

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Bab ini membahas hasil penelitian fitoremediasi Cd pada tanah menggunakan tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides* L.) dengan penambahan berbagai jenis *biochar* yang dilakukan melalui dua tahapan, yaitu masa aklimatisasi 30 hari dan fitoremediasi 50 hari, dengan pengamatan berkala setiap hari ke-1, 6, 12, 25, dan 50. Analisis mencakup kondisi lingkungan tanah, respons morfologi tanaman, kemampuan penyerapan dan bioakumulasi Cd berdasarkan nilai *Translocation Factor* (TF) dan *Bioaccumulation Factor* (BAF), peran jenis *biochar*, serta kinerja komparatif semua variasi perlakuan terhadap perubahan konsentrasi Cd di tanah. Seluruh variabel dianalisis secara statistik untuk menentukan signifikansi perbedaan antarperlakuan terhadap efisiensi penyisihan Cd.

4.2 Karakteristik Awal Logam Media Tanam

Karakteristik awal dilakukan untuk memperoleh kondisi dasar media tanam sehingga perubahan konsentrasi Cd setelah perlakuan dapat diinterpretasikan sebagai akibat pemberian *biochar* dan aktivitas fitoremediasi, bukan akibat perbedaan karakteristik awal media. Hasil pengukuran kandungan Cd pada tanah dan tanaman sebelum diberikan perlakuan dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4. 1 Karakteristik Awal Tanah dan Tanaman

Parameter		Nilai	Satuan
Lingkungan Tanah			
pH		7,7	-
Kelembapan		11	%
Suhu		25,5	°C
Kandungan Cd			
Tanah		0,39	mg/kg
Tanaman	Akar	0,23	
	Batang	0,19	
	Daun	0,05	
Air Reservoir TL		0,0098	mg/L

Konsentrasi awal Cd pada tanah dan tanaman telah mengandung logam pencemar Cd. Tanah memiliki kandungan logam pencemar awal sebesar 0,39 mg/kg. Menurut US EPA, nilai ambang batas logam berat Cd pada tanah adalah 0,4 mg/kg.

Konsentrasi Cd sudah mendekati nilai baku mutu, di mana kondisi awal tanahnya sudah mengandung Cd alami, kemudian ditambah lagi 1 mg/kg sehingga total beban Cd meningkat. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis tanah inceptisol. Jenis ini dipilih karena merupakan salah satu jenis tanah yang banyak dijumpai di Indonesia serta banyak dimanfaatkan untuk kegiatan pertanian, sehingga relevan sebagai media simulasi pencemaran Cd. Selain tanah, konsentrasi awal Cd juga terdeteksi pada akar wangi yang digunakan sebelum perlakuan fitoremediasi. Keberadaan Cd pada jaringan tanaman ini merupakan hal yang wajar mengingat tanaman ditanam pada tanah yang secara alami mengandung Cd, sehingga terjadi serapan pasif melalui sistem perakaran (Ng dkk., 2017). Studi yang dilakukan oleh Ng dkk. (2017) menunjukkan bahwa pertumbuhan akar wangi mulai terhambat ketika ambang batas toleransi sebesar 100 mg/kg Cd (berat kering) dalam tanah terlampaui. Dengan demikian, akar wangi dapat dipastikan masih tumbuh secara optimal.

Konsentrasi Cd pada air untuk menyiram tanaman yang diambil dari reservoir Departemen Teknik Lingkungan sebesar 0,0098 mg/L. Kemudian, kondisi lingkungan tanah yaitu pH 7,7, dengan kondisi optimal pertumbuhan tanaman berada pada kisaran 5,0–8,0. Sedangkan kelembapan tanah yaitu 11 %, dengan kondisi optimal berkisar 20–60%. Namun, akar wangi dapat tumbuh pada kondisi keterbatasan air dan kualitas air yang rendah (di bawah optimum) (Dorafshan dkk., 2023). Untuk suhu, yaitu 25 °C, masih berada pada kondisi optimal, yaitu 20–35 °C. Karakteristik awal media tanam penting untuk menentukan kondisi awal pencemaran dan kondisi lingkungan sebelum perlakuan fitoremediasi.

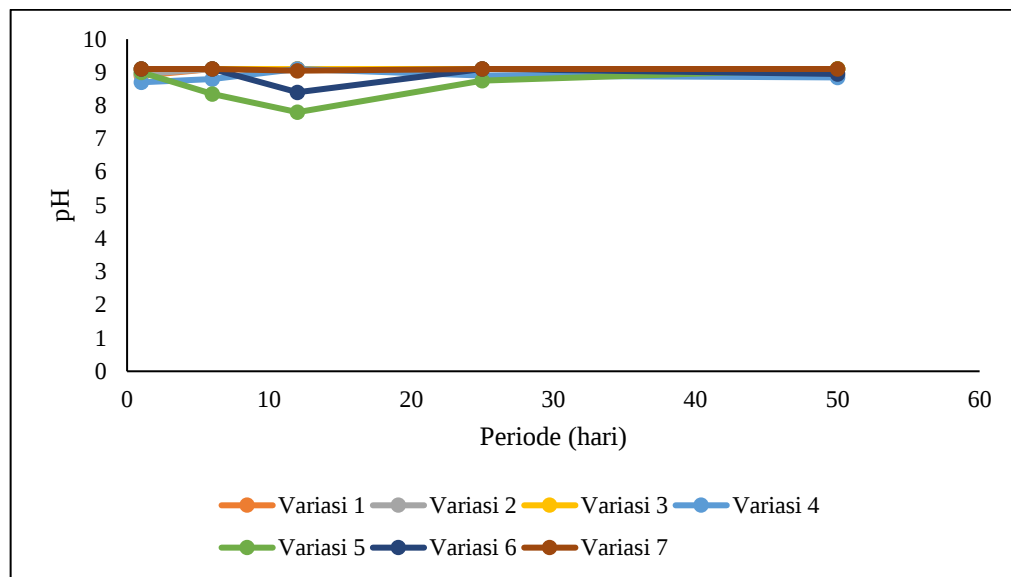
4.3 Kondisi Lingkungan Tanah dan Respons Morfologi Tanaman pada Setiap Variasi Perlakuan

Selama proses fitoremediasi berlangsung, perubahan kondisi lingkungan tanah dan respons morfologi tanaman berupa tinggi batang diamati untuk menilai parameter lingkungan tanah yang dapat memengaruhi mobilitas serta ketersediaan Cd di dalam tanah. Di sisi lain, respons morfologi tanaman seperti tinggi tanaman dapat menunjukkan tingkat toleransi tanaman terhadap paparan Cd serta pengaruh penambahan *biochar* pada media tanam. Perubahan pH, kelembapan, dan suhu

tanah tidak hanya mencerminkan kondisi media tanam, tetapi juga mengendalikan kelarutan, mobilitas, serta bioavailabilitas Cd. Oleh karena itu, interpretasi parameter lingkungan menjadi dasar dalam menjelaskan perbedaan kemampuan fitoremediasi pada setiap variasi perlakuan.

4.3.1 Kondisi Lingkungan

Parameter yang diamati meliputi pH tanah, temperatur, dan kelembapan tanah selama periode penelitian dapat dilihat pada **Gambar 4.1 -4.3**



Gambar 4. 1 pH pada Kondisi Lingkungan Tanah setiap periode

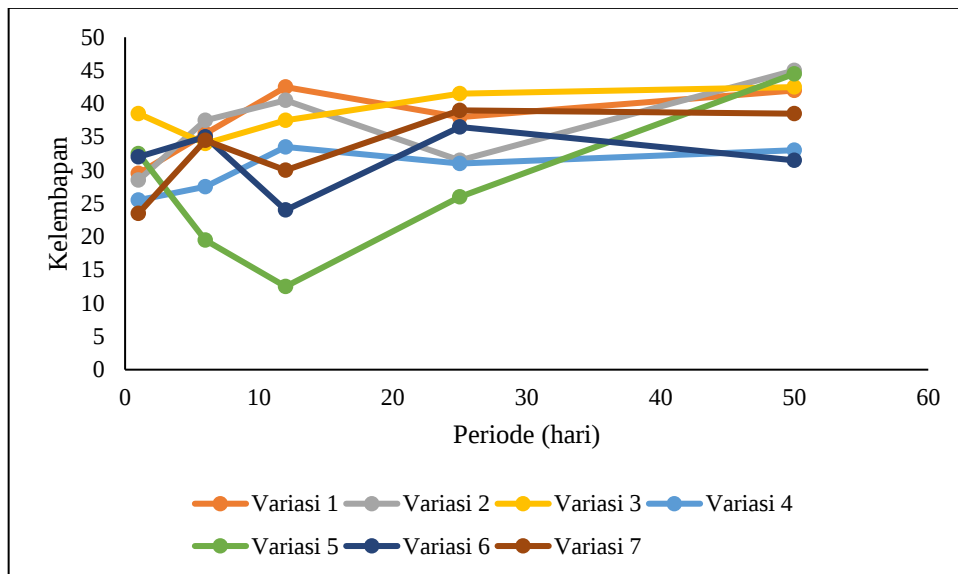
(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+biochar sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+biochar tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+biochar biopellet daun-ranting; variasi 5= biochar sekam padi+ Cd; variasi 6= biochar tempurung kelapa+ Cd; variasi 7= biochar biopellet daun-ranting+ Cd)

pH tanah pada seluruh variasi perlakuan berada pada kisaran basa lemah hingga basa, yaitu sekitar 7,8–9,1. Jika dibandingkan dengan kondisi optimal pertumbuhan tanaman, pH tanah ideal bagi tanaman berada pada kisaran 5,0–8,0. Hal ini dikarenakan pada rentang tersebut ketersediaan unsur hara dan aktivitas mikroorganisme tanah berada pada kondisi optimal (Gentili dkk., 2018). Akar wangi sendiri dikenal sebagai tanaman yang sangat toleran terhadap berbagai kondisi pH (3,3–9,5) sekaligus mampu memodifikasi kimia rizosfer melalui sekresi asam organik (Dhan dkk., 2009). Ketika pH tanah tinggi atau basa ($> 7,5$), ion Cd^{2+} dalam larutan tanah membentuk senyawa tidak larut seperti CdCO_3 (kadmium karbonat) dan $\text{Cd}(\text{OH})_2$ (kadmium hidroksida), sehingga fraksi Cd yang bioavailable menurun (Albert dkk., 2020). Aktivitas eksudat akar tanaman di zona

rizosfer dapat menurunkan pH tanah melalui sekresi asam organik, sehingga meningkatkan kelarutan Cd di sekitar akar meskipun pH tanah tetap basa. Aktivitas akar tanaman dapat memengaruhi pH tanah melalui dua proses yang berlangsung bersamaan. Akar melepaskan eksudat berupa asam organik, seperti asam sitrat, asam oksalat, dan asam malat, yang membantu melarutkan Cd sehingga lebih mudah tersedia bagi tanaman dan cenderung menurunkan pH rizosfer. Setelah Cd^{2+} terserap, akar menjaga keseimbangan muatan dengan melepaskan ion OH^- atau HCO_3^- ke tanah, sehingga konsentrasi H^+ berkurang dan pH meningkat (Seshadri dkk., 2015).

