

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Urbanisasi yang pesat dan pertumbuhan penduduk dapat memicu peningkatan volume limbah padat secara global (Dagwar & Dutta, 2024). Kota Semarang menghadapi tantangan besar terkait pengelolaan sampah di TPA Jatibarang. Saat ini TPA menerima sekitar 800 ton sampah per hari. Jumlah ini diperkirakan akan meningkat drastis menjadi 1437 ton per hari pada tahun 2025 (Hasthi *et al.*, 2023). Tumpukan sampah di TPA dapat membentuk lindi, yaitu cairan yang terbentuk saat air meresap melalui limbah. Lindi dapat mengandung berbagai logam berat termasuk seng dengan konsentrasi tinggi dan dapat bermigrasi ke tanah dan air tanah sekitarnya, sehingga menyebarkan pencemaran (Jagasri *et al.*, 2024).

Kandungan seng (Zn) yang tinggi dalam lindi TPA berasal dari berbagai aktivitas industri dan penggunaan Zn seperti pengecoran logam, baja galvanis, karet, nanopartikel, dan cat, yang masuk ke tanah melalui aliran limbah (Fekiacova *et al.*, 2015; Mansour *et al.*, 2020). Pencemaran Zn berbahaya bagi kesehatan manusia, menyebabkan gangguan pencernaan hingga disfungsi imun dan neurotoksisitas pada paparan kronis (Hussain *et al.*, 2022; Jaiswal *et al.*, 2018). Hasil uji pendahuluan tanah di sekitar aliran lindi TPA Jatibarang menunjukkan kadar Zn sebesar 174,41 mg/kg, melebihi ambang batas 160 mg/kg (U.S. EPA, 2007). Hasil ini sejalan dengan temuan Amelinda dkk. (2017) yang melaporkan bahwa kadar Zn mencapai 234 mg/kg, sementara Cd, Pb, dan Cu masih di bawah ambang batas. Kondisi ini

menunjukkan bahwa Zn merupakan kontaminan utama di tanah TPA Jatibarang dan perlu diremediasi.

Metode remediasi tanah dapat berupa fisikokimia yang efektif, tetapi memiliki kelemahan yaitu bahan kimia berbahaya, energi tinggi, dan biaya besar (Wang *et al.*, 2024). Solusi metode remediasi yang murah dan ramah lingkungan adalah fitoremediasi. Metode ini memanfaatkan peran tumbuhan untuk mengakumulasi atau mengurangi kadar logam berat, termasuk Zn dari tanah (Khan *et al.*, 2023). Keterbatasan fitoremediasi berupa risiko kontaminasi pada tanaman pangan dan biomassa rendah dapat diatasi dengan pemilihan tumbuhan aromatik dan rumput-rumputan. Akar wangi [*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty] merupakan jenis tumbuhan yang potensial karena memiliki pertumbuhan cepat, biomassa tinggi, tidak dikonsumsi, serta bernilai ekonomi non-pangan melalui minyak atsiri dan bioetanol (Mishra & Chandra, 2022; Rabêlo *et al.*, 2021; Sulistiyani *et al.*, 2020; Raman & Gnansounou, 2015).

Penelitian Melato *et al.* (2016) menunjukkan bahwa rumput akar wangi [*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty] yang ditanam di tanah tailing tambang emas selama 4 bulan menunjukkan hasil faktor bioakumulasi (Bioaccumulation Factor/BCF) yaitu > 1 dan faktor translokasi (Translocation Factor/TF) yaitu < 1 pada logam berat Zn. Hal ini menunjukkan bahwa rumput akar wangi merupakan hiperakumulator Zn dan bertipe fitostabilisator dimana tipe ini mencegah potensi penyebaran logam berat lewat daun dengan menahan logam berat di zona akar (Khan *et al.*, 2021).

Akar wangi lebih banyak menyimpan logam berat Zn di bagian akar berkaitan dengan dominasi gen-gen metabolisme glutathione, transport transmembran, dan biosintesis dinding sel (Wu *et al.*, 2022). Glutathione dan GST berperan dalam detoksifikasi Zn melalui pengkelatan dan penyimpanan ke vakuola, sementara transporter *Zinc/Iron-regulated Transporter-like Proteins* (ZIP) dan *Heavy-metal-transporting ATPase* (HMA) mengatur homeostasis logam di sel akar. Bagian akar tanaman akar wangi juga didominasi oleh gen-gen terkait Cell wall biosynthesis (Wu *et al.*, 2022). Beberapa enzim seperti selulase dan glukukanase dapat berpartisipasi dalam biogenesis dinding sel. Logam berat di akar dapat dikelat dan diendapkan bersama oleh polisakarida seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa, di dinding sel (Huang *et al.*, 2019). Melato *et al.* (2016) melaporkan terdapat kandungan tinggi fenolik yang terikat pada dinding sel akar tanaman akar wangi yang berfungsi untuk mengikat Zn.

Biochar adalah produk stabil kaya karbon yang dihasilkan dari penguraian biomassa limbah organik dalam kondisi anaerobik dan suhu tinggi (200–800°C) (Boorboori & Lackóová., 2023; He *et al.*, 2024). Biochar menurunkan kadar Zn tanah melalui mekanisme presipitasi, kompleksasi, interaksi elektrostatik, dan pertukaran ion (Shaheen *et al.*, 2023). Gugus fungsi karboksil (–COOH) dan hidroksil (–OH) berperan dalam pembentukan ikatan elektrostatik dan pertukaran ion dengan kation Zn^{2+} , sedangkan senyawa fenolik, hemiselulosa, dan selulosa memperkuat kompleksasi logam di dalam dan pada permukaan biochar (Ghosh & Maiti, 2020; Deka *et al.*, 2024).

Biochar dapat berasal dari limbah industri, limbah perkebunan, dan limbah pertanian, seperti sekam padi, batang jagung, jerami gandum, termasuk tongkol jagung. Biochar dari tongkol jagung menunjukkan kemampuan imobilisasi Zn yang lebih tinggi dibandingkan biochar kulit kacang tanah karena memiliki nilai pH, karbon organik (OC), dan konduktivitas listrik (EC) yang lebih tinggi (Vuong *et al.*, 2023). Biochar dari tongkol jagung juga memiliki kapasitas penyerapan Cd tertinggi dibandingkan biochar dari sekam padi dan jerami gandum, yang dikaitkan dengan struktur pori yang lebih baik, luas permukaan yang lebih besar, serta jumlah situs adsorpsi aktif yang lebih banyak (Amen *et al.*, 2020).

Optimasi fitoremediasi masih diperlukan melalui peningkatan kepadatan tanaman untuk meningkatkan biomassa dan penyerapan logam berat, meskipun akar wangi sudah memiliki daya serap logam tinggi (Khalid *et al.*, 2019). Namun, jika kepadatan terus meningkat melebihi titik optimal, biomassa populasi menjadi konstan karena pertumbuhan tiap tanaman menurun akibat persaingan yang semakin besar untuk sumber daya seperti air, nutrisi, dan cahaya (Li *et al.*, 2016). Penelitian Jacobs *et al.* (2018) menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan tanaman *Noccaea caerulea* meningkatkan penyerapan Zn secara kumulatif akibat peningkatan biomassa total. Pada akar wangi, kepadatan tinggi juga meningkatkan akumulasi Cr(VI) secara kumulatif pada sistem perakaran serta menurunkan faktor translokasi (TF) ke tajuk, namun disertai penurunan kesehatan tanaman akibat kompetisi antar individu (Masinire *et al.*, 2021). Penelitian Zheng *et al.* (2023) mengenai tanaman *Trifolium repens* pada kepadatan 1, 3, 6 individu/pot yang

dikombinasikan dengan perlakuan biochar menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan kepadatan sedang (3 individu/pot) menghasilkan akumulasi Cd tertinggi dan biomassa tanaman tertinggi. Hal ini menunjukkan kompetisi yang terlalu tinggi pada kepadatan 6 individu/pot membuat efek biochar pada tanaman tidak optimal.

Penelitian yang mengkombinasikan kepadatan tanaman dengan biochar dari tongkol jagung belum pernah diterapkan sebagai agen fitoremediasi logam berat Zn di tanah tercemar limbah di TPA Jatibarang, Semarang. Penelitian mengenai perlakuan biochar dikombinasikan dengan kepadatan tanaman terhadap penyerapan seng dan pertumbuhan tanaman akar wangi terhadap tanah tercemar limbah penting untuk dilakukan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, rumusan masalah dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh biochar terhadap penurunan kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan akar wangi?
2. Bagaimana pengaruh kepadatan tanaman yang berbeda terhadap penurunan kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan tanaman akar wangi?
3. Apakah terdapat interaksi antara biochar dan kepadatan tanaman terhadap kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan akar wangi?
4. Kombinasi biochar dan kepadatan tanaman manakah yang paling efektif terhadap penurunan kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan akar wangi?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini meliputi:

1. Menganalisis pengaruh biochar terhadap penurunan kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan akar wangi.
2. Menganalisis pengaruh kepadatan tanaman yang berbeda terhadap penurunan kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan akar wangi.
3. Menganalisis interaksi antara biochar dan kepadatan tanaman terhadap kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan akar wangi.
4. Menganalisis kombinasi biochar dan kepadatan tanaman mana yang paling efektif terhadap penurunan kadar Zn tanah, kemampuan daya serap Zn, dan pertumbuhan akar wangi.

1.4 Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan berkontribusi pada :

1. Bagi Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini memperkaya ilmu fitoremediasi dengan data terbaru mengenai efektivitas biochar dari tongkol jagung dan kepadatan tanaman akar wangi dalam menyerap seng (Zn)

2. Bagi Masyarakat

Penelitian ini menyediakan metode fitoremediasi yang efektif, ramah lingkungan, dan ekonomis untuk mengatasi pencemaran Zn di TPA Jatibarang, serta memberikan panduan teknis bagi pengelola lingkungann.