektif. Penelitian dilaksanakan di *greenhouse* Fakultas Pertanian Universitas Islam Malang, September–Desember 2025, menggunakan RAK sederhana, 6 perlakuan, 3 ulangan: Kontrol (tanpa Cd dan asam sitrat), A₀ (Cd+0 mM), A₁ (Cd+2 mM), A₂ (Cd+4 mM), A₃ (Cd+6 mM), A₄ (Cd+8 mM), dosis Cd 100 mg/polybag setara 20 mg/kg tanah. Parameter meliputi tinggi tanaman, scoring klorosis, indeks fitotoksisitas, bobot segar, dan faktor translokasi,



dianalisis ANOVA 5%. Konsentrasi asam sitrat berpengaruh nyata pada seluruh parameter. A₀ menghasilkan tinggi tanaman tertinggi (41 cm) akibat hormesis Cd sublethal. A₄ konsisten mempertahankan indeks fitotoksisitas paling negatif. A₃ menghasilkan bobot segar tertinggi (9,18 g). Faktor translokasi tertinggi pada A₁ (3,85%) dan A₂ (3,92%), namun disertai kondisi fisiologis lebih buruk. Mekanisme asam sitrat bersifat bifasik, dosis rendah meningkatkan bioavailabilitas Cd tanpa melindungi fisiologi tanaman, dosis tinggi efektif mengkhelat Cd di rizosfer sehingga melindungi fungsi fisiologis tanaman secara menyeluruh.

Kata kunci: Kadmium, asam sitrat, marigold, fitoremediasi, toleransi fisiologis

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat menjadi salah satu persoalan serius di sektor pertanian. Kadmium tergolong logam berat non-esensial yang toksisitasnya tinggi bahkan pada kadar rendah, yaitu di bawah 1 mg/kg tanah (Alloway, 2013), dengan sumber pencemaran yang beragam mulai dari aktivitas industri, pupuk fosfat, pestisida, hingga limbah domestik yang berisiko masuk ke rantai makanan (Wuana & Okieimen, 2011). Di Indonesia sendiri, beberapa lahan pertanian yang terpapar limbah industri dilaporkan telah melebihi ambang batas aman kadmium (Setiawan, 2015). Dampaknya terhadap tanaman juga cukup besar, mulai dari penurunan laju fotosintesis, gangguan metabolisme nitrogen, kerusakan membran sel akibat stres oksidatif, hingga terhambatnya pertumbuhan dan hasil panen akibat terbentuknya reactive oxygen species (ROS) yang merusak protein, lipid, dan DNA sel (Clemens & Ma, 2016; Gill & Tuteja, 2010).

Fitoremediasi menggunakan tanaman akumulator logam berat menjadi solusi yang banyak dikaji karena ramah lingkungan, murah, dan berkelanjutan (Ali *et al.*, 2013). *Tagetes erecta* L. (marigold) dinilai potensial untuk hal ini karena sistem perakarannya yang baik, toleransi tinggi terhadap kondisi lingkungan suboptimal, serta kemampuannya mengakumulasi logam berat seperti Pb, Ni, Zn, dan Cr (Bardiya-Bhurat *et al.*, 2017; Madanan *et al.*, 2021; Coelho *et al.*, 2017), ditambah nilai estetika dan ekonominya (Kurniati, 2021).

Asam sitrat, sebagai asam organik bermassa molekul rendah, berperan membentuk kompleks sitrat-Cd yang larut di rizosfer sehingga meningkatkan bioavailabilitas dan mobilitas Cd untuk diserap akar (Panchal *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025), sekaligus memitigasi toksisitas Cd melalui peningkatan kapasitas antioksidan dan perbaikan pertukaran gas tanaman (Alshegaihi *et al.*, 2023). Efektivitasnya bersifat konsentrasi-tergantung: konsentrasi rendah cenderung meningkatkan toksisitas Cd, sedangkan konsentrasi tinggi membentuk kompleks yang melindungi tanaman dari ion logam bebas (Sinha *et al.*, 2010; Quartacci *et al.*, 2005). Penelitian terdahulu telah mengkaji peran asam sitrat pada tanaman seperti *Solanum nigrum* (Gao *et al.*, 2010), *Juncus effusus* (Najeeb *et al.*, 2011), dan *Tagetes erecta* dengan kombinasi EDTA (Meeinkuirt *et al.*, 2024), namun kajian spesifik mengenai rentang konsentrasi asam sitrat terhadap parameter fisiologis marigold secara komprehensif masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh berbagai konsentrasi asam sitrat terhadap toleransi fisiologis marigold di bawah



cekaman kadmium dan menentukan konsentrasi yang paling efektif.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di *greenhouse* Fakultas Pertanian Universitas Islam Malang (550 mdpl, suhu rata-rata 23–28°C) pada bulan September hingga Desember 2025. Metode yang digunakan adalah Rancangan Acak Kelompok (RAK) sederhana dengan 6 perlakuan dan 3 ulangan. Perlakuan terdiri atas Kontrol (tanpa Cd dan tanpa asam sitrat), A₀ (Cd + 0 mM asam sitrat), A₁ (Cd + 2 mM), A₂ (Cd + 4 mM), A₃ (Cd + 6 mM), dan A₄ (Cd + 8 mM). Dosis Cd yang digunakan adalah 100 mg Cd/polybag (setara 20 mg/kg tanah) yang berasal dari Cd(NO₃)₂·4H₂O, diberikan tiga hari sebelum tanam. Asam sitrat diberikan sebanyak tiga kali pada umur 7, 14, dan 21 HST. Setiap perlakuan terdiri dari 3 tanaman sampel sehingga total 54 tanaman digunakan.

Bahan yang digunakan meliputi benih *Tagetes erecta* L., tanah bebas logam berat, Cd(NO₃)₂·4H₂O sebagai sumber kadmium, asam sitrat murni (*analytical grade*), aquades, dan reagen analisis AAS. Peralatan utama yang digunakan antara lain polybag ukuran 35×35 cm, SPAD meter, timbangan digital, dan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*).

Parameter yang diamati meliputi: (1) tinggi tanaman, diukur setiap minggu selama 7 minggu; (2) visualisasi dan scoring gejala klorosis berdasarkan skala persentase keparahan penyakit; (4) indeks fitotoksisitas, dihitung berdasarkan perbandingan pertumbuhan perlakuan terhadap kontrol; (5) bobot segar tanaman, ditimbang saat panen; dan (6) faktor translokasi (TF), dihitung sebagai rasio konsentrasi Cd pada tajuk terhadap akar yang dianalisis menggunakan AAS. Data dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) dengan uji F taraf 5%, dan apabila terdapat pengaruh nyata dilanjutkan dengan uji BNT taraf 5%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinggi Tanaman dan Bobot Segar Tanaman Marigold

Tinggi tanaman dan bobot segar merupakan dua indikator yang mencerminkan kondisi fisiologis tanaman secara keseluruhan di bawah cekaman kadmium.

Tabel 1. Rata-rata Tinggi Tanaman Pada Umur 49 Hari Setelah Tanam Pada Berbagai Perlakuan Konsentrasi Asam Sitrat

Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm)
Kontrol	25 a
A ₀	41 c
A ₁	31 ab
A ₂	29 a
A ₃	32 ab
A ₄	39 bc
BNT 5%	8.51

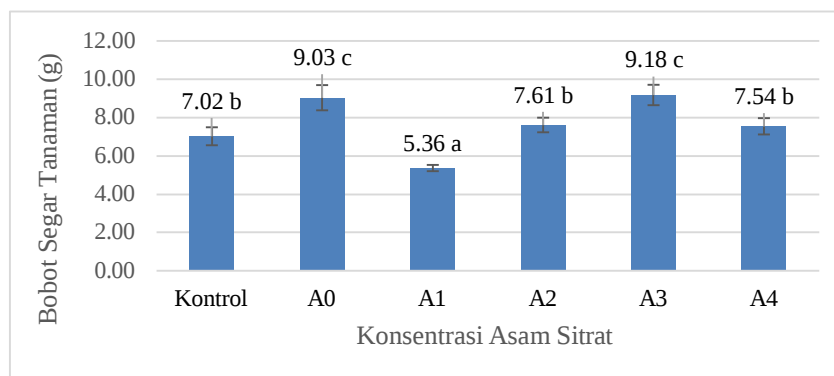
Keterangan : Angka yang didampingi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNT 5 %,
BNT : Beda Nyata Terkecil, TN: Tidak Nyata.

Perlakuan A₀ menghasilkan tinggi tanaman tertinggi dengan rata-rata 41

cm. Tingginya pertumbuhan pada A₀ diduga berkaitan dengan efek stimulasi awal dari kadmium pada konsentrasi sublethal, yang dikenal sebagai fenomena hormesis. Pada konsentrasi kadmium 20 mg/kg yang digunakan dalam penelitian ini, kadmium bersifat sebagai stressor sublethal yang secara tidak langsung memicu sintesis fitokelatin dan senyawa antioksidan yang justru mendukung pertumbuhan awal tanaman (Agathokleous *et al.*, 2019; Zaid *et al.*, 2020). Fenomena ini pula yang menjelaskan mengapa pertumbuhan pada perlakuan Kontrol justru lebih rendah dibandingkan A₀, meskipun Kontrol tidak mendapatkan paparan kadmium sama sekali.

Perlakuan A₁ dan A₂ menunjukkan pertumbuhan yang cenderung lebih rendah dibandingkan A₀ maupun A₄. Hal ini terjadi karena pada konsentrasi asam sitrat pada perlakuan ini, justru meningkatkan bioavailabilitas kadmium di rizosfer melalui mekanisme pengkkelatan parsial yang memobilisasi logam dari fraksi tidak tersedia menjadi tersedia di dalam larutan tanah (Panchal *et al.*, 2021). Peningkatan kadmium terlarut yang masuk ke dalam jaringan melebihi kapasitas detoksifikasi internal tanaman menyebabkan hambatan pada proses pembelahan dan pemanjangan sel di meristem apikal, sehingga pertumbuhan tinggi tanaman terhambat secara signifikan (Sinhal *et al.*, 2010; Clemens & Ma, 2016).

Berbeda dengan kondisi tersebut, pada perlakuan A₄, konsentrasi asam sitrat yang lebih tinggi mampu membentuk kompleks sitrat-kadmium yang lebih stabil dan jenuh. Kompleks ini memiliki ukuran molekul yang lebih besar sehingga sulit menembus membran plasma melalui protein transporter logam, yang pada akhirnya menurunkan jumlah ion Cd²⁺ bebas yang masuk ke dalam metabolisme tanaman (Quartacci *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2025). Penurunan toksisitas inilah yang memungkinkan tanaman pada perlakuan A₄ mempertahankan pertumbuhan yang stabil dan relatif lebih baik dibandingkan A₁ dan A₂.



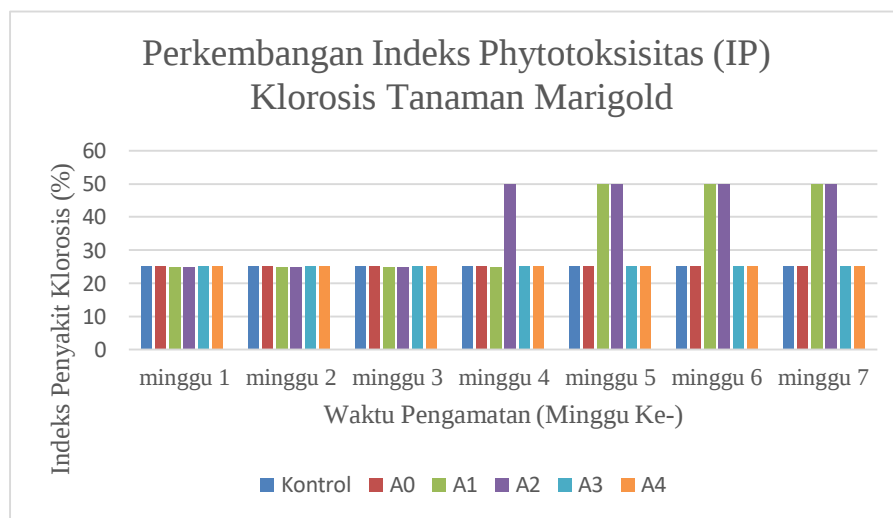
Gambar 1. Diagram Rata-rata Bobot Segar Tanaman Marigold yang diujikan dengan (nilai BNT 5% = 0.898)

Hal serupa juga terlihat pada parameter bobot segar dimana perlakuan A₃ menghasilkan bobot segar tertinggi sebesar 9,18 g, yang mengindikasikan bahwa pada konsentrasi tersebut terjadi keseimbangan optimal antara mitigasi toksisitas logam dan peningkatan ketersediaan nutrisi. Asam organik dengan konsentrasi menengah hingga tinggi

diketahui mampu meningkatkan kelarutan unsur hara mikro penting dalam tanah seperti Fe dan Zn yang turut mendukung pembentukan biomassa secara optimal (He *et al.*, 2022).

Sebaliknya, bobot segar terendah ditemukan pada perlakuan A₁ sebesar 5,36 g, yang memperkuat argumen bahwa konsentrasi asam sitrat rendah belum mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap cekaman kadmium, sehingga akumulasi logam dalam jaringan mengganggu metabolisme tanaman dan berujung pada penurunan biomassa. Temuan ini konsisten dengan pernyataan Nigam *et al.* (2001) bahwa pada dosis rendah, asam organik cenderung memperbesar tekanan toksik kadmium pada tanaman karena meningkatkan mobilitas logam tanpa diimbangi kemampuan detoksifikasi yang memadai.

Visualisasi Scoring Gejala Keracunan



Gambar 2. Perkembangan Indeks Phytotoksisitas Klorosis Tanaman Marigold.

Pada perlakuan A₃ dan A₄ terlihat secara visual melalui data scoring gejala keracunan, di mana kedua perlakuan tersebut berhasil mempertahankan indeks phytotoksisitas pada kategori Ringan (25%) hingga akhir pengamatan minggu ke-7. Sementara itu, perlakuan A₁ meningkat menjadi kategori Sedang (50%) pada minggu ke-5 dan A₂ lebih awal

pada minggu ke-4, menunjukkan bahwa semakin rendah konsentrasi asam sitrat maka semakin tidak terlindunginya jaringan daun dari serangan ion Cd²⁺ bebas yang secara visual ditandai dengan munculnya gejala klorosis yang lebih parah. Adapun perlakuan A₀ yang tetap bertahan di kategori gejala ringan membuktikan bahwa marigold secara alami memiliki mekanisme toleransi bawaan terhadap kadmium melalui aktivasi sistem antioksidan endogen (Kováčik *et al.*, 2011), dan penambahan asam sitrat pada konsentrasi yang tepat semakin memperkuat mekanisme pertahanan bawaan tersebut sehingga gejala keracunan semakin kecil.

***Indeks Fitotoksistas Pada Tanaman Marigold***

Hasil perhitungan rata-rata indeks fitotoksistas terhadap tinggi tanaman marigold akibat pemberian berbagai konsentrasi asam sitrat pada minggu ke-1 sampai minggu ke-7 disajikan pada Tabel 2.

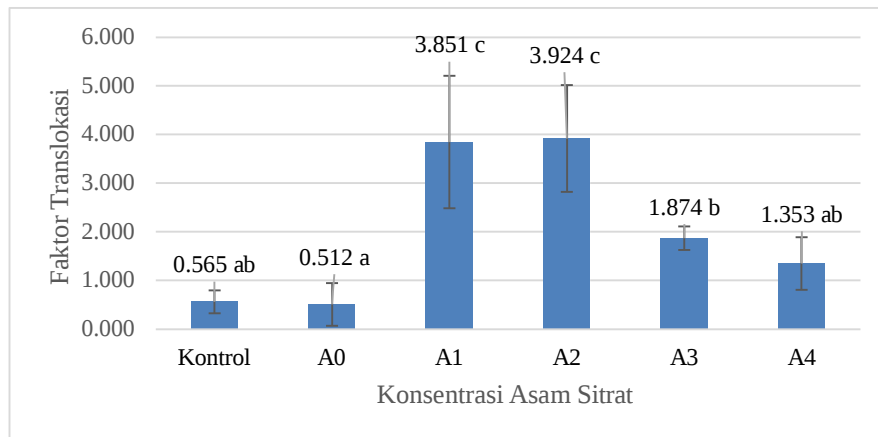
Tabel 2. Rata-rata Indeks Fitotoksistas Pada Umur 49 Hari Setelah Tanam Pada Berbagai Perlakuan Konsentrasi Asam Sitrat

Perlakuan	Indeks Fitotoksistas
Kontrol	-87.86
A ₀	-57.71
A ₁	-56.05
A ₂	-86.91
A ₃	-92.17
A ₄	TN
BNT 5%	-87.86

Keterangan : Angka yang didampingi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNT 5 %, BNT : Beda Nyata Terkecil, TN: Tidak Nyata.

Nilai indeks fitotoksistas pada seluruh perlakuan menunjukkan angka negatif yang menunjukkan bahwa tidak terjadi penghambatan pertumbuhan melainkan stimulasi pertumbuhan (hormesis) dibandingkan kontrol. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui dua mekanisme yang saling berkaitan pertama, efek hormesis kadmium pada konsentrasi sublethal yang merangsang sistem pertahanan antioksidan tanaman (Agathokleous *et al.*, 2019) dan kedua, peran asam sitrat dalam memperbaiki ketersediaan nutrisi mikro di rizosfer yang secara tidak langsung mendukung pertumbuhan tanaman (He *et al.*, 2022). Kedua mekanisme ini bekerja secara sinergis dan turut menjelaskan mengapa bobot segar pada perlakuan A₃ juga mencapai nilai tertinggi sebagaimana telah dibahas sebelumnya.

Perlakuan A₄ menunjukkan nilai indeks fitotoksistas yang paling negatif dengan pengaruh nyata terdeteksi sejak minggu ke-3, memperkuat bahwa pada dosis tinggi asam sitrat efektif membentuk kompleks sitrat-kadmium yang stabil di rizosfer sehingga bioavailabilitas ion Cd²⁺ bebas yang masuk ke jaringan tanaman berkurang dan mekanisme pertumbuhan serta pembelahan sel berjalan lebih optimal (Gul *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2025). Sebaliknya, perlakuan A₁ dan A₂ menunjukkan nilai fitotoksistas yang lebih tinggi dan mendekati nol, mengindikasikan bahwa pada konsentrasi rendah efek mitigasi asam sitrat belum sepenuhnya optimal karena sebagian kadmium masih masuk ke dalam jaringan dalam bentuk bebas yang toksik. Kondisi ini mengakibatkan beban fisiologis yang lebih besar pada tanaman, yang secara paralel juga tercermin dari rendahnya kandungan klorofil dan tingginya keparahan gejala keracunan pada perlakuan yang sama.

Faktor Translokasi Pada Tanaman Marigold

Gambar 3. Diagram Rata-rata Faktor Translokasi Tanaman Marigold yang diujikan dengan (nilai BNT 5% = 1.329)

Berdasarkan Faktor translokasi (TF) merupakan parameter kunci dalam mengevaluasi efisiensi fitoekstraksi logam berat karena menggambarkan kemampuan tanaman dalam memindahkan kadmium dari jaringan akar ke tajuk yang dapat dipanen. Nilai TF tertinggi diperoleh pada perlakuan A₁ (3,85%) dan A₂ (3,92%), sedangkan nilai TF terendah ditemukan pada A₀ (0,51%). Tingginya nilai TF pada A₁ dan A₂ menunjukkan bahwa pada konsentrasi asam sitrat pada perlakuan tersebut, mobilisasi kadmium dari akar ke tajuk terjadi secara aktif melalui penurunan pH lokal dan pembentukan kompleks lemah yang meningkatkan konsentrasi kadmium terlarut di rizosfer (Panchal *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024).

Namun demikian, tingginya TF pada A₁ dan A₂ tidak mencerminkan kondisi tanaman yang lebih baik. Kadmium yang banyak bertranslokasi ke tajuk tanpa perlindungan khelasi yang memadai justru menyebabkan akumulasi logam toksik di jaringan daun, yang tercermin dari rendahnya kandungan klorofil dan tingginya keparahan gejala keracunan pada kedua perlakuan tersebut. Dengan demikian, tingginya TF pada dosis rendah lebih mencerminkan ketidakmampuan tanaman mendetoksifikasi logam secara internal daripada menggambarkan efisiensi fitoremediasi yang sesungguhnya (Meeinkuirt *et al.*, 2024; Yu *et al.*, 2025). Sebaliknya, rendahnya TF pada A₃ dan A₄ menunjukkan bahwa asam sitrat pada konsentrasi tersebut secara efektif mengikat kadmium dalam bentuk kompleks stabil di rizosfer sehingga translokasi ke tajuk berkurang, memberikan keuntungan berupa stabilitas fisiologis tanaman yang lebih baik sebagaimana terbukti dari data klorofil, gejala keracunan, dan indeks fitotoksisitas yang lebih menguntungkan (Thamayanthi *et al.*, 2013).

Temuan ini menunjukkan adanya *trade-off* yang inheren antara efisiensi fitoekstraksi dan stabilitas fisiologi tanaman dalam sistem fitoremediasi berbantuan pengkhelat organik (Wang *et al.*, 2025). Mekanisme kerja asam sitrat bersifat bifasik dan konsentrasi-tergantung, pada konsentrasi perlakuan A₁ dan A₂, asam sitrat berperan dominan sebagai agen mobilisasi kadmium yang meningkatkan bioavailabilitas dan TF namun belum memberikan perlindungan fisiologis yang memadai; sedangkan pada konsentrasi perlakuan A₃ dan A₄, asam sitrat bergeser



menjadi agen pengkhelat eksternal yang efektif dalam melindungi aparatus fisiologis tanaman secara menyeluruh. Pola bifasik ini konsisten dengan temuan Sinhal *et al.* (2010) yang mencatat bahwa dosis 2–5 mM merupakan kisaran kritis yang dapat meningkatkan toksisitas, sedangkan dosis 8–10 mM cenderung menjadi ambang batas toleransi tanaman. Oleh karena itu, penentuan konsentrasi asam sitrat yang optimal harus mempertimbangkan tujuan fitoremediasi secara menyeluruh, jika bertujuan memaksimalkan fitoekstraksi maka A₁ dan A₂ menjadi pilihan, sedangkan jika bertujuan remediasi jangka panjang yang berkelanjutan maka A₃ dan A₄ lebih tepat, dengan tambahan keunggulan bahwa asam sitrat sebagai pengkhelat alami lebih mudah terdegradasi secara biologis dibandingkan pengkhelat sintesis seperti EDTA sehingga risiko pencucian logam ke lapisan tanah yang lebih dalam dapat diminimalkan (Zulfiqar *et al.*, 2022).

KESIMPULAN DAN SARAN

Pemberian berbagai konsentrasi asam sitrat berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter yang diamati pada tanaman marigold (*Tagetes erecta* L.) di bawah cekaman kadmium. Perlakuan A₀ (tanpa asam sitrat) menghasilkan tinggi tanaman tertinggi (41 cm) akibat efek hormesis Cd sublethal yang mengaktifkan sistem pertahanan alami tanaman. Perlakuan A₄ (8 mM) memiliki indeks fitotoksitas paling negatif, dan gejala keracunan pada kategori ringan, menunjukkan perlindungan fisiologis yang paling optimal. Perlakuan A₃ (6 mM) menghasilkan bobot segar tertinggi (9,18 g) karena mencapai titik keseimbangan optimal antara perlindungan Cd dan pembentukan biomassa. Faktor translokasi tertinggi ditemukan pada A₁ (3,85%) dan A₂ (3,92%), namun disertai kondisi fisiologis yang lebih buruk. Mekanisme kerja asam sitrat bersifat bifasik dan konsentrasi tergantung, konsentrasi rendah meningkatkan bioavailabilitas kadmium di rizosfer, sedangkan konsentrasi tinggi efektif mengkhelat Cd sehingga melindungi fungsi fisiologis tanaman secara menyeluruh. Untuk tujuan fitoremediasi jangka panjang yang berkelanjutan, konsentrasi asam sitrat 8 mM direkomendasikan.

Perlu penelitian lanjutan untuk mengkaji pengaruh asam sitrat pada kondisi tanah yang berbeda serta mengoptimalkan frekuensi aplikasi guna memaksimalkan efektivitas fitoremediasi secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Program studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian Unisma yang telah menjembatani penulis serta kepada Dosen Pembimbing I dan II yang telah meluangkan waktu, tenaga dan materi untuk membimbing penulis hingga terselesaikan penulisan jurnal ini.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Agathokleous, E., Kitao, M., & Calabrese, E. J. 2019. Hormesis: A compelling platform for sophisticated plant science. *Trends in Plant Science*, 24(4), 318–327.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. 2013. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881.
- Alloway, B. J. 2013. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- Alshegaihi, R. M., Almutairi, M. S., & Alharthi, S. S. 2023. Citric acid alleviates cadmium toxicity by improving antioxidant capacity and gas exchange parameters in plants. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Bardiya-Bhurat, K., Awasthi, A., & Chaturvedi, M. 2017. Phytoremediation of heavy metals by *Tagetes erecta* L. *International Journal of Environmental Sciences*, 7(2), 45–52.
- Cao, X. 2022. Stabilization of Cd distribution by organic ligands protects photosynthetic apparatus of *Tagetes* from oxidative damage. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Clemens, S., & Ma, J. F. 2016. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 489–512.
- Coelho, F. R., Silva, J. A. T. D., & Costa, N. P. 2017. Chromium phytoremediation by *Tagetes erecta* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 2360–2368.
- Gul, I., Manzoor, M., Hashmi, M. Z., Shah, G. M., Waraich, E. A., Solaiman, Z. M., & Arshad, M. 2019. EDTA-assisted phytoextraction of heavy metals by sunflower (*Helianthus annuus* L.) in a contaminated soil. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(1), 17–26.
- He, H., Ye, Z., Yang, D., Yan, J., Xiao, L., Zhong, T., Yuan, M., Cai, X., Fang, Z., & Jing, Y. 2022. Characterization of rhizosphere microbial community and its response to citric acid during phytoextraction of cadmium-contaminated soil. *Applied Soil Ecology*, 171, 104348.
- Kováčik, J., Klejdus, B., Hedbavny, J., Bačkor, M., & Štork, F. 2011. Comparison of cadmium and copper effect on phenolic metabolism, mineral nutrients and stress-related parameters in *Matricaria chamomilla* plants. *Plant and Soil*, 320(1), 231–242.
- Kurniati, F. 2021. Potensi bunga marigold (*Tagetes erecta* L.) sebagai salah satu komponen pendukung pengembangan pertanian. *Media Pertanian*, 6(1), 22–29.
- Madanan, M. T., Shah, I. K., Varghese, G. K., & Kaushal, R. K. 2021. Application of Aztec marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal



- polluted lateritic soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3, 17–22.
- Meeinkuirt, W., Phusantisampan, T., Saengwilai, P., & Pichtel, J. 2024. Cadmium phytoextraction by *Tagetes erecta* L. with EDTA and citric acid amendments in contaminated paddy soils. *International Journal of Phytoremediation*, 26(3), 356–367.
- Najeeb, U., Jilani, G., Ali, S., Sarwar, M., Xu, L., & Zhou, W. 2011. Insights into cadmium induced physiological and ultra-structural disorders in *Juncus effusus* L. and its remediation through exogenous citric acid. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 565–574.
- Nigam, R., Srivastava, S., Prakash, S., & Srivastava, M. M. 2001. Cadmium mobilisation and plant availability the impact of organic acids commonly exuded from roots. *Plant and Soil*, 230(2), 243–248.
- Panchal, P., Miller, A. J., & Giri, J. 2021. Organic acids: Versatile stress-response roles in plants. *Journal of Experimental Botany*, 72(11), 4038–4052.
- Poorter, H., Bühler, J., van Dusschoten, D., Climent, J., & Postma, J. A. 2012. Pot size matters: A meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Functional Plant Biology*, 39(11), 839–850.
- Quartacci, M. F., Argilla, A., Baker, A. J. M., & Navari-Izzo, F. 2005. Phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by Indian mustard. *Chemosphere*, 63(6), 918–925.
- Setiawan, B. 2015. Karakteristik logam berat sebagai pencemar lingkungan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 13(2), 85–92.
- Sinhal, V. K., Srivastava, A., & Singh, V. P. 2010. EDTA and citric acid mediated phytoextraction of Zn, Cu, Pb and Cd through marigold (*Tagetes erecta* L.). *Journal of Environmental Biology*, 31(3), 255–259.
- Thamayanthi, D., Sharavanan, P. S., & Jayaprasad, B. 2013. Phytoremediating capability, biochemical changes and nutrient status of marigold (*Tagetes erecta* L.) plant under cadmium stress. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(6), 1881–1889.
- Wang, Y., Liu, Y., Zhan, W., Zheng, K., Wang, J., & Zhang, C. 2025. Citric acid-facilitated phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Tagetes erecta*: Mechanisms of enhanced mobilization and translocation. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132789.
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. 2011. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20.
- Yu, H., Li, J., Sun, Y., Li, B., Zhao, W., & Ahmad, S. 2025. Enhanced phytoextraction of cadmium using *Tagetes erecta* assisted by organic acid amendments: Translocation efficiency and oxidative stress responses.



Ecotoxicology and Environmental Safety, 269, 115884.

- Zaid, A., Mohammad, F., Fariduddin, Q., Khan, M. N., & Hayat, S. 2020. Exogenously sourced gibberellin and salicylic acid synergistically alleviate cadmium stress through improved antioxidant defence system and plant growth in mung bean (*Vigna radiata* L.). *Heliyon*, 6(5), e03877.
- Zhang, H., Guo, Q., Yang, J., Chen, T., Zhu, G., Peters, M., & Tian, L. 2024. Mechanisms of organic acid-assisted phytoextraction of cadmium under field conditions. *Science of the Total Environment*, 912, 169234.
- Zulfiqar, U., Hussain, S., Ahmad, M., Ramzani, P. M. A., Ahmad, N., Shabaan, M., & Ali, M. A. 2022. Citric acid combined with *Bacillus subtilis* improved phytoremediation efficiency of Cd-contaminated soil by *Tagetes erecta*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 929340.