Pada penelitian ini, variasi 3 (tanaman + *biochar* tempurung kelapa) menunjukkan nilai pH yang paling stabil dan konsisten pada semua waktu pengamatan (hari ke-1, 6, 12, 25, 50), yaitu tetap pada angka 9,1 selama percobaan. Meskipun nilainya 9,1 sedikit basa, konsistensinya menunjukkan bahwa *biochar* tempurung kelapa mampu mempertahankan kestabilan kondisi tanah. Menurut Amoo dkk., (2026) *biochar* tempurung kelapa memiliki sifat alkalin (pH 9,2) yang hampir identik dengan pH akhir yang terukur di tanah. Kombinasi KTK tinggi dan porositas besar (68,7%) membuat kapasitas *buffer*-nya jauh melebihi jumlah asam organik yang dilepaskan oleh eksudat akar, sehingga setiap penurunan pH akibat aktivitas akar (asam sitrat, oksalat, malat) langsung dinetralkan kembali oleh gugus karboksil dan fenolik pada permukaan *biochar*. Inilah sebabnya nilainya tidak pernah turun meski ada tanaman aktif di media tersebut.

Variasi 5 (*biochar* sekam padi) menunjukkan fluktuasi pH paling besar, yaitu dari 9,0 (hari ke-1) turun drastis menjadi 7,8 (hari ke-12), kemudian naik kembali menjadi 8,75 dan 9,1. Hal ini dikarenakan perlakuan ini tidak melibatkan tanaman, sehingga tidak ada eksudat akar yang membantu menstabilkan pH melalui proses rizosfer. Ditambah, KTK sekam padi lebih rendah daripada tempurung kelapa, sehingga kapasitas *buffer*-nya jauh lebih lemah. Akibatnya, pH media lebih rentan terhadap dinamika mikroba dan reaksi kimia internal tanpa ada penahan dari sistem akar maupun dari *biochar* itu sendiri.



Gambar 4. 2 Kondisi Kelembapan pada Lingkungan Tanah setiap periode

(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+*biochar* sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+*biochar* tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+*biochar* biopellet daun-ranting; variasi 5= *biochar* sekam padi+ Cd; variasi 6= *biochar* tempurung kelapa+ Cd; variasi 7= *biochar* biopellet daun-ranting+ Cd)

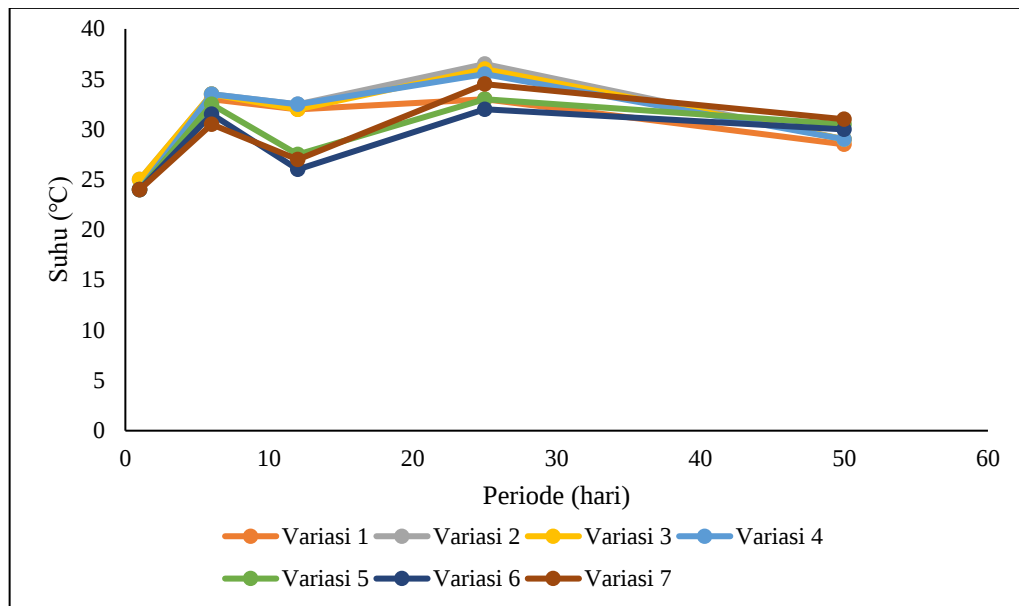
Kelembapan tanah selama penelitian berada pada kisaran 11% hingga 45%. Menurut Ilamsyah dkk. (2022) Sebagian besar tanaman tumbuh subur pada kelembapan 20%–60%. Namun, akar wangi dapat digunakan dalam kondisi keterbatasan air dan kualitas air yang rendah (di bawah optimum) (Dorafshan dkk., 2023). Kelembapan tanah berperan langsung dalam mengendalikan pergerakan Cd di dalam larutan tanah. Semakin tinggi kelembapan, semakin banyak air yang tersedia sebagai medium pelarut, sehingga ion Cd^{2+} semakin mudah bergerak (termobilisasi) menuju zona rizosfer.

Variasi 3 (tanaman+*biochar* tempurung kelapa) menunjukkan nilai kelembapan yang paling optimum, dengan kelembapan stabil meningkat secara konsisten sepanjang pengamatan (38,5%–42,5%) tanpa fluktuasi besar. Hal ini didukung oleh karakteristik *biochar* tempurung kelapa yang memiliki ukuran pori sekitar 10 μm , sehingga mampu menahan air yang tersedia bagi tanaman. Air biasanya mengisi pori berdiameter 0,5–50 μm sehingga meningkatkan retensi hara di dalam tanah (Estela dkk., 2018). Selain itu, struktur berporinya menyediakan permukaan tempat air berikatan, sehingga luas permukaan yang besar memungkinkan *biochar* tempurung kelapa menahan lebih banyak air per satuan volume tanah. Kehadiran tanaman turut memperkuat stabilitas ini karena sistem perakaran membantu

mempertahankan struktur makropori tanah agar distribusi air tetap merata (Ali dkk., 2025).

Sebaliknya, variasi 5 (*biochar* sekam padi) menunjukkan kondisi paling tidak optimal karena fluktuasi paling ekstrem dari 32,5% menjadi 12,5% (hari ke-12), lalu naik kembali ke 44,5% pada akhir pengamatan. Kondisi ini disebabkan oleh dominasi makropori pada *biochar* sekam padi sehingga air lebih cepat mengalami infiltrasi dan drainase (Lehmann & Joseph, 2009). Selain itu, *biochar* yang baru diaplikasikan umumnya masih bersifat hidrofobik sehingga kemampuan menyerap air belum optimal. Seiring proses *aging* melalui oksidasi permukaan dan siklus pembasahan dan pengeringan, permukaan *biochar* menjadi lebih hidrofilik sehingga kemampuan menyerap dan menahan air meningkat (Ivanova dkk., 2023). Kondisi tersebut menyebabkan kadar air tanah lebih mudah berubah mengikuti penambahan air maupun kehilangan air melalui evaporasi.

Fluktuasi kelembapan yang tinggi juga dipengaruhi oleh tidak adanya tanaman pada Variasi 5. Berbeda dengan perlakuan yang ditanami akar wangi, media tanpa tanaman tidak memiliki sistem perakaran yang dapat memperbaiki struktur tanah melalui pembentukan agregat maupun mempertahankan distribusi air di daerah rizosfer. Selain itu, ketiadaan tajuk tanaman menyebabkan permukaan tanah menerima radiasi matahari secara langsung sehingga laju evaporasi meningkat (Brady, 2016). Kombinasi antara sifat awal *biochar* yang belum sepenuhnya hidrofilik, dominasi makropori, dan tingginya evaporasi menyebabkan kelembapan tanah berubah secara ekstrem selama periode pengamatan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas *biochar* dalam mempertahankan kadar air tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik *biochar* itu sendiri, tetapi juga oleh keberadaan tanaman yang berperan dalam menstabilkan kondisi fisik tanah.



Gambar 4. 3 Suhu pada Kondisi Lingkungan Tanah setiap periode

(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+*biochar* sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+*biochar* tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+*biochar* biopellet daun-ranting; variasi 5= *biochar* sekam padi+ Cd; variasi 6= *biochar* tempurung kelapa+ Cd; variasi 7= *biochar* biopellet daun-ranting+ Cd)

Suhu tanah selama penelitian berkisar antara 24–36 °C. Suhu tanah yang optimal bagi pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikroorganisme tanah umumnya berada pada kisaran 20–35°C, dengan aktivitas mikroba optimal sekitar 25–30°C (Meilianto dkk., 2022). Suhu yang mencapai 36°C disebabkan oleh cuaca saat penelitian berlangsung, yaitu musim kemarau. Variasi 6 (*biochar* tempurung kelapa) menunjukkan perlakuan yang paling optimum karena memiliki suhu yang paling dekat dengan kisaran suhu optimum aktivitas mikroorganisme tanah, yaitu 25–30 °C, serta fluktuasi suhu yang paling kecil dibandingkan perlakuan lainnya, sehingga kondisi media cenderung lebih stabil. Menurut Khan dkk. (2024), *biochar* tempurung kelapa dapat meningkatkan kapasitas simpan air tanah dan memperbaiki sifat fisik tanah, sehingga perubahan suhu menjadi lebih lambat. Kemampuan *biochar* dalam mempertahankan air berperan sebagai penyangga termal (*thermal buffer*) yang membantu menstabilkan suhu tanah.

Sebaliknya, variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi) merupakan perlakuan yang paling tidak optimum karena memiliki suhu maksimum tertinggi, yaitu 36,5°C, yang telah melampaui batas atas suhu optimum pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikroorganisme tanah (20–35°C), serta fluktuasi suhu yang relatif besar sehingga kondisi media menjadi kurang stabil. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh

karakteristik *biochar* sekam padi yang memiliki kandungan abu dan silika yang tinggi. Menurut Wang dkk. (2016), kandungan silika yang tinggi pada *biochar* sekam padi dapat memengaruhi sifat fisik media serta kemampuan retensi air. Ketika retensi air menurun, media menjadi lebih mudah mengalami peningkatan suhu akibat paparan radiasi matahari, sehingga fluktuasi suhu menjadi lebih besar.

4.3.2 Respons Morfologi.

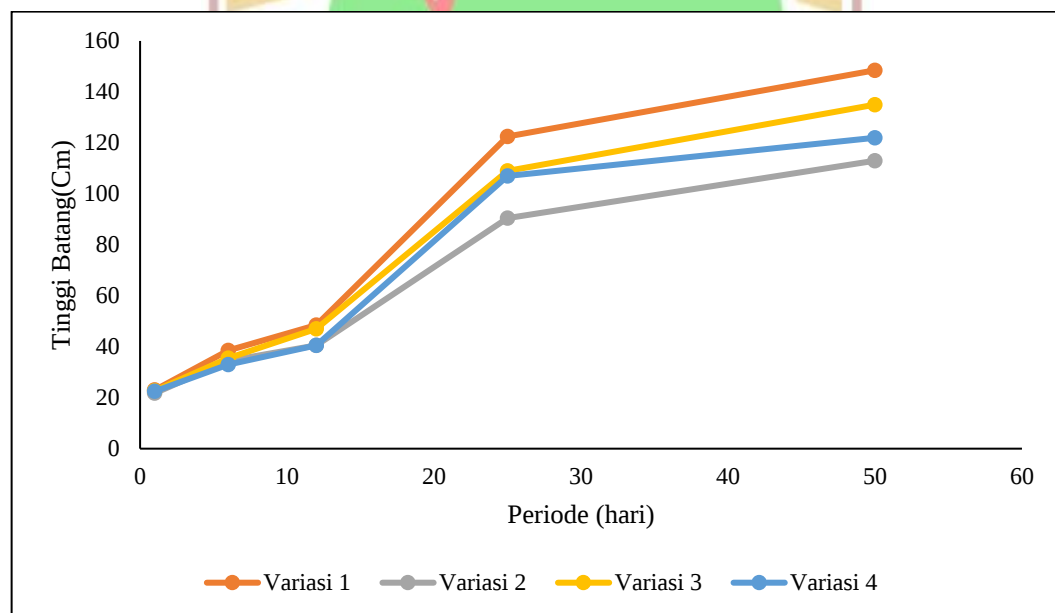
Respons morfologi tanaman akar wangi diamati melalui parameter tinggi batang selama periode fitoremediasi pada hari ke-1, 6, 12, 25, dan 50. Parameter ini digunakan sebagai indikator toleransi tanaman terhadap paparan Cd serta pengaruh perlakuan variasi *biochar* terhadap pertumbuhan tanaman. Pada awal penelitian, tinggi tanaman diseragamkan sebesar 20 cm untuk memastikan kondisi awal yang homogen pada seluruh perlakuan sehingga lebih merepresentasikan pengaruh variasi perlakuan. Tinggi batang tanaman setiap periode dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.

Variasi	Hari ke-1	Hari ke-6	Hari ke-12	Hari ke-25	Hari ke-50
1					
2					



Gambar 4. 4 Tinggi Batang pada Respons Morfologi Tanaman setiap periode

Hasil pengamatan tinggi batang tanaman dapat dilihat pada **Gambar 4.5.**



Gambar 4. 5 Tinggi Batang pada Respons Morfologi Tanaman setiap periode

(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+biochar sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+biochar tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+biochar biopelet daun-ranting)

Tinggi batang tanaman pada seluruh perlakuan menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya waktu pengamatan. Pertumbuhan tertinggi terjadi pada variasi 1 (tanaman), yaitu 125,5 cm, sedangkan yang paling rendah terjadi pada variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi). Akar wangi sendiri dikenal sebagai tanaman yang sangat toleran terhadap berbagai kondisi pH (3,3–9,5) sekaligus mampu

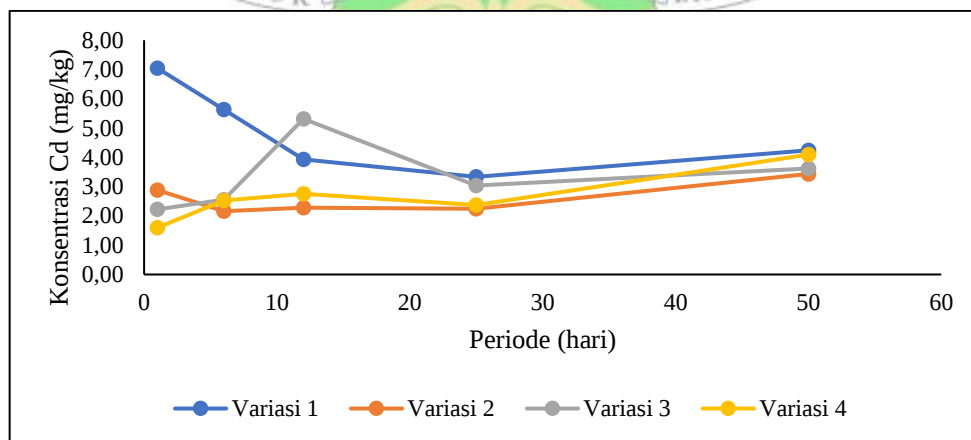
memodifikasi kimia rizosfer melalui sekresi asam organik (Dhan dkk., 2009). Namun, meskipun penambahan *biochar* mampu memperbaiki beberapa sifat fisik dan kimia tanah, pH tanah yang cukup tinggi juga berpotensi menurunkan ketersediaan beberapa unsur hara mikro yang esensial bagi pertumbuhan tanaman, terutama besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu). Pada kondisi tanah yang semakin basa, ion-ion tersebut lebih mudah mengalami presipitasi atau teradsorpsi pada permukaan koloid tanah sehingga konsentrasi dalam larutan tanah menurun dan menjadi kurang tersedia untuk diserap oleh akar. Penurunan ketersediaan unsur hara mikro tersebut menyebabkan laju pertumbuhan vegetatif menjadi lebih rendah dibandingkan perlakuan tanpa *biochar* (Brady, 2016).

4.4 Analisis Kemampuan Akar Wangi dalam Menyisihkan Cd serta Bioakumulasinya dengan Tambahan *Biochar* pada Tanah

Kemampuan tanaman akar wangi dalam menyerap, mengakumulasi, dan mentranslokasikan logam Cd dianalisis melalui pengukuran konsentrasi Cd pada media tanam dan jaringan tanaman, serta perhitungan nilai *Translocation Factor* (TF) dan *Bioaccumulation Factor* (BAF). Parameter tersebut digunakan untuk menentukan mekanisme fitoremediasi yang paling dominan.

4.4.1 Konsentrasi Logam Cd pada Tanah

Analisis penyisihan logam Cd pada tanah dilakukan untuk mengetahui perubahan konsentrasi Cd selama periode fitoremediasi. Konsentrasi Cd pada tanah dapat dilihat pada **Gambar 4.6**



Gambar 4.6 Konsentrasi Logam Cd pada Tanah

(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+*biochar* sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+*biochar* tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+*biochar* biopellet daun-ranting; variasi 5=

biochar sekam padi+ Cd; variasi 6= *biochar* tempurung kelapa+ Cd; variasi 7= *biochar* biopellet daun-ranting+ Cd)

Berdasarkan **Gambar 4.6**, variasi 1 (tanaman + Cd) menunjukkan penurunan kadar Cd tanah paling signifikan, dari 7,05 mg/kg menjadi 3,33 mg/kg selama 25 hari; peningkatan kembali pada hari ke-50 (4,24 mg/kg) diduga berkaitan dengan proses desorpsi. Sesuai dengan Amri & Adifa (2025), konsentrasi Cd di tanah dapat mengalami peningkatan karena adanya proses desorpsi, di mana logam Cd terlepas kembali ke dalam larutan tanah menjadi fase terlarut melalui pelepasan eksudat berupa asam organik oleh aktivitas akar tanaman. Kondisi ini menyebabkan konsentrasi Cd yang terukur dalam tanah dapat meningkat, meskipun secara keseluruhan logam tersebut diserap oleh tanaman. Desorpsi berperan positif dalam fitoekstraksi (menyediakan Cd agar diserap oleh tanaman), tetapi berperan negatif dalam fitostabilisasi (meningkatkan risiko penyebaran Cd ke lingkungan). Perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian lain dapat dilihat pada **Tabel 4.2**.

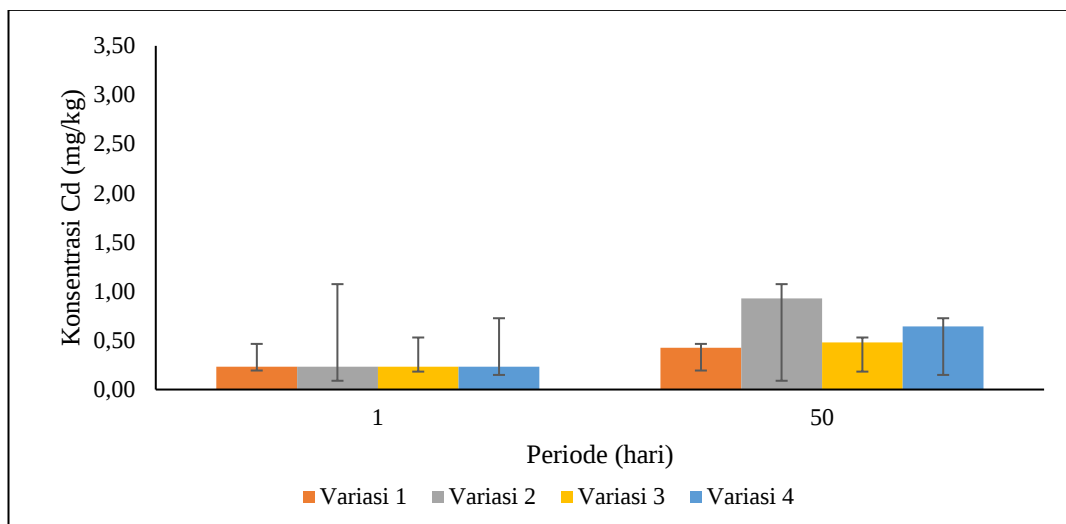
Tabel 4. 2 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Lain

Variasi	Hasil Penelitian Ini	Mekanisme Utama	Jurnal Pemandangan	Hasil Jurnal	Kesesuaian
V1 (Tanaman)	Cd tanah turun dari 7,05 → 3,33 mg/kg (hari ke-25), lalu naik ke 4,24 mg/kg (hari ke-50)	Fitoekstraksi aktif oleh tanaman; desorpsi eksudat asam organik akar menyebabkan remobilisasi Cd pada hari ke-50	(Amri & Adifa, 2025)	Pelepasan eksudat asam organik akar memicu desorpsi Cd dari fraksi terikat ke larutan tanah, meningkatkan konsentrasi Cd terukur	Sejalan, penurunan Cd konsisten dengan fitoekstraksi; peningkatan hari ke-50 sesuai mekanisme desorpsi rizosfer
V2 (<i>biochar</i> Sekam Padi)	Cd total tanah stabil (2,19–2,30) mg/kg hingga hari ke-25, kemudian naik moderat ke 3,48 mg/kg (hari ke-50)	Imobilisasi Cd ke fraksi residual oleh <i>biochar</i> ; Cd total terukur AAS tidak turun karena mencakup Cd terikat kuat di pori <i>biochar</i>	(Niu dkk., 2022)	(1) <i>biochar</i> sekam padi menurunkan Cd bioavailable ↓25% dan Cd biji gandum ↓31,2%	Sejalan, perbedaan pada metode: jurnal mengukur Cd bioavailable, penelitian ini mengukur Cd total (AAS) yang stabil karena Cd terikat kuat di <i>biochar</i>

Variasi	Hasil Penelitian Ini	Mekanisme Utama	Jurnal Pemanding	Hasil Jurnal	Kesesuaian
V3 (<i>biochar</i> Tempurung Kelapa)	Cd total naik paling ekstrem dari 2,22 → 5,32 mg/kg (hari ke-12, +140%), kemudian turun ke 3,20–3,54 mg/kg	Daya adsorpsi <i>biochar</i> tempurung kelapa sangat tinggi menarik Cd dari profil tanah ke permukaan <i>biochar</i> ; pengukuran AAS total menangkap akumulasi sementara ini	(Lan dkk., 2024)	<i>biochar</i> tempurung kelapa meningkatkan kandungan Cd tanah dari 0,05 menjadi 0,19 g/kg, diduga akibat stabilitas <i>biochar</i> , aktivitas mikroorganisme tanah, dan perubahan spesiasi Cd di dalam tanah	Sangat Sejalan, Cd total tanah meningkat setelah aplikasi <i>biochar</i> tempurung kelapa meskipun adsorpsi berlangsung,
V4 (<i>biochar</i> biopellet daun-ranting)	Cd awal terendah (1,62 mg/kg), naik bertahap ke 2,75 mg/kg (hari ke-12) dan 4,10 mg/kg (hari ke-50)	Imobilisasi awal kuat oleh <i>biochar</i> lignoselulosa; desorpsi lambat terjadi seiring aktivitas rizosfer tanaman dan waktu inkubasi	(Serrano dkk., 2024)	<i>biochar</i> daun/batang tanaman + <i>Lolium perenne</i> mempertahankan Cd tanah di bawah 1 mg/kg dan meningkatkan retensi logam berat di tanaman sebesar 11,6%	Sejalan, Cd awal rendah menunjukkan imobilisasi awal yang kuat. Kenaikan bertahap konsisten karena <i>biochar</i> lignoselulosa akibat aktivitas rizosfer.

4.4.2 Konsentrasi Logam Cd pada Akar Wangi

Distribusi logam Cd pada jaringan tanaman dianalisis untuk memahami mekanisme serapan dan translokasi logam selama proses fitoremediasi. Perbedaan akumulasi pada akar, batang, dan daun menunjukkan bahwa tanaman mengelola logam berat, mengurangi efek toksik serta mempertahankan fungsi fisiologisnya. Konsentrasi Cd pada akar, batang, dan daun dapat dilihat pada **Gambar 4.7-4.9**.

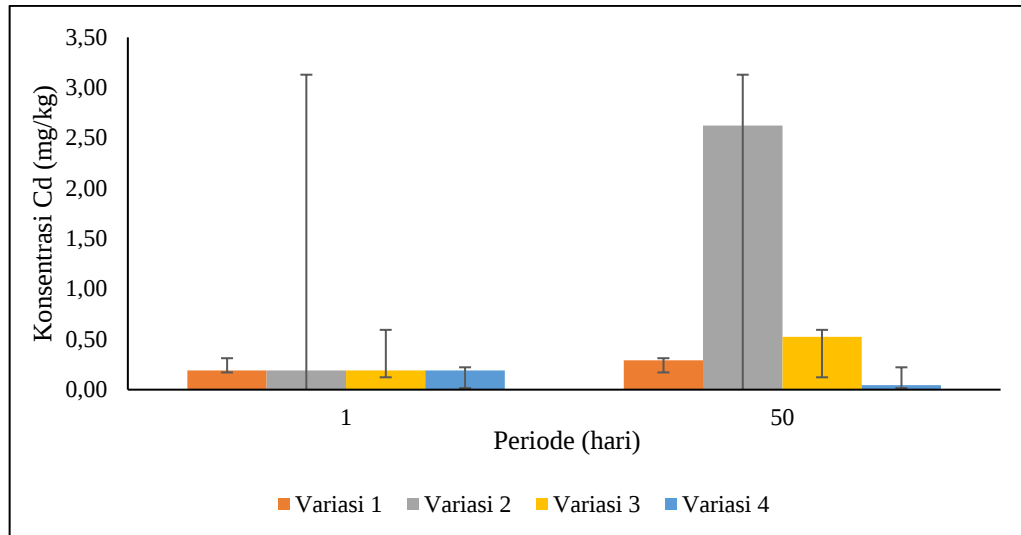


Gambar 4. 7 Konsentrasi Logam Cd pada Akar Tanaman

(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+*biochar* sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+*biochar* tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+*biochar* biopellet daun-ranting)

Berdasarkan **Gambar 4.7**, konsentrasi Cd pada akar meningkat pada seluruh perlakuan. Peningkatan tertinggi terjadi pada variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi) sebesar 0,93 mg/kg dan paling rendah pada variasi 1 (tanaman) sebesar 0,43 mg/kg. Penyerapan Cd oleh akar terjadi karena akar merupakan organ pertama yang bersentuhan langsung dengan Cd dalam larutan tanah. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Ali dkk. (2025) yang menyatakan bahwa sebagian besar logam berat cenderung terakumulasi pada sistem perakaran karena akar merupakan organ pertama yang bersentuhan langsung dengan logam dalam larutan tanah. Studi terbaru juga melaporkan bahwa akar wangi mampu mengakumulasi Cd dalam jumlah besar pada akar, menunjukkan peran pentingnya dalam imobilisasi logam di zona perakaran (Wu dkk., 2022). Rendahnya akumulasi Cd pada variasi 1 diduga karena tanpa *biochar*, sistem perakaran kurang berkembang akibat tidak adanya perbaikan porositas dan struktur tanah, sehingga kapasitas total akar dalam menyerap Cd relatif terbatas. Sebaliknya, tingginya akumulasi Cd di akar pada variasi 2 (tanaman+*biochar* sekam padi) yang tampak berlawanan dengan fungsi *biochar* sebagai pengimobilisasi logam berat melalui mekanisme *charosphere*, yaitu mikrolingkungan di sekitar partikel *biochar* yang meningkatkan karbon organik terlarut akibat *biochar* belum mengalami penuaan (*ageing*), sehingga terbentuk kompleks logam-organik yang meningkatkan mobilitas Cd bagi akar sebelum efek imobilisasi jangka panjangnya tercapai (Cui dkk., 2026). Kandungan silika (Si) yang tinggi pada *biochar* sekam padi turut berperan, karena

efektivitasnya dalam menekan serapan Cd sangat bergantung pada suhu pirolisis, sehingga pada kondisi tertentu justru dapat meningkatkan retensi Cd di jaringan akar sebelum translokasi ke tajuk tertekan secara efektif (Wang dkk., 2016),

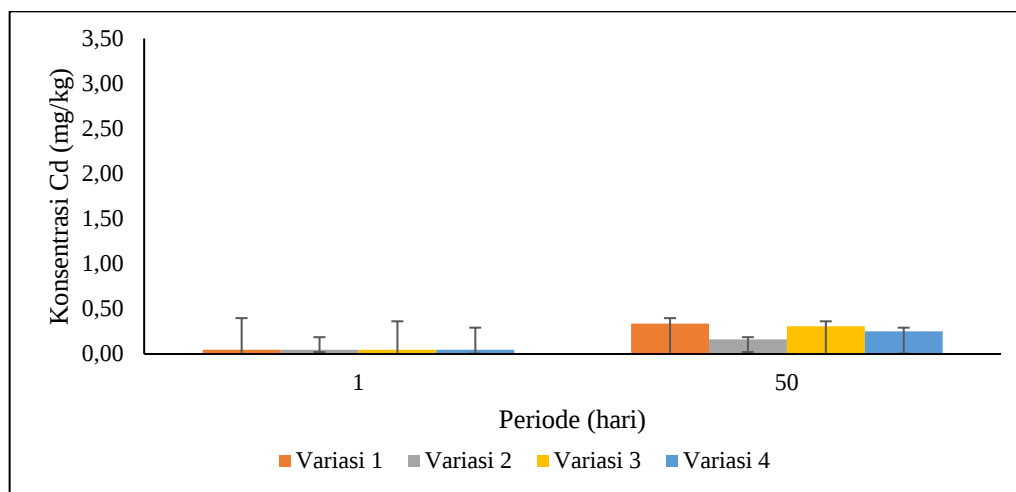


Gambar 4. 8 Konsentrasi Logam Cd pada Batang Tanaman

(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+*biochar* sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+*biochar* tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+*biochar* biopellet daun-ranting)

Konsentrasi Cd pada batang menunjukkan peningkatan pada beberapa perlakuan. Variasi 2 (tanaman+*biochar* sekam padi) menunjukkan peningkatan paling tinggi (2,63 mg/kg), dan variasi 4 (tanaman+*biochar* biopellet daun-ranting) menunjukkan nilai relatif rendah (0,05 mg/kg). Cd yang terdeteksi di batang adalah Cd yang berhasil tertranslokasi melalui aliran air dalam xilem, di mana ion logam yang berhasil masuk ke jalur simplastik akan terbawa menuju tajuk mengikuti aliran transpirasi (Yan dkk., 2020). Tingginya konsentrasi Cd batang pada variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi) menunjukkan bahwa terjadi mobilitas dan translokasi logam secara lebih aktif. Hal ini dikarenakan strukturnya didominasi oleh silika (SiO_2) yang bersifat kristalin dan inert, sehingga luas permukaan aktif *biochar* berkurang dan kemampuan adsorpsi ion logam Cd^{2+} menjadi lebih terbatas. Silika dari *biochar* sekam padi membantu mengikat sebagian Cd di dinding sel akar, namun justru mendorong sebagian Cd lainnya masuk ke jalur simplastik menuju xilem yang kemudian terangkut ke atas menuju batang melalui aliran transpirasi. Sebaliknya, rendahnya konsentrasi Cd pada batang variasi 4 dikarenakan, menurut Han dkk., (2024) *biochar* biopellet daun-ranting memiliki kapasitas adsorpsi Cd

tertinggi, yang mengindikasikan bahwa mekanisme penahanan logam lebih dominan di akar, sehingga translokasi ke bagian batang menjadi terbatas.



Gambar 4. 9 Konsentrasi Logam Cd pada Daun Tanaman

(Keterangan: variasi 1= Tanaman+Cd; variasi 2= tanaman+Cd+*biochar* sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+*biochar* tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+*biochar* biopellet daun-ranting)

Konsentrasi Cd pada daun meningkat pada semua perlakuan. Konsentrasi tertinggi terdapat pada variasi 1 (tanaman) (0,34 mg/kg) dan yang paling rendah yaitu variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi) (0,16 mg/kg). Variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi) yang memiliki Cd batang tertinggi justru memiliki Cd daun terendah, menunjukkan bahwa Cd tersimpan di sel-sel batang dan tidak bergerak lebih lanjut ke daun. Sebaliknya, variasi 1 (tanpa *biochar*) memiliki kadar Cd daun tertinggi karena tidak ada mekanisme imobilisasi tambahan dari *biochar*, sehingga Cd bergerak lebih bebas dari akar hingga ke daun melalui aliran transpirasi. Secara keseluruhan, akar merupakan organ dengan kandungan Cd tertinggi pada sebagian besar variasi. Pola distribusi Cd pada akar wangi ini, logam berat dikonsentrasikan di bagian bawah tanaman dan semakin berkurang ke arah atas, mencerminkan strategi perlindungan tanaman yang bertujuan menjaga organ fotosintetik dari efek toksik Cd sekaligus tetap menjalankan fungsi penyerapan logam dari tanah yang terkontaminasi (Angelova, 2025).

Tanaman akar wangi dikenal memiliki toleransi tinggi terhadap logam berat. Penelitian (Wu dkk., 2022) menunjukkan bahwa tanaman akar wangi masih dapat tumbuh normal hingga konsentrasi Cd 250 mg/kg pada akar tanpa menunjukkan gejala kematian. Pada penelitian ini, konsentrasi Cd dalam tanah maksimum mencapai sekitar 7 mg/kg (variasi 1 hari ke-1), yang masih jauh di bawah ambang

toksisitas bagi akar wangi. Mekanisme toleransi ini melibatkan sekuestrasi logam dalam vakuola sel akar sebagai mekanisme untuk membatasi translokasinya ke tajuk, eksklusi logam dari zona meristem akar melalui protein pengangkut, aktivasi enzim antioksidan yang menetralkan radikal bebas akibat stres logam, serta produksi *phytochelatins* yang mengikat Cd dalam bentuk tidak toksik (Priantoro dkk., 2025). Selama penelitian ini, selama 50 hari tidak ditemukan indikasi kematian akar atau gejala toksisitas berat yang mengonfirmasi toleransi tanaman terhadap kondisi percobaan.

4.4.3 Bioakumulasi Nilai *Translocation Factor* (TF)

Analisis *Translocation Factor* (TF) digunakan untuk mengevaluasi kemampuan tanaman dalam mentranslokasikan logam berat dari akar ke daun. Nilai TF diperoleh dari perbandingan konsentrasi Cd pada tajuk dengan konsentrasi Cd pada akar. Apabila nilai $TF > 1$, maka mekanisme yang dominan adalah fitoekstraksi, yang mengindikasikan bahwa tanaman mampu memindahkan logam dari akar ke bagian tajuk secara aktif. Sebaliknya, apabila nilai $TF < 1$, mekanisme yang dominan adalah fitostabilisasi, di mana logam lebih banyak tertahan di zona akar (Santana dkk., 2018). Analisis nilai TF pada tanaman dapat dilihat pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Analisis Nilai TF

Variasi	Konsentrasi Tajuk (mg/kg)	Konsentrasi Akar (mg/kg)	Nilai TF	Keterangan
1	0,63	0,43	1,48	Fitoekstraksi
2	2,79	0,93	3,00	Fitoekstraksi
3	0,83	0,48	1,74	Fitoekstraksi
4	0,30	0,64	0,46	Fitostabilisasi

Berdasarkan hasil perhitungan pada **Tabel 4.3**, sebagian besar perlakuan menunjukkan mekanisme fitoekstraksi ($TF > 1$), yaitu variasi 1 ($TF = 1,48$), variasi 2 ($TF = 3,00$), dan variasi 3 ($TF = 1,74$), sedangkan variasi 4 ($TF = 0,46$) menunjukkan mekanisme fitostabilisasi. Variasi 1 (tanaman) menunjukkan nilai $TF = 1,48$. Pada kondisi tanpa *biochar*, Cd berada dalam bentuk yang lebih bioavailable di larutan tanah sehingga lebih mudah diserap oleh akar dan ditranslokasikan ke daun melalui aliran transpirasi (Shadid dkk., 2016). Variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi) nilai TF mencapai 3,00, tertinggi di antara seluruh perlakuan. Hal ini dikarenakan *biochar* sekam padi yang mengandung silika tinggi dan kapasitas tukar

kation yang memodulasi ketersediaan Cd di zona perakaran secara bertahap, sehingga mendorong translokasi Cd lebih intensif melalui jaringan xilem menuju tajuk tanaman (Li dkk., 2023). Kondisi ini sejalan dengan pandangan Raza dkk. (2020) bahwa tanaman yang terpapar logam berat pada konsentrasi moderat dan teratur cenderung mengaktifkan jalur translokasi melalui jaringan xilem sebagai bagian dari mekanisme toleransi dan detoksifikasi, dengan mendistribusikan logam ke organ tajuk untuk dikurung dalam vakuola sel daun.

Variasi 3 (tanaman + *biochar* tempurung kelapa) juga menunjukkan $TF > 1$ ($TF = 1,74$). Meskipun *biochar* tempurung kelapa memiliki porositas tinggi dan daya adsorpsi yang kuat, eksudat akar berupa asam organik melarutkan sebagian Cd yang terikat pada permukaan *biochar* sehingga Cd kembali tersedia untuk diserap dan ditranslokasikan ke daun (Amri & Adifa, 2025). Satu-satunya variasi yang menunjukkan fitostabilisasi adalah variasi 4 (tanaman + *biochar* biopelet daun-ranting) dengan nilai $TF = 0,46$. *Biochar* berbasis biomassa organik kaya karbon labil cenderung meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan membentuk kompleks logam yang sulit larut melalui gugus fungsi $-COOH$ dan $-OH$, sehingga mobilitas Cd ke arah tajuk sangat terbatas dan akar menjadi kompartemen utama akumulasi logam (Yu dkk., 2021).

Nilai TF antarvariasi menunjukkan perbedaan yang mencerminkan ketersediaan Cd di rizosfer yang dikendalikan oleh karakteristik *biochar*. Nilai TF yang tinggi pada variasi 2 ($TF = 3,00$) tidak hanya menunjukkan bahwa tanaman lebih aktif dalam mengirim logam ke daun, melainkan juga adanya mekanisme pelepasan Cd secara reversibel oleh *biochar* sekam padi, sehingga translokasi berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, nilai TF yang rendah pada variasi 4 ($TF = 0,46$) mengindikasikan bahwa *biochar* biopelet daun-ranting bekerja sebagai penyangga yang efektif dalam mengurangi mobilitas Cd, sehingga logam lebih banyak terkonsentrasi di kompartemen akar dan tanah. Variasi 2 adalah pilihan terbaik untuk fitoekstraksi karena Cd terdistribusi ke bagian tajuk yang dapat dipanen. Sebaliknya, untuk tujuan fitostabilisasi jangka panjang (mengunci Cd di tanah agar tidak mencemari rantai makanan), variasi 4 dengan *biochar* biopelet daun-ranting lebih direkomendasikan.

4.4.4 Bioakumulasi Nilai *Bioaccumulation Factor* (BAF)

Nilai *Bioaccumulation Factor* (BAF) digunakan untuk menggambarkan kemampuan tanaman dalam menyerap dan mengakumulasi logam Cd dari tanah ke dalam jaringan tanaman. Berikut **Tabel 4.4** analisis nilai BAF.

Tabel 4. 4 Analisis Nilai BAF

Variasi	Bagian Tanaman	Konsentrasi	Konsentrasi Tanah	Nilai BAF	Keterangan
1	Akar	0,43	4,24	0,25	<i>Excluder</i>
	Batang	0,29			
	Daun	0,34			
2	Akar	0,93	2,99	1,24	Akumulator
	Batang	2,63			
	Daun	0,16			
3	Akar	0,48	3,15	0,42	<i>Excluder</i>
	Batang	0,53			
	Daun	0,31			
4	Akar	0,64	3,56	0,26	<i>Excluder</i>
	Batang	0,05			
	Daun	0,25			

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa hanya variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi) yang menunjukkan nilai BAF > 1 (akumulator), sedangkan variasi 1 (tanaman + Cd), 3 (tanaman + *biochar* tempurung kelapa), dan 4 (tanaman + *biochar* biopellet daun-ranting) seluruhnya menunjukkan nilai BAF < 1 (*excluder*). Nilai BAF > 1 menunjukkan bahwa tanaman mampu menyerap logam secara efektif dari tanah dan mengakumulasikannya dalam jaringan tanaman, sedangkan nilai BAF < 1 mengindikasikan bahwa tanaman cenderung membatasi serapan logam sebagai mekanisme perlindungan fisiologis (Santana dkk., 2018). Nilai BAF tertinggi pada variasi 2 menunjukkan bahwa penambahan *biochar* sekam padi meningkatkan kemampuan serapan Cd oleh tanaman. *Biochar* sekam padi memiliki kandungan silika (SiO₂) yang tinggi. Ikatannya dengan Cd bersifat reversibel akibat kandungan silika tinggi, sehingga Cd tetap terlepas ke larutan tanah dan mendukung fitoekstraksi oleh tanaman (TF = 3,00; BAF = 1,24 sebagai akumulator). Kondisi ini menciptakan siklus mobilisasi yang lebih efisien dibandingkan variasi lainnya. Meskipun kondisi pH pada variasi 2 (8,95–9,1) tinggi, fluktuasinya lebih kecil, sehingga keseimbangan Cd terlarut dan Cd terikat pada *biochar* lebih stabil. Selain itu, aktivitas akar (asam organik) yang dihasilkan tanaman melarutkan sebagian Cd

yang terikat pada *biochar* sekam padi dan secara bertahap meningkatkan ketersediaan Cd di rizosfer. Kombinasi faktor-faktor di atas menghasilkan akumulasi Cd pada tanaman yang melebihi konsentrasi Cd dalam tanah, sehingga $BAF > 1$ (Li dkk., 2021).

Sebaliknya, nilai $BAF < 1$ pada variasi 1 menunjukkan bahwa tanpa *biochar*, Cd berada dalam bentuk yang lebih mudah bergerak dan tersedia bagi tanaman, terutama dipengaruhi oleh pH tanah, kapasitas tukar kation, bahan organik, aktivitas mikroba, dan eksudat akar yang mengatur ketersediaan Cd di rizosfer (Zulfiqar dkk., 2022). Dalam kondisi ini, tanaman cenderung menghambat penyerapan Cd secara berlebihan sebagai bagian dari mekanisme pengindaran terhadap toksisitas logam berat (Haider dkk., 2021). Variasi 3 (tanaman + *biochar* tempurung kelapa) memiliki porositas tinggi dan karbon stabil yang mengikat Cd melalui adsorpsi dan pertukaran ion secara kuat dan ireversibel, sehingga Cd lebih banyak tertahan dalam matriks tanah daripada tersedia bagi tanaman (Pang dkk., 2025). Pada variasi 4, biopellet daun-ranting lebih berperan dalam meningkatkan bahan organik tanah dan aktivitas mikroba. Bahan organik membentuk kompleks stabil dengan Cd sehingga mendukung fitostabilisasi jangka panjang (Yu dkk., 2021). Penambahan *biochar* membantu menyisihkan Cd dari tanah, namun tidak menghilangkan Cd dari tanah, melainkan berperan dalam mengimobilisasi Cd melalui mekanisme fitostabilisasi dan fitoekstraksi, dengan efektivitas yang berbeda tergantung jenis *biochar* yang digunakan. Karakteristik dan peran *biochar* terhadap Cd dapat dilihat pada **Tabel 4.5**

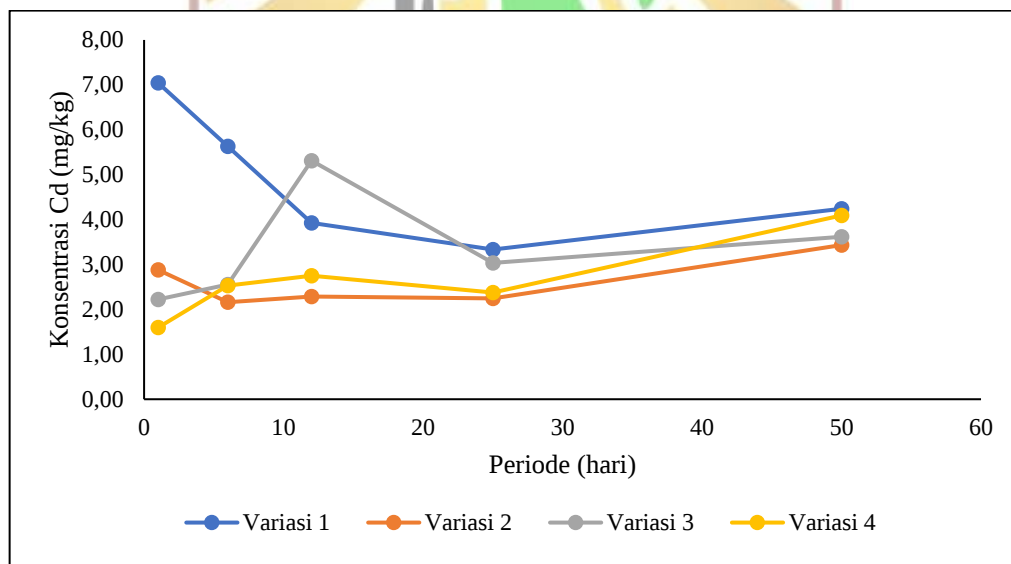
Tabel 4.5 Karakteristik dan peran *biochar* terhadap Cd

Variasi	Jenis <i>biochar</i>	Mekanisme (TF)	Status (BAF)	Karakteristik <i>biochar</i> Utama	Peran
1	Tanaman	Fitoekstraksi (TF = 1,48)	Excluder (BAF < 1)	–	Cd lebih mobile sehingga tanaman lebih banyak menyerap logam, namun akumulasi masih belum cukup untuk mencapai $BAF > 1$
2	<i>biochar</i> sekam padi	Fitoekstraksi (TF = 3,00)	Akumulat (BAF = 1,24)	Luas permukaan spesifik sedang, kandungan SiO_2 tinggi ($\pm 60\%$), pH alkali (~ 9), KTK rendah-sedang.	Meningkatkan pH tanah moderat, adsorpsi Cd melalui mekanisme ionik dan Si-O, mendukung $BAF > 1$ pada variasi 2.

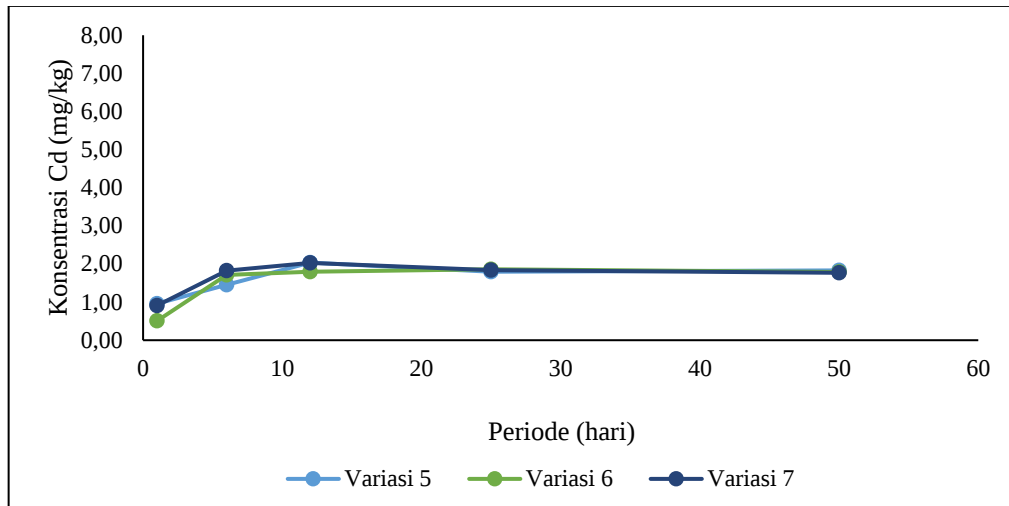
Variasi	Jenis <i>biochar</i>	Mekanisme (TF)	Status (BAF)	Karakteristik <i>biochar</i> Utama	Peran
3	<i>biochar</i> tempurung kelapa	Fitoe kstraksi (TF = 1,74)	<i>Excluder</i> (BAF < 1)	Luas permukaan spesifik tinggi (karbon aktif tinggi), pH sangat alkali (~10–11), KTK tinggi.	Adsorpsi Cd kuat dan stabil, meningkatkan pH lebih signifikan, cenderung mengurangi bioavailabilitas Cd — cocok sebagai agen stabilisasi (imobilisasi).
4	<i>biochar</i> biopellet daun-ranting	Fitostabilisasi (TF = 0,46)	<i>Excluder</i> (BAF < 1)	Kandungan mineral dan N lebih tinggi, gugus fungsi organik lebih beragam, pH alkali moderat.	Meningkatkan bahan organik tanah dan mendukung aktivitas mikroba, tetapi efek adsorpsi Cd lebih rendah dibandingkan dengan dua <i>biochar</i> lainnya.

4.5 Analisis Peran Berbagai Jenis *Biochar* dalam Perubahan Konsentrasi Cd pada Tanah

Penelitian ini menganalisis peran berbagai jenis *biochar* terhadap perubahan kadar Cd dalam tanah. Parameter yang diamati adalah perubahan konsentrasi Cd pada tanah selama periode pengamatan pada variasi 2–7. Konsentrasi Cd pada tanah dengan variasi *biochar*, dengan dan tanpa tanaman, dapat dilihat pada **Gambar 4.10**.



(a)



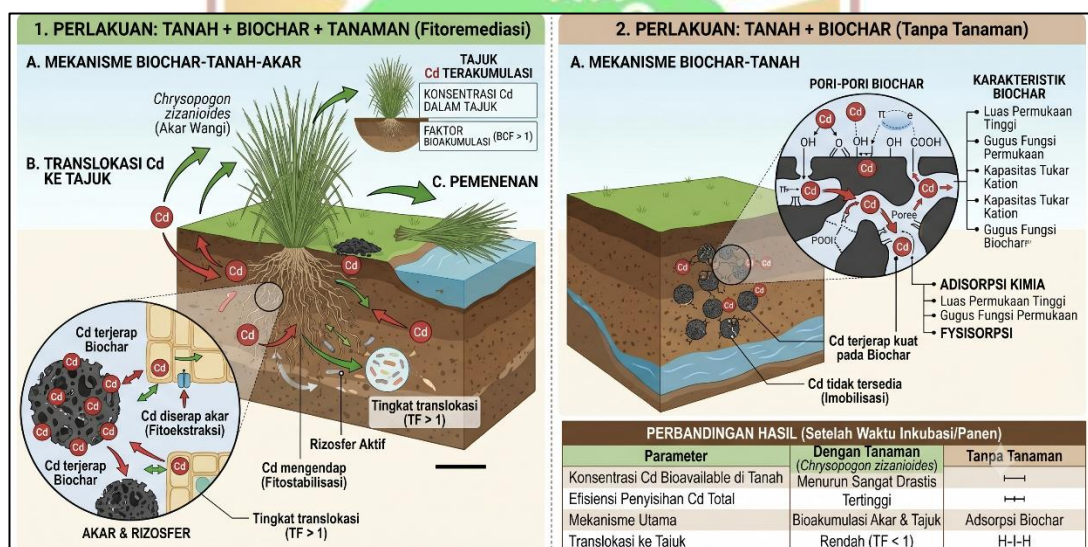
Gambar 4. 10 Konsentrasi Cd pada tanah dengan Variasi *biochar* (a) dengan tanaman; (b) tanpa tanaman

(Keterangan: variasi 2= tanaman+Cd+*biochar* sekam padi; variasi 3= tanaman+Cd+*biochar* tempurung kelapa; variasi 4= tanaman+Cd+*biochar* biopellet daun-ranting; variasi 5= *biochar* sekam padi+ Cd; variasi 6= *biochar* tempurung kelapa+ Cd; variasi 7= *biochar* biopellet daun-ranting+ Cd)

Berdasarkan **Gambar 4.10** secara keseluruhan, konsentrasi Cd pada tanaman ($\pm 1,6$ – $7,05$ mg/kg) lebih tinggi dibandingkan tanpa tanaman ($\pm 0,5$ – $2,0$ mg/kg). Hal ini disebabkan oleh aktivitas akar pada tanaman. Aktivitas akar tanaman dapat memodifikasi pH tanah di zona rizosfer melalui dua mekanisme keseimbangan kimiawi yang saling berlawanan. Pertama, mekanisme penurunan pH (asidifikasi) terjadi saat akar secara aktif melepaskan eksudat berupa asam organik (seperti asam sitrat, malat, dan oksalat) atau ketika akar menyerap kation hara seperti amonium (NH_4^+) yang dikompensasi dengan pelepasan proton (H^+) ke lingkungan sekitarnya. Kondisi perakaran yang menjadi lebih asam ini mendorong terjadinya adsorpsi dan pelepasan (desorpsi) logam berat dari partikel tanah ke fase cair, sehingga Cd larut dan bioavailabilitasnya meningkat, dan lebih mudah diserap oleh tanaman. Inilah yang menyebabkan konsentrasi Cd pada tanah mengalami fluktuasi. Kedua, mekanisme peningkatan pH (alkalisasi) terjadi ketika akar menyerap anion dari tanah, seperti nitrat (NO_3^-), yang kemudian ditukar dengan ekskresi ion bikarbonat (HCO_3^-) oleh tanaman ke lingkungan sekitarnya untuk menyeimbangkan hilangnya muatan di dalam sel, sehingga pH di sekitar rizosfer meningkat menjadi lebih basa (Seshadri dkk., 2015).

Pada penelitian ini, pH tanah yang tinggi (7,8–9,1) menunjukkan bahwa mekanisme alkalinisasi akibat pertukaran ion pada akar lebih dominan

dibandingkan pelepasan eksudat asam. Meskipun demikian, keberadaan tanaman tetap mendorong desorpsi Cd melalui eksudat asam, sehingga konsentrasi Cd dengan tanaman tetap lebih tinggi dibandingkan tanpa tanaman. Berdasarkan jenisnya, *biochar* sekam padi dan biopellet menunjukkan kinerja yang lebih stabil dalam menekan konsentrasi Cd, sedangkan *biochar* tempurung kelapa menunjukkan fluktuasi yang lebih tinggi pada sistem dengan tanaman. hal ini karena silika pada *biochar* sekam padi mempunyai afinitas tinggi terhadap Cd melalui pembentukan kompleks Cd-Si-O yang stabil, sedangkan karbon aromatik pada *biochar* tempurung kelapa lebih dominan bekerja melalui adsorpsi fisik. Akibatnya kapasitas adsorpsi serta ketahanan ikatannya berbeda. Mekanisme Cd pada tanah yang tercemar dengan tambahan *biochar*, dengan dan tanpa tanaman, dapat dilihat pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4. 11 Mekanisme Cd dengan Tambahan *Biochar* dengan Tanaman dan Tanpa Tanaman

Sumber: Generated by Gemini

Ketiga jenis *biochar* dalam penelitian ini diproduksi melalui proses pirolisis pada suhu 300–500 °C dengan pasokan oksigen terbatas. Suhu pirolisis memengaruhi sifat fisik dan kimia *biochar* yang menentukan kemampuannya dalam mengimobilisasi Cd. Gugus fungsi utama yang terbentuk selama proses pirolisis meliputi gugus hidroksil (–OH), karboksil (–COOH), karbonil (C=O), serta struktur karbon aromatik. Gugus hidroksil berperan dalam proses pertukaran ion dengan kation Cd^{2+} , sedangkan gugus karboksilat mampu membentuk kompleks dengan logam berat sehingga meningkatkan kapasitas retensi Cd pada permukaan *biochar*.

Gugus karbonil turut berkontribusi pada interaksi kimia antara logam dan permukaan *biochar*, sementara struktur karbon aromatik memberikan stabilitas jangka panjang terhadap degradasi di dalam tanah.

Meskipun diproduksi pada suhu pirolisis yang sama, perbedaan bahan baku menghasilkan komposisi gugus fungsi dan karakteristik permukaan yang berbeda. *Biochar* sekam padi umumnya kaya akan kandungan silika dan gugus oksigen aktif yang mendukung adsorpsi ion logam secara reversibel (Gautam dkk., 2023). Karakteristik ini menyebabkan Cd tetap tersedia dalam jumlah tertentu sehingga masih dapat diserap oleh tanaman. Hal tersebut sejalan dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa *biochar* sekam padi memiliki kinerja paling optimal dalam mendukung mekanisme fitoekstraksi.

Biochar tempurung kelapa memiliki kandungan karbon aromatik yang lebih tinggi dan struktur yang lebih stabil, sehingga kemampuan adsorpsinya terhadap Cd cenderung lebih kuat (Pang dkk., 2025). Adsorpsi yang kuat menyebabkan Cd lebih banyak terikat pada permukaan *biochar*, sehingga mobilitas logam berkurang. Kondisi ini menjelaskan fluktuasi konsentrasi Cd yang relatif tinggi pada sistem dengan tanaman akibat adanya kompetisi antara proses adsorpsi oleh *biochar* dan pelepasan kembali Cd ke larutan tanah oleh aktivitas akar.

Biochar biopelet daun-ranting mengandung bahan organik yang lebih labil dengan gugus fungsi aktif yang lebih beragam, seperti $-COOH$ dan $-NH_2$. Karakteristik tersebut mendukung proses kompleksasi organik dan stabilisasi logam di dalam tanah. Oleh karena itu, *biochar* biopelet cenderung lebih efektif dalam mekanisme fitostabilisasi dibandingkan fitoekstraksi (Liu dkk., 2022). Perbedaan karakteristik masing-masing *biochar* menunjukkan bahwa bahan baku dan proses pirolisis sangat memengaruhi efektivitas *biochar* dalam mengendalikan mobilitas dan bioavailabilitas Cd di dalam tanah (Han dkk., 2024). Peran *biochar* dalam imobilisasi Cd dapat dilihat pada **Tabel 4.6**

Tabel 4. 6 Peran *biochar* dalam imobilisasi Cd

Jenis <i>biochar</i>	Gugus Fungsi Utama	Peran dalam Imobilisasi Cd	Sumber
<i>Biochar</i> Sekam Padi	$-OH$, $Si-O-Si$, $-COOH$	Memiliki kandungan silika (SiO_2) yang tinggi dan gugus oksigen aktif yang	(Gautam dkk., 2023)

Jenis <i>biochar</i>	Gugus Fungsi Utama	Peran dalam Imobilisasi Cd	Sumber
		mendukung adsorpsi, pertukaran ion, dan kompleksasi Cd^{2+} yang menurunkan mobilitas logam.	
<i>Biochar</i> Tempurung Kelapa	C=C aromatik, -OH, C=O	Memiliki gugus oksigen (-OH, C=O, -COOH) berperan sebagai situs aktif yang membentuk kompleks dengan Cd^{2+} , sedangkan struktur aromatik membantu adsorpsi permukaan sehingga Cd lebih banyak terikat pada permukaan <i>biochar</i> dan mobilitasnya menurun.	(Pang dkk., 2025)
<i>Biochar</i> Biopellet Daun-Ranting	-COOH, -NH ₂ , C=O	Mengandung bahan organik yang lebih labil dengan gugus fungsi aktif yang lebih beragam, kompleksasi logam dan adsorpsi reversibel, lebih efektif dalam mekanisme fitostabilisasi dibandingkan fitoekstraksi.	(Liu dkk., 2022)

4.6 Evaluasi Kinerja Komparatif dari Semua Variasi Perlakuan Terhadap Perubahan Konsentrasi Cd dari Tanah

Evaluasi kinerja *biochar* dilakukan untuk mengetahui efektivitas masing-masing jenis *biochar* dalam menurunkan konsentrasi Cd dalam tanah selama periode fitoremediasi. Kinerja komparatif semua variasi perlakuan terhadap perubahan konsentrasi Cd pada tanah dapat dilihat pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4. 7 Kinerja komparatif semua variasi perlakuan terhadap perubahan konsentrasi Cd pada tanah.

Variasi	C _{awal}	C _{akhir}	Efisiensi (%)	Perubahan tinggi batang	pH	Kelembapan (%)	Suhu (°C)	TF	BAF
1	7,05	4,24	0,40	125,5	8,9-9,1	29,5-42,5	25,5-36	Fitoekstraksi	Excluder

Variasi	C _{awal}	C _{akhir}	Efisiensi (%)	Perubahan tinggi batang	pH	Kelembapan (%)	Suhu (°C)	TF	BAF
2	2,51	2,99	-0,19	91,25	8,95-9,1	28,5-45	24-33	Fitoekstraksi	Akumulator
3	1,94	3,15	-0,63	112,25	9,1	37,5-42,5	25-36,5	Fitoekstraksi	<i>Excluder</i>
4	1,39	3,56	-1,57	99,5	8,7-9,1	25,5-33,5	25-36	Fitostabilisasi	<i>Excluder</i>
5	0,84	1,60	-0,91	-	7,8-9,1	12,5-44,5	24-33	-	-
6	0,44	1,56	-2,52	-	8,4-9,1	24-36,5	24-32	-	-
7	0,79	1,54	-0,94	-	9,05-9,1	23,5-39	24-34,5	-	-

Berdasarkan **Tabel 4.7** dari parameter efisiensi penyisihan Cd, variasi 1 (tanaman) merupakan variasi yang paling efektif dalam menurunkan konsentrasi Cd dari tanah, dengan efisiensi penyisihan sebesar 40% (7,05 mg/kg menjadi 4,24 mg/kg) selama 50 hari. Ini merupakan satu-satunya variasi yang menunjukkan nilai efisiensi positif di antara seluruh perlakuan. Hal ini mengonfirmasi bahwa tanaman akar wangi merupakan agen utama penyisihan Cd dari tanah melalui mekanisme fitoekstraksi, yaitu penyerapan langsung Cd dari tanah ke dalam jaringan tanaman dan translokasi ke tajuk.

Tidak adanya *biochar* pada variasi 1 justru menjadi keuntungan dalam konteks penyisihan total Cd, karena Cd tetap berada dalam bentuk bioavailable di larutan tanah sehingga lebih mudah diserap oleh akar. Pertumbuhan batang variasi 1 juga paling tinggi (125,5 cm), menunjukkan bahwa tanpa *biochar*, kondisi fisiologis tanaman lebih mendukung biomassa yang lebih besar, yang secara langsung berkontribusi pada kapasitas penyerapan logam yang lebih tinggi. Nilai BAF < 1 pada variasi 1 mengindikasikan bahwa tanaman berperilaku sebagai *excluder*, yang berarti konsentrasi Cd dalam jaringan tanaman masih lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi Cd di tanah. Meskipun demikian, mekanisme ini mengelola distribusi logam sedemikian rupa sehingga organ fotosintetik tetap terlindungi. Nilai TF < 1 menunjukkan bahwa sebagian besar Cd yang diserap dipertahankan di akar, yang merupakan strategi fitostabilisasi parsial, namun secara keseluruhan proses fitoekstraksi tetap dominan mengingat efisiensi penyisihan totalnya positif.

Kombinasi tanaman akar wangi dengan *biochar* sekam padi (variasi 2) memberikan kinerja terbaik dalam akumulasi Cd pada jaringan tanaman. Variasi ini memiliki

nilai BAF = 1,24 dan TF tertinggi = 3,00, yang mengklasifikasikannya sebagai *akumulator*, satu-satunya di antara semua variasi tanaman. Artinya, konsentrasi Cd yang terakumulasi dalam jaringan tanaman melebihi konsentrasi Cd dalam tanah, yang merupakan karakteristik ideal untuk fitoekstraksi dengan amandemen tambahan. Konsentrasi Cd pada batang variasi 2 juga merupakan yang tertinggi (2,63 mg/kg), mengindikasikan mobilitas dan translokasi Cd yang lebih aktif dari akar menuju tajuk.

Mekanisme ini dapat dijelaskan oleh karakteristik *biochar* sekam padi yang didominasi kandungan silika (SiO_2) dengan kapasitas adsorpsi yang lebih terbatas dibandingkan jenis *biochar* lainnya, sehingga sebagian Cd tetap tersedia dalam larutan tanah dan dapat diserap lebih banyak oleh akar. Meskipun konsentrasi Cd di tanah pada variasi 2 meningkat dari 2,51 mg/kg menjadi 2,99 mg/kg (efisiensi negatif -0,19), hal ini disebabkan oleh loading Cd dari air penyiraman yang mengandung Cd sebesar 0,41 mg/kg secara kontinu selama 50 hari. Namun demikian, peningkatan konsentrasi Cd di tanah variasi 2 merupakan yang paling kecil di antara seluruh variasi dengan *biochar*, yang mengindikasikan bahwa meskipun tanaman tidak mampu menurunkan total Cd di tanah secara bersih (akibat beban Cd dari air penyiraman), akumulasi Cd dalam jaringan tanaman berlangsung paling intensif pada variasi ini.

Nilai pH yang berkisar antara 7,8–9,1 (basa) akibat penambahan *biochar* berperan dalam menurunkan kelarutan dan bioavailabilitas Cd melalui proses presipitasi dan adsorpsi, sedangkan kelembapan tanah (20%–60%) memengaruhi mobilitas Cd, di mana kelembapan rendah cenderung meningkatkan akumulasi lokal, dan suhu tanah (24–36°C) relatif tidak memberikan pengaruh signifikan. Perbandingan variasi efisiensi terbaik dapat dilihat pada **Tabel 4.8**

Tabel 4. 8 Perbandingan Variasi Efisiensi Terbaik dengan Penelitian Lain.

Sumber / Penelitian	Perlakuan	Efisiensi Cd (%)	pH Tanah	TF	BAF/BCF	Kategori
(Variasi 1)	Akar wangi + Cd,	40%	8,9–9,1	1,48	0,25	Fitoekstraksi, <i>Excluder</i>
Gharmakher dkk. (2021)	Akar wangi +Cd	53,2%	6,5–7,5	<1	~1,0	Fitoekstraksi Akumulasi

Sumber / Penelitian	Perlakuan	Efisiensi Cd (%)	pH Tanah	TF	BAF/BCF	Kategori
Soil & Sediment Contam.						dominan di akar

Berdasarkan **Tabel 4.8**, penelitian Gharmakher dkk. (2021) melaporkan bahwa akar wangi mampu menyerap Cd dari tanah dengan rata-rata 248,3 mg/kg atau setara dengan 53,2% efisiensi penyisihan. Angka ini jauh di atas variasi 1 (0,40%). Perbedaan ini disebabkan oleh kondisi pH tanah yang sangat berbeda. Penelitian Gharmakher bekerja pada pH 6,5–7,5, sementara variasi 1 berada pada pH 8,9–9,1. Pada pH basa ekstrem, Cd mengendap sebagai $\text{Cd}(\text{OH})_2$ atau CdCO_3 sehingga ketersediaan logam menjadi sangat rendah.

Secara keseluruhan, ini menunjukkan adanya *trade-off* antara fitoekstraksi dan fitostabilisasi pada seluruh variasi perlakuan. Variasi tanpa *biochar* (variasi 1) unggul dalam penyisihan Cd total dari tanah karena Cd tetap berada dalam bentuk bioavailabel sehingga mudah diserap oleh akar, namun translokasinya ke tajuk relatif terbatas ($\text{TF} < 1$). Sebaliknya, penambahan *biochar* sekam padi (variasi 2) menurunkan efisiensi penyisihan Cd total dari tanah (efisiensi negatif), tetapi justru meningkatkan translokasi dan akumulasi Cd pada jaringan tanaman ($\text{TF} = 3,00$; $\text{BAF} = 1,24$). Hal ini terjadi karena *biochar* sekam padi, dengan gugus silika yang lebih dominan dibandingkan gugus karbon aromatik, memiliki kapasitas adsorpsi Cd yang relatif lebih lemah sehingga sebagian Cd tetap berada dalam larutan tanah dan dapat diserap oleh akar, alih-alih terikat secara permanen pada permukaan *biochar*. Dengan demikian, tidak terdapat variasi yang unggul pada kedua mekanisme tersebut. Pemilihan strategi fitoremediasi perlu disesuaikan dengan tujuan akhir, yaitu menurunkan konsentrasi Cd total di tanah (fitoekstraksi oleh tanaman tanpa *biochar*) atau menstabilkan dan menahan Cd pada jaringan tanaman untuk pemanenan lebih lanjut (kombinasi tanaman dengan *biochar* sekam padi).

4.7 Neraca Massa Kadmium(Cd)

Neraca massa Cd disusun untuk mengevaluasi keseimbangan massa Cd, sehingga dapat diketahui distribusi Cd pada media tanah, tanaman dan air penyiraman. Hasil perhitungan ini memberikan gambaran mengenai efisiensi perpindahan Cd selama

proses fitoremediasi sekaligus menunjukkan adanya kehilangan massa Cd (Cd loss) pada penelitian. Neraca massa Cd dapat dilihat pada **Tabel 4.9**

Tabel 4. 9 Neraca Massa Cd.

Va ria si	Cd awal tanah (mg)	Cd awal tanaman (mg)	Cd Air awal (mg)	Cd akhir tanah (mg)	Cd akhir tanaman (mg)	Cd akhir Air	Cd loss (mg)	Recov ery (%)
1	7,05	0,0014	0,00098	4,24	0,0051	0,049	2,755	60,9
2	2,88	0,0003	0,00098	3,43	0,0191	0,049	-	121,4
3	2,22	0,0005	0,00098	3,62	0,0077	0,049	-	165,5
4	1,60	0,0005	0,00098	4,09	0,0052	0,049	-	258,8
5	0,96	0,0000	0,00098	1,83	0,0000	0,049	-	195,5
6	0,51	0,0000	0,00098	1,79	0,0000	0,049	-	359,9
7	0,91	0,0000	0,00098	1,77	0,0000	0,049	-	199,7

Berdasarkan **Tabel 4.9** pada variasi 1, nilai Cd loss positif (+2,8036 mg) menunjukkan terjadinya penyerapan oleh tanaman. Namun, pada variasi 2–7, nilai Cd loss yang negatif mengindikasikan bahwa total massa Cd pada akhir percobaan lebih besar daripada massa Cd pada awal percobaan. Kondisi ini diduga disebabkan oleh ketidakseragaman distribusi Cd di media tanah, sehingga subsampel yang diambil tidak representatif, serta kemungkinan adanya kontribusi Cd dari media tambahan seperti *biochar*. Selain itu, air penyiraman tanaman berperan dalam penelitian ini, karena air penyiraman mengandung logam Cd dan setelah 50 hari air penyiraman tanaman terakumulasi memengaruhi hasil neraca massa. Untuk mengevaluasi validitas neraca massa secara kuantitatif, dihitung persentase *recovery* ($\text{Output/Input} \times 100\%$) untuk setiap variasi, sebagaimana disajikan pada **Tabel 4.9**. Neraca massa dinyatakan valid apabila nilai *recovery* berada dalam rentang 95–105%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *recovery* variasi 1 sebesar 60,9%, sedangkan variasi 2–7 berturut-turut sebesar 121,4%; 165,5%; 258,8%; 195,5%; 359,9%; dan 199,7%. Seluruh variasi berada di luar rentang 95–105%, sehingga neraca massa pada penelitian ini belum sepenuhnya valid dan *closure error* yang terjadi perlu dijelaskan. *Recovery* variasi 1 yang berada di bawah 95% (60,9%) mengindikasikan adanya Cd yang tidak terhitung dalam Output, kemungkinan disebabkan oleh pengambilan subsampel tanah secara destruktif yang tidak sepenuhnya merepresentasikan distribusi Cd pada seluruh volume polybag akibat heterogenitas media, efisiensi ekstraksi/digesti yang tidak mencapai 100%

sehingga sebagian Cd yang terikat kuat pada matriks tanah tidak terukur oleh AAS, dan kemungkinan Cd yang tercuci (*leaching*) melalui air drainase, mengingat pada variasi ini Cd berada dalam bentuk paling bioavailable tanpa adanya *biochar* yang mengimobilisasinya.

4.8 Uji Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui apakah variasi perlakuan yang diberikan dalam penelitian ini memberikan perbedaan yang signifikan antarperlakuan. Parameter penelitian yang diamati meliputi konsentrasi Cd, pH tanah, kelembapan tanah, suhu tanah, dan tinggi tanaman.

4.8.1 Uji One-Way ANOVA

Metode statistik yang digunakan adalah uji *One-Way Analysis of Variance* (ANOVA). Pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Apabila nilai *P-value* $< 0,05$, maka terdapat perbedaan signifikan antarperlakuan terhadap parameter yang diamati. Sebaliknya, apabila *P-value* $> 0,05$, maka tidak terdapat perbedaan signifikan antarvariasi perlakuan. Uji signifikansi *One Way ANOVA* dapat dilihat pada **Tabel 4.10**

Tabel 4. 10 Uji Signifikansi One Way ANOVA

Parameter	P-Value	Keterangan
Konsentrasi Cd	0,00	Signifikan
pH	0,194	Tidak Signifikan
Kelembapan	0,275	Tidak Signifikan
Suhu	0,934	Tidak Signifikan
Tinggi tanaman	0,001	Signifikan

Berdasarkan hasil analisis ANOVA yang disajikan pada **Tabel 4.10**, diperoleh nilai signifikansi yang berbeda pada setiap parameter pengamatan. Parameter konsentrasi Cd dan tinggi tanaman menunjukkan nilai *P-value* $< 0,05$, sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan signifikan pada variasi perlakuan terhadap konsentrasi Cd dan tinggi tanaman. Sementara itu, parameter pH tanah, kelembapan tanah, dan suhu tanah menunjukkan nilai *P-value* $> 0,05$, sehingga variasi perlakuan tidak menunjukkan perbedaan signifikan terhadap parameter tersebut.

4.8.2 Uji Lanjut *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT)

Setelah diketahui bahwa terdapat perbedaan signifikan antarperlakuan berdasarkan uji ANOVA, diperlukan uji lanjut (*post hoc test*) untuk mengetahui secara lebih rinci perlakuan mana yang berbeda nyata. Dalam penelitian ini, uji lanjut yang digunakan adalah *Duncan Multiple Range Test* (DMRT). Uji Duncan hanya dilakukan pada parameter yang menunjukkan perbedaan signifikan pada uji ANOVA, yaitu konsentrasi Cd dan tinggi tanaman. Hal ini karena apabila suatu parameter tidak menunjukkan perbedaan signifikan pada uji ANOVA, maka rata-rata antarperlakuan dianggap tidak berbeda secara statistik sehingga tidak diperlukan analisis lanjutan.

1. Uji *Duncan* Konsentrasi Cd pada Tanah

Berikut merupakan hasil analisis statistik uji lanjut Duncan pada konsentrasi Cd di tanah untuk melihat perbedaan yang signifikan antarperlakuan, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4. 11 Analisis Statistik Uji Lanjut DMRT Konsentrasi Cd pada Tanah

Variasi	P-Value	Post Hoc DMRT
1	0,000	e
2		bcd
3		d
4		cd
5		abc
6		ab
7		abc

Berdasarkan hasil uji *One-Way ANOVA*, diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,000 ($p < 0,05$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada konsentrasi Cd tanah antarvariasi perlakuan. Dengan demikian, konsentrasi Cd yang diperoleh pada masing-masing variasi tidak sama secara statistik. Untuk mengetahui perlakuan mana yang berbeda secara nyata, dilakukan uji lanjut DMRT pada taraf signifikansi 5%. Berdasarkan hasil uji Duncan, variasi 5 (*biochar* sekam padi), variasi 6 (*biochar* tempurung kelapa), dan variasi 7 (*biochar* biopelet daun-ranting) berada pada kelompok dengan konsentrasi Cd tanah terendah (1,60 mg/kg–1,75 mg/kg). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa ketiga variasi tersebut tidak berbeda nyata satu sama lain, tetapi berbeda nyata dengan kelompok yang memiliki konsentrasi Cd lebih tinggi. Rendahnya konsentrasi Cd pada ketiga variasi tersebut

disebabkan oleh tidak adanya tanaman, sehingga tidak terjadi aktivitas akar maupun pelepasan eksudat akar yang dapat memicu desorpsi Cd dari permukaan *biochar*. Akibatnya, Cd yