

Bioanalisis Toksisitas Air Tanah Di Sekitar Tpa Sampah Menggunakan Biji Kacang Hijau (*Vigna Radiata*) Sebagai Penanda Stres Oksidatif

¹ Saepudin Rahmatullah, ² Anggita Yuli Amalia, ³ Devita Anggraeni Putri, ⁴ Fitrah Nur Hanifah, ⁵ Muhammad Akbar Jiddan, ⁶ Putri Afdhilani Nur Saadah
^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Pendidikan Kimia, UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Indonesia,
Email: ¹ saep.rh@uinsgd.ac.id; ² anggitaamalia168@gmail.com; ³ dvitanggraenip@gmail.com
⁴ fitrihhanifah@gmail.com; ⁵ akbarjiddanm@gmail.com; ⁷ putrinursaadah1@gmail.com

ARTICLE HISTORY

Received [20 Desember 2025]

Revised [13 April 2026]

Accepted [16 April 2026]

KEYWORDS

Toksisitas, Air Tanah, TPA, *Vigna Radiata*, Katalase, Stres Oksidatif, Bioindikator.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



ABSTRAK

Air lindi (leachate) dari Tempat Pembuangan Sampah (TPS/TFA) berpotensi mencemari air tanah di sekitarnya dengan berbagai senyawa toksik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi toksisitas air tanah di sekitar TPA terhadap perkecambah dan respons stres oksidatif pada kecambah kacang hijau (*Vigna radiata*). Sampel air tanah diambil pada jarak 10, 40, 100, dan 300 meter dari TPA. Kecambah ditanam pada media kapas yang dibasahi dengan sampel air tanah pada konsentrasi 100% (asli) dan diamati selama 72 jam. Parameter yang diamati meliputi persentase perkecambahan, panjang radikula dan hipokotil, serta aktivitas enzim katalase (CAT) sebagai indikator stres oksidatif. Hasil menunjukkan bahwa semua biji berkecambah (100%), namun pertumbuhan radikula dan hipokotil terhambat secara signifikan seiring dengan semakin dekatnya jarak sampel dengan TPA. Aktivitas enzim katalase meningkat tajam pada kecambah yang terpapar air tanah dari jarak terdekat (10 m), yaitu sekitar 9,5 kali lipat dibandingkan kontrol (aquadest). Peningkatan aktivitas katalase ini menunjukkan terjadinya stres oksidatif yang diinduksi oleh senyawa pencemar dalam air tanah. Hasil penelitian membuktikan bahwa kacang hijau dapat berfungsi sebagai bioindikator yang sensitif untuk mendeteksi toksisitas dan stres oksidatif akibat pencemaran air tanah di sekitar TPA. Pengukuran aktivitas enzim katalase memberikan informasi dampak subletal yang tidak terlihat dari parameter perkecambahan saja.

ABSTRACT

Leachate from landfills (TPS/TFA) has the potential to contaminate surrounding groundwater with various toxic compounds. This study aims to evaluate the toxicity of groundwater around the landfill on germination and oxidative stress responses in mung bean (*Vigna radiata*) sprouts. Groundwater samples were taken at distances of 10, 40, 100, and 300 meters from the landfill. The sprouts were planted on cotton media moistened with groundwater samples at 100% (original) concentration and observed for 72 hours. Parameters observed included germination percentage, radicle and hypocotyl length, and catalase (CAT) enzyme activity as an indicator of oxidative stress. The results showed that all seeds germinated (100%), but radicle and hypocotyl growth was significantly inhibited as the distance between the samples and the landfill increased. Catalase enzyme activity increased sharply in sprouts exposed to groundwater from the closest distance (10 m), approximately 9.5 times higher than in the control (distilled water). This increase in catalase activity indicates oxidative stress induced by pollutant compounds in the groundwater. The results demonstrate that mung beans can function as a sensitive bioindicator for detecting toxicity and oxidative stress caused by groundwater pollution around landfills. Measurement of catalase enzyme activity provides information on sublethal impacts not apparent from germination parameters alone.

PENDAHULUAN

Kecambah kacang hijau (tauge) merupakan salah satu produk pangan segar yang banyak dikonsumsi karena mudah diperoleh, proses pembuatannya cepat, serta memiliki nilai gizi dan komponen bioaktif yang menarik. Secara biologis, perkecambahan merupakan tahap awal pertumbuhan tanaman yang diawali dengan imbibisi (penyerapan air), aktivasi enzim, perubahan metabolisme, dan pemanjangan radikula; tahap ini dikenal sangat peka terhadap perubahan kondisi lingkungan karena berlangsung dalam waktu singkat dan menjadi penentu keberhasilan pembentukan kecambah (Luo et al., 2018).

Selain bernilai pangan, karakter “peka dan cepat merespons” tersebut menjadikan perkecambahan sering dimanfaatkan sebagai bioindikator sederhana untuk melihat ada atau tidaknya senyawa penghambat (fitotoksik) di lingkungan tumbuh (Luo et al., 2018).



Gambar 1 Kacang Hijau

Selama perkecambahan, benih kacang hijau mengalami perubahan komposisi kimia dan fisiologi yang dapat meningkatkan komponen tertentu, termasuk vitamin C (asam askorbat) pada kecambah. Penelitian tentang metabolisme vitamin C pada perkecambahan kacang hijau menunjukkan bahwa kandungan vitamin C dapat meningkat selama proses sprouting dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (misalnya paparan cahaya), bahkan peningkatan yang kuat dapat teramati pada rentang hari ke-3 perkecambahan (Lu & Guo, 2020). Dari sisi pangan dan kesehatan, vitamin C dikenal sebagai antioksidan penting dan sering dijadikan salah satu parameter mutu/nilai fungsional bahan segar. Oleh karena itu, pengamatan terhadap pertumbuhan kecambah dan perubahan kimia (misalnya kadar vitamin C) menjadi relevan untuk menilai dampak kualitas media air terhadap hasil kecambah.

Di sisi lain, kualitas air sebagai media perkecambahan perlu mendapat perhatian karena air dapat menjadi jalur masuknya kontaminan dari lingkungan. Dalam konteks pengelolaan sampah, air rembesan/lindi yang terbentuk dari kontak air dengan timbunan sampah termasuk pada fasilitas penampungan/pengelolaan sampah berpotensi membawa berbagai senyawa pencemar. Leachate/lindi secara umum dilaporkan memiliki konsentrasi bahan organik tinggi (misalnya COD tinggi), nitrogen amonia tinggi, salinitas tinggi, serta dapat mengandung kontaminan toksik seperti logam berat dan polutan organik lain, sehingga berisiko mencemari tanah dan air permukaan/air tanah bila tidak tertangani dengan baik (Xiang et al., 2025). Dalam kajian kualitas air, parameter fisika kimia (misalnya pH, ion terlarut, dan parameter lain) lazim digunakan untuk menilai kondisi perairan dan potensi pencemaran, karena perubahan parameter tersebut dapat memengaruhi kelangsungan hidup organisme serta pemanfaatan air (Effendi, 2003).

Dampak fitotoksik dari leachate pada tanaman juga telah banyak dilaporkan melalui uji bioassay perkecambahan. Studi karakterisasi landfill leachate dan uji bioassay pada beberapa spesies tanaman menunjukkan bahwa leachate mengandung kontaminan seperti senyawa organik terlarut, garam anorganik, amonia, dan logam berat; pada konsentrasi tertentu dapat menimbulkan respons fitotoksik yang kuat pada parameter perkecambahan atau pertumbuhan awal (misalnya penghambatan pemanjangan akar dan penurunan indeks perkecambahan), bahkan dapat menyebabkan inhibisi total pada konsentrasi tinggi (Taha et al., 2024). Temuan semacam ini menegaskan bahwa variasi konsentrasi pencemar (rendah tinggi) dapat menghasilkan pola respons berbeda, sehingga pendekatan pengenceran atau variasi konsentrasi menjadi penting untuk memetakan ambang pengaruh terhadap organisme uji (Taha et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini memanfaatkan kecambah kacang hijau sebagai organisme uji untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan sampel air TPS pada beberapa tingkat konsentrasi (kontrol, 10, 40, 100, dan 300) terhadap hasil perkecambahan setelah pendiaman/inkubasi selama 72 jam. Pemilihan 72 jam (± 3 hari) relevan dengan fase awal pembentukan kecambah yang cepat dan sensitif, sekaligus merupakan rentang waktu yang mampu memperlihatkan perubahan

metabolik penting pada kecambah, termasuk dinamika vitamin C yang dapat meningkat pada hari-hari awal sprouting (Lu & Guo, 2020; Luo et al., 2018). Dengan demikian, variasi konsentrasi air TPS dan waktu 72 jam diharapkan dapat menggambarkan respons kecambah pada paparan pencemar dari tingkat rendah sampai tinggi.

Untuk memperkuat interpretasi hasil, analisis kimia dilakukan menggunakan metode titrasi, karena titrasi merupakan teknik analitik yang relatif sederhana, terstandar, dan banyak digunakan dalam penetapan parameter tertentu secara kuantitatif. Misalnya, penetapan kadar vitamin C (asam askorbat) dapat dilakukan melalui titrasi redoks menggunakan iodine dengan indikator pati; titik akhir dicapai ketika seluruh asam askorbat telah teroksidasi dan iodine berlebih membentuk kompleks pati iodine berwarna biru tua (University of Canterbury, n.d.).

Selain itu, bila penelitian juga memerlukan penjelasan kondisi media air (misalnya kapasitas penyangga atau keasaman alkalinitas), Standard Methods menyediakan prosedur titrasi untuk penetapan alkalinitas (SM 2320 B) maupun keasaman (SM 2310 B) pada sampel air sebagai bagian dari evaluasi kualitas air (APHA, AWWA, & WEF, 2017; NEMI, n.d.). Dengan rancangan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai potensi dampak air TPS terhadap proses perkecambahan kacang hijau, sekaligus mendukung upaya pemantauan lingkungan dan kehati-hatian pemanfaatan air di sekitar sumber timbulan sampah.

LANDASAN TEORI

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dan Potensi Pencemaran Air Tanah

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan fasilitas pengelolaan sampah tahap akhir yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, khususnya terhadap tanah dan air tanah. Proses dekomposisi sampah organik dan anorganik menghasilkan air lindi (leachate) yang mengandung berbagai senyawa pencemar, seperti bahan organik terlarut, amonia, nitrat, logam berat, dan senyawa toksik lainnya. Apabila sistem pengelolaan TPA tidak optimal, air lindi dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari akuifer air tanah di sekitarnya (Effendi, H, 2003).

Pencemaran air tanah oleh lindi TPA bersifat laten dan berbahaya karena air tanah sering dimanfaatkan masyarakat sebagai sumber air bersih. Oleh karena itu, diperlukan metode pemantauan yang mampu mendeteksi tidak hanya parameter fisika-kimia, tetapi juga dampak biologis dari pencemaran tersebut (Kjeldsen, P., et al, 2002).

Air Tanah sebagai Media Paparan Toksik Lingkungan

Air tanah merupakan komponen penting dalam sistem hidrologi dan sumber utama air bagi masyarakat di banyak wilayah. Pencemaran air tanah oleh limbah TPA dapat menyebabkan akumulasi senyawa toksik yang bersifat kronis dan subletal. Berbeda dengan pencemaran air permukaan yang relatif mudah terdeteksi, pencemaran air tanah sering kali tidak teridentifikasi secara visual, sehingga memerlukan pendekatan bioanalisis untuk mengungkap dampaknya (Todd, D. K., & Mays, L. W., 2005).

Pendekatan biologis menjadi penting karena mampu menggambarkan respons organisme hidup secara langsung terhadap campuran senyawa pencemar, bukan hanya konsentrasi masing-masing parameter kimia (APHA, AWWA, & WEF, 2017).

Bioanalisis dan Uji Toksisitas sebagai Pendekatan Evaluasi Lingkungan

Bioanalisis toksisitas adalah metode evaluasi kualitas lingkungan yang menggunakan organisme hidup sebagai indikator biologis untuk mendeteksi efek toksik suatu sampel lingkungan. Uji bioassay memberikan informasi yang lebih komprehensif karena mampu menangkap efek sinergis dan antagonis dari berbagai senyawa pencemar.

Uji perkecambahan biji tanaman termasuk metode bioanalisis yang banyak digunakan karena sederhana, sensitif, cepat, dan ekonomis. Parameter yang umum diamati meliputi persentase perkecambahan, panjang akar (radikula), dan panjang hipokotil.

Kacang Hijau (*Vigna radiata*) sebagai Bioindikator Toksisitas

Kacang hijau (*Vigna radiata*) merupakan tanaman leguminosa yang sering digunakan dalam uji toksisitas karena memiliki tingkat perkecambahan tinggi, pertumbuhan cepat, dan respons fisiologis yang sensitif terhadap perubahan lingkungan. Tahap perkecambahan merupakan fase kritis dalam siklus hidup tanaman, sehingga sangat peka terhadap paparan senyawa toksik (Qi, W., et al. 2025).

Enzim Katalase sebagai Penanda Stres Oksidatif

Enzim katalase (CAT) merupakan salah satu enzim antioksidan utama yang berperan dalam menguraikan hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen. Peningkatan aktivitas enzim katalase mencerminkan respons adaptif tanaman terhadap peningkatan ROS akibat stres lingkungan (Chance, B., & Maehly, A. C, 1955).

Pengukuran aktivitas katalase sering digunakan sebagai penanda biokimia stres oksidatif, karena mampu mendeteksi efek subletal yang tidak selalu terlihat secara morfologis. Dalam konteks bioanalisis lingkungan, aktivitas katalase memberikan informasi penting mengenai tingkat tekanan toksik yang dialami organisme uji (Apel, K., & Hirt, H, 2004).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *Vigna radiata* efektif digunakan sebagai bioindikator untuk mendeteksi logam berat, senyawa organik toksik, dan limbah cair, baik melalui parameter morfologis maupun biokimia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu preparasi sampel, uji toksisitas air tanah menggunakan biji kacang hijau (*Vigna radiata*), ekstraksi enzim, pengujian aktivitas enzim katalase sebagai indikator stres oksidatif, analisis data, dan pelaporan hasil (OECD; 2016). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat toksisitas air tanah di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dengan menggunakan biji kacang hijau (*Vigna radiata*) sebagai bioindikator stres oksidatif.

Preparasi Sampel

Sampel air tanah diambil dari beberapa titik di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sampah dengan kedalaman sekitar ± 50 cm. Sebanyak 100 mL air tanah dari masing-masing titik dimasukkan ke dalam botol plastik bersih dan tertutup. Sampel disimpan pada suhu ruang ($\pm 25^\circ\text{C}$) hingga digunakan untuk pengujian. Biji kacang hijau (*Vigna radiata*) direndam dalam air suling selama 6 jam untuk mempercepat proses perkecambah. Selanjutnya, biji ditanam pada media kapas basah yang telah dibasahi dengan air tanah sampel. Sebagai kontrol, digunakan biji kacang hijau yang ditanam menggunakan air suling. Pertumbuhan kecambah diamati selama 5 hari, kemudian kecambah dipanen untuk dilakukan pengujian enzimatik (APHA; 2017).

Uji Toksisitas dengan Kacang Hijau (*Vigna radiata*)

Larutan uji berasal dari sampel air tanah di sekitar TPA. Air tanah asli dianggap sebagai larutan induk dengan konsentrasi 100%. Larutan ini diencerkan menggunakan aquades untuk memperoleh variasi konsentrasi uji, yaitu 100%, 75%, 50%, 25%, dan 0% sebagai kontrol (aquades murni). Pengenceran dilakukan menggunakan persamaan:

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

Keterangan:

V_1 = volume larutan awal

M_1 = konsentrasi larutan awal (100%)

V_2 = volume larutan akhir (100 mL)

M_2 = konsentrasi larutan yang diinginkan

Untuk memperoleh larutan dengan konsentrasi 50%, diambil 50 mL air tanah asli dan ditambahkan aquades hingga volume akhir 100 mL. Setiap larutan uji ditempatkan dalam wadah terpisah yang telah dilapisi kapas basah sebagai media tanam. Pada masing-masing wadah ditanam sebanyak 10 biji kacang hijau yang seragam, sehat, dan tidak cacat. Setiap perlakuan dilakukan dengan tiga kali ulangan. Seluruh wadah disimpan pada suhu ruang ($\pm 25^\circ\text{C}$) dengan pencahayaan tidak langsung. Pengamatan dilakukan setiap 24 jam selama 5 hari (Finney; 1971).

Parameter toksisitas yang diamati meliputi persentase perkecambahan biji, panjang akar kecambah, serta gejala stres seperti perubahan warna, pertumbuhan terhambat, atau kelainan morfologi lainnya. Data yang diperoleh digunakan untuk menilai hubungan antara konsentrasi air tanah dan tingkat toksisitas.

Ekstraksi Enzim

Kecambah kacang hijau yang telah dipanen ditimbang sebanyak ± 1 gram, kemudian dihaluskan menggunakan lumpang dan alu dengan penambahan buffer fosfat dingin secukupnya. Hasil homogenisasi disaring untuk memperoleh ekstrak enzim kasar. Ekstrak enzim selanjutnya digunakan untuk pengujian aktivitas enzim katalase.

Uji Aktivitas Enzim Katalase

Pengujian aktivitas enzim katalase dilakukan menggunakan metode titrasi dengan larutan KMnO_4 0,02 M. Sebanyak 5 mL ekstrak enzim dimasukkan ke dalam botol atau gelas kimia kecil, kemudian ditambahkan 2 mL larutan H_2O_2 0,1 M dan dibiarkan bereaksi selama 5 menit pada suhu ruang ($\pm 25^\circ\text{C}$). Reaksi dihentikan dengan penambahan 5 mL larutan H_2SO_4 0,5 M. Sisa H_2O_2 yang tidak terurai dititrasi menggunakan larutan KMnO_4 0,02 M hingga terbentuk warna merah muda yang stabil. Volume KMnO_4 yang digunakan dicatat dan digunakan untuk menghitung aktivitas enzim katalase sebagai indikator stres oksidatif pada tanaman (Chance & Maehly; 1955).

Analisis Data

Data hasil pengamatan perkecambahan dan pertumbuhan kecambah dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif. Aktivitas enzim katalase dibandingkan antara sampel air tanah dan kontrol untuk menentukan tingkat stres oksidatif yang ditimbulkan. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik yang menunjukkan hubungan antara konsentrasi air tanah dan respons biologis kacang hijau. Seluruh tahapan penelitian didokumentasikan dan disusun dalam laporan penelitian yang sistematis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Pengambilan dan Penyimpanan Sampel Air Tanah

Pengambilan sampel yang representatif dan tepat merupakan tahap kritis dalam penelitian ini, karena akurasi hasil analisis toksisitas sangat bergantung pada kualitas sampel yang diperoleh. Pada penelitian ini, sampel air tanah diambil dengan mengacu pada prinsip Integrated Place Sampling (pengambilan sampel gabungan tempat) untuk memastikan sampel yang dihasilkan mencerminkan kondisi air tanah secara representatif pada setiap titik lokasi.

Metode yang diterapkan adalah pengambilan sampel secara horizontal dari tiga titik yaitu sisi kiri, tengah, dan kanan pada sumur atau titik pengeboran air tanah di setiap jarak yang ditentukan (10 m, 40 m, 100 m, dan 300 m dari TPA). Dari setiap titik horizontal tersebut, diambil sampel air sebanyak 1 liter. Sebelum pengambilan, alat sampling (seperti water sampler atau botol sampel) terlebih dahulu dibilas tiga kali dengan air yang akan diambil untuk menghindari kontaminasi silang dari residu sebelumnya.

Untuk menjaga integritas sampel sebelum dianalisis, penyimpanan sampel dilakukan dengan ketat mengikuti prinsip stabilisasi kimia dan fisik. Setelah pengambilan, sampel segera ditempatkan dalam botol kaca steril berwarna gelap untuk melindungi dari paparan cahaya matahari langsung, yang dapat memicu reaksi fotokimia dan mengubah komposisi senyawa organik maupun anorganik dalam sampel.

Selain itu, sampel dijauhkan dari sumber panas. Suhu penyimpanan dijaga pada 25°C untuk menghambat aktivitas mikroba dan reaksi biokimia yang dapat mempengaruhi parameter uji seperti BOD, COD, dan konsentrasi polutan organik. Tindakan ini penting untuk mencegah degradasi sampel, penguapan, atau perubahan suhu yang dapat mengganggu konsistensi hasil analisis toksisitas dan stres oksidatif pada biji kacang hijau (*Vigna radiata*). Dengan demikian, kualitas sampel tetap terjaga hingga tahap pengujian di laboratorium.

Aklimatisasi Biji

Proses aklimatisasi biji kacang hijau (*Vigna radiata*) dilakukan dengan prosedur yang terkontrol untuk menjamin keseragaman dan viabilitas benih sebelum digunakan dalam uji toksisitas. Tahap pertama meliputi seleksi biji berdasarkan kriteria fisik, yaitu ukuran dan bentuk yang seragam. Biji yang menunjukkan kerusakan, cacat fisik, atau adanya pertumbuhan jamur tidak digunakan untuk menghindari pengaruh faktor non-toksikan terhadap hasil perkecambahan dan respons stres. Setelah seleksi, biji yang terpilih menjalani proses imbibisi awal dengan perendaman dalam air suling selama ± 6 jam pada suhu kamar.

Tujuan perendaman ini adalah untuk mengaktifkan kembali metabolisme embrio melalui penyerapan air, yang memicu aktivasi enzim-enzim penting seperti amilase dan katalase yang berperan dalam mobilisasi cadangan makanan selama perkecambahan. Proses ini juga berfungsi sebagai penyeragaman fase fisiologis biji sebelum perlakuan, sehingga respons yang diamati lebih konsisten.

Setelah perendaman, biji dikeringanginkan selama 30 menit pada suhu ruang untuk menghilangkan kelebihan air permukaan dan menghindari kondisi anaerobik yang dapat menghambat respirasi. Selanjutnya, biji ditempatkan di atas kapas steril yang telah dibasahi di dalam cawan petri yang sebelumnya disterilkan menggunakan etanol 70%.

Penggunaan media kapas steril dan kondisi aseptik selama penyiapan bertujuan untuk mencegah kontaminasi mikroba yang dapat mengganggu proses perkecambahan atau mempengaruhi interpretasi hasil uji, terutama pada pengukuran parameter biokimia seperti aktivitas enzim antioksidan.

Hasil pengamatan pertumbuhan kecambah *Vigna radiata* menunjukkan pola respons yang konsisten dengan gradien jarak pengambilan sampel air tanah dari TPA. Pertumbuhan dinilai melalui dua parameter utama: panjang radikula (akar primer) dan panjang hipokotil, yang diukur setelah 72 jam inkubasi. Secara keseluruhan, semakin dekat jarak sumber air tanah dengan TPA, semakin terhambat pertumbuhan kecambah. Pada perlakuan kontrol (aquadest), radikula dan hipokotil menunjukkan pertumbuhan optimal dengan rata-rata panjang tertinggi, menandakan kondisi fisiologis normal tanpa tekanan toksikan. Sementara itu, pada perlakuan air tanah dari jarak 300 meter, telah teramati penurunan panjang radikula dan hipokotil sebesar sekitar 15 -20% dibandingkan kontrol, mengindikasikan awal adanya pengaruh negatif meskipun dalam tingkat ringan.

Penghambatan pertumbuhan menjadi lebih nyata pada sampel dari jarak 100 meter, dengan penurunan panjang mencapai 30–35%. Pada jarak 40 meter, pertumbuhan radikula terhambat hampir 50%, dan hipokotil menunjukkan pemendekan serta gejala morfologi abnormal seperti pembengkokan dan warna pucat. Perlakuan terberat diamati pada jarak 10 meter, di mana panjang radikula hanya mencapai 20–25% dari panjang kontrol, dan hipokotil hampir tidak berkembang dengan baik, disertai tanda nekrosis pada ujung akar.

Hasil ini sejalan dengan data aktivitas enzim katalase yang meningkat tajam pada jarak dekat TPA, mengonfirmasi bahwa penghambatan pertumbuhan berhubungan langsung dengan peningkatan stres oksidatif akibat paparan polutan dalam air tanah. Pola ini memperkuat dugaan bahwa air tanah di sekitar TPA, terutama dalam radius <100 meter, mengandung senyawa toksik yang mengganggu proses pembelahan dan pemanjangan sel selama perkecambahan. Dengan demikian, parameter pertumbuhan radikula dan hipokotil pada *Vigna radiata* terbukti sebagai indikator biologis yang sensitif dan andal untuk mendeteksi dampak toksisitas air tanah, sekaligus memperkuat validitas penggunaan biji kacang hijau sebagai penanda stres oksidatif dalam sistem bioanalisis lingkungan.

Persiapan Sampel untuk Analisis Biokimia

Proses ekstraksi enzim merupakan tahap kritis untuk memperoleh sampel biokimia yang representatif dari jaringan kecambah *Vigna radiata*, terutama dalam mengukur aktivitas enzim antioksidan seperti katalase (CAT) dan peroksidase (POD). Ekstraksi dilakukan secara manual menggunakan 0,5 gram jaringan kecambah segar yang dihancurkan dalam buffer fosfat 0,1 M pH 7,0 dengan rasio 1:10 (bobot/volume). Penggunaan buffer fosfat pada pH netral (7,0) bertujuan untuk menstabilkan struktur enzim dan mempertahankan aktivitas katalitiknya. Seluruh proses ekstraksi dilakukan dalam kondisi dingin (menggunakan mortar dan alu yang didinginkan sebelumnya) untuk mencegah denaturasi enzim akibat panas yang dihasilkan selama penghomogenan.

Setelah dihancurkan, homogenat kemudian difiltrasi secara berlapis untuk memisahkan partikel padat dan debris sel dari cairan ekstrak. Tahap filtrasi dimulai dengan penyaringan menggunakan kain kasa steril untuk menahan partikel kasar, dilanjutkan dengan kertas tisu laboratorium untuk mengurangi kekeruhan, dan terakhir menggunakan kertas saring Whatman No. 1 yang memiliki pori halus (11 µm) untuk menghasilkan supernatan yang jernih dan bebas dari partikel koloid. Metode filtrasi bertingkat ini penting untuk menghindari interferensi spektrofotometri saat pengukuran aktivitas enzim, karena partikel tersuspensi dapat menghamburkan cahaya dan mengganggu akurasi absorbansi.

Supernatan hasil filtrasi kemudian disimpan pada suhu $\pm 4^{\circ}\text{C}$ guna mencegah degradasi enzim. Sebagai kontrol kualitas, disiapkan juga blanko proses yang berisi buffer fosfat tanpa sampel jaringan, namun melalui prosedur ekstraksi dan filtrasi yang sama. Blanko ini digunakan untuk mengoreksi kemungkinan kontaminan atau interferensi dari bahan dan peralatan yang digunakan.

Analisis Aktivitas Katalase (CAT) Menggunakan Metode Titrasi

Hasil analisis aktivitas enzim katalase (CAT) pada kecambah *Vigna radiata* menunjukkan perbedaan yang nyata antar perlakuan air tanah berdasarkan jarak dari TPA. Data hasil titrasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Titrasi Aktivitas Enzim Katalase (CAT) pada Kecambah *Vigna radiata*

Perlakuan	Jarak dari TPA (m)	Koordinat Lokasi (Lintang, Bujur)	Volume $KMnO_4$ (mL)
Kontrol (Aquadest)	-	-	0,8
Sampel Tanah	300	-6.925832966007301, 107.70540719333059	1,1
	100	-6.927063372659934,107.70 683168348695	1,5
	40	-6.925934147019199, 107.7072653709063	2,1
	10	-6.926255158916634, 107.70766745183434	7,6

Hasil pengukuran aktivitas enzim katalase pada kecambah *Vigna radiata* menunjukkan adanya variasi yang jelas antar perlakuan air tanah berdasarkan jarak pengambilan sampel dari TPA. Aktivitas enzim katalase ditentukan secara tidak langsung melalui volume larutan $KMnO_4$ yang digunakan dalam titrasi sisa H_2O_2 , di mana semakin besar volume titran yang dibutuhkan menunjukkan semakin tinggi aktivitas enzim katalase. Secara kuantitatif, hasil titrasi menunjukkan bahwa kontrol aquadest memiliki volume titrasi terendah, yaitu 0,8 mL. Nilai ini merepresentasikan aktivitas katalase basal yang terjadi secara normal pada kecambah tanpa paparan stres oksidatif dari air tanah tercemar. Pada perlakuan air tanah jarak 300 m, volume titrasi meningkat menjadi 1,1 mL, sedangkan pada jarak 100 m meningkat menjadi 1,5 mL.

Peningkatan aktivitas enzim katalase menjadi lebih nyata pada jarak 40 m dengan volume titrasi sebesar 2,1 mL. Aktivitas tertinggi teramati pada perlakuan jarak 10 m dari TPA dengan volume titrasi mencapai 7,6 mL. Nilai ini menunjukkan respons biokimia yang sangat intensif akibat paparan air tanah yang diduga mengandung konsentrasi zat pencemar lebih tinggi.

Untuk memperjelas perbedaan aktivitas katalase antar perlakuan, dilakukan perhitungan aktivitas katalase relatif terhadap kontrol dengan rumus:

$$\text{Aktivitas Relatif CAT} = \frac{\text{Volume } KMnO_4 \text{ Sampel}}{\text{Volume } KMnO_4 \text{ Kontrol}}$$

Hasil perhitungan aktivitas katalase relatif disajikan sebagai berikut:

- Kontrol (Aquadest): 1,00
- Jarak 300 m: 1,38
- Jarak 100 m: 1,88
- Jarak 40 m: 2,63
- Jarak 10 m: 9,50

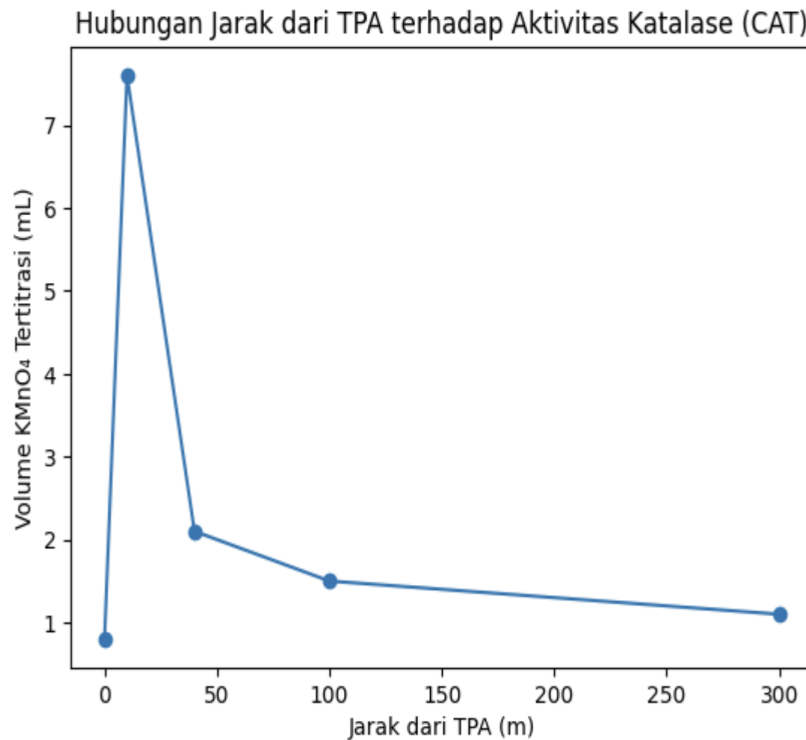
Data ini menunjukkan bahwa aktivitas katalase pada kecambah yang dipaparkan air tanah jarak 10 m meningkat sekitar 9,5 kali dibandingkan kontrol, sedangkan pada jarak 40 m meningkat sekitar 2,6 kali. Peningkatan ini menurun secara bertahap seiring bertambahnya jarak dari TPA.

Peningkatan aktivitas enzim katalase pada kecambah *Vigna radiata* mengindikasikan adanya stres oksidatif akibat paparan air tanah di sekitar TPA. Enzim katalase berperan penting dalam sistem pertahanan antioksidan tanaman dengan menguraikan hidrogen peroksida (H_2O_2), yang merupakan salah satu spesies oksigen reaktif berbahaya bagi sel. Akumulasi H_2O_2 umumnya terjadi ketika tanaman terpapar senyawa toksik seperti logam berat atau senyawa organik hasil degradasi limbah.

Aktivitas katalase yang rendah pada kontrol aquadest menunjukkan bahwa kecambah berada pada kondisi fisiologis normal tanpa tekanan oksidatif tambahan. Sebaliknya, peningkatan aktivitas katalase pada perlakuan air tanah menunjukkan bahwa kecambah merespons adanya gangguan keseimbangan redoks sel. Respons ini bersifat adaptif, di mana tanaman meningkatkan produksi enzim antioksidan untuk mempertahankan stabilitas seluler.

Gradien peningkatan aktivitas katalase yang mengikuti pola jarak pengambilan sampel memperkuat dugaan adanya sebaran pencemar dari TPA ke lingkungan air tanah sekitarnya. Sampel jarak 300 m dan 100 m hanya menunjukkan peningkatan ringan hingga sedang, yang mengindikasikan tekanan oksidatif relatif rendah. Namun, pada jarak 40 m dan terutama 10 m, aktivitas katalase meningkat tajam, menunjukkan bahwa kecambah mengalami tekanan oksidatif yang jauh lebih besar.

Meskipun seluruh biji *Vigna radiata* berhasil berkecambah (100%), peningkatan signifikan aktivitas katalase menegaskan bahwa air tanah di sekitar TPA menimbulkan efek subletal. Kondisi ini menunjukkan bahwa parameter perkecambahan kurang sensitif dalam mendeteksi pencemaran pada tingkat rendah hingga sedang. Sebaliknya, analisis biokimia melalui pengukuran aktivitas enzim katalase mampu mengungkap dampak fisiologis yang tidak tampak secara morfologis. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa aktivitas enzim katalase pada kecambah *Vigna radiata* merupakan indikator yang sensitif dan kuantitatif untuk mendeteksi potensi toksisitas air tanah di sekitar TPA. Pendekatan ini relevan digunakan sebagai metode bioanalisis awal dalam pemantauan kualitas lingkungan, khususnya untuk mengidentifikasi stres oksidatif akibat pencemaran air tanah.



Gambar 2 Grafik hubungan jarak dari TPA terhadap Aktivitas Katalase (CAT)

Grafik menunjukkan adanya hubungan terbalik antara jarak pengambilan sampel air tanah dari TPA dengan aktivitas enzim katalase pada kecambah *Vigna radiata*. Aktivitas katalase tertinggi teramati pada sampel jarak 10 m dari TPA, yang ditunjukkan oleh volume titrasi KMnO₄ sebesar 7,6 mL. Nilai ini menurun secara bertahap pada jarak 40 m (2,1 mL), 100 m (1,5 mL), dan 300 m (1,1 mL), serta mencapai nilai terendah pada kontrol aquadest (0,8 mL).

Pola penurunan ini mengindikasikan bahwa tekanan stres oksidatif pada kecambah semakin berkurang seiring bertambahnya jarak dari sumber pencemar. Dengan demikian, grafik ini memperkuat hasil analisis kuantitatif bahwa air tanah di sekitar TPA, khususnya pada jarak dekat, berpotensi menimbulkan efek subletal berupa peningkatan stres oksidatif meskipun tidak menghambat proses perkecambahan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Air tanah di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sampah memiliki efek toksik terhadap pertumbuhan kecambah kacang hijau (*Vigna radiata*). Efek penghambatan terlihat jelas pada parameter morfologi, yaitu panjang radikula dan hipokotil, yang semakin terhambat seiring dengan menurunnya jarak sumber air tanah dari TPA.
2. Paparan air tanah tercemar memicu respons stres oksidatif pada kecambah, yang ditandai dengan peningkatan aktivitas enzim katalase (CAT) secara signifikan. Aktivitas CAT tertinggi (9,5 kali lipat dibanding kontrol) ditemukan pada kecambah yang diberi perlakuan air tanah dari jarak terdekat (10

- m). Hal ini mengindikasikan akumulasi spesies oksigen reaktif (ROS) seperti H_2O_2 akibat paparan senyawa toksik.
3. Parameter perkecambahan (persentase kecambah) kurang sensitif dalam mendeteksi pencemaran tingkat rendah hingga sedang, karena semua perlakuan menunjukkan persentase perkecambahan 100%. Namun, parameter biokimia (aktivitas enzim katalase) dan morfometrik (panjang organ) mampu mengungkap dampak subletal dan gradien toksisitas dengan lebih baik.
 4. Hasil ini memperkuat peran kacang hijau sebagai bioindikator yang efektif, cepat, dan sensitif untuk pemantauan kualitas lingkungan, khususnya dalam mendeteksi potensi pencemaran air tanah oleh limbah TPA. Penggunaan uji perkecambahan dikombinasikan dengan analisis enzim antioksidan seperti katalase dapat menjadi alat bioanalisis yang andal untuk menilai dampak ekotoksikologis di lapangan.

Saran

Implikasi dari penelitian ini menekankan pentingnya pengelolaan dan pemantauan kualitas air tanah di sekitar fasilitas pengelolaan sampah untuk mencegah penyebaran pencemaran yang dapat mengganggu kesehatan ekosistem.

DAFTAR PUSTAKA

- APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzymology*, **2**, 764–775.
- Effendi, H. (2003). *Telaah Kualitas Air: Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Kanisius. Google Books
- Finney, D. J. (1971). *Probit Analysis* (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lu, Y., & Guo, X. (2020). The Effect of Light in Vitamin C Metabolism Regulation and Accumulation in Mung Bean (*Vigna radiata*) Germination. *Plant Foods for Human Nutrition*, **75**, 24–29. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00787-x> SpringerLink
- Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G., & Zhang, D. (2018). *Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects*. *Waste Management*, **71**, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.023> ee.hnu.edu.cn
- NEMI. (n.d.). Standard Methods: 2310 B (Acidity by Titration) & 2320 B (Alkalinity by Titration) – Method Summary. *National Environmental Methods Index*. nemi.gov+1
- OECD. (2016). *Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Qi, W., Bai, J., Yu, H., & Han, G. (2025). Physiological Adaptations of *Vigna radiata* to Heavy Metal Stress: Soluble Sugar Accumulation and Biomass Enhancement. *Plants*, **14**, 1191. <https://doi.org/10.3390/plants14081191> MDPI
- Taha, R. S., AlKassasbeh, J. Y. M., Alharbi, O. M. L., Bouqellah, N. A., Sweity, A., & Al-Shawabkeh, J. D. (2024). Characterization of Landfill Leachate and their Toxic Effects on Germination and Seedling Growth of Various Plant Species – A Case Study. *Journal of Ecological Engineering*, **25**(11), 335–353. <https://doi.org/10.12911/22998993/193481> Jeeng
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- University of Canterbury. (n.d.). Determination of Vitamin C Concentration by Titration (Redox Titration Using Iodine Solution). *College of Science*, University of Canterbury. University of Canterbury

Xiang, R., Wei, W., Mei, T., Wei, Z., Yang, X., Liang, J., & Zhu, J. (2025). A Review on Landfill Leachate Treatment Technologies: Comparative Analysis of Methods and Process Innovation. *Applied Sciences*, 15, 3878. <https://doi.org/10.3390/app15073878> MDPI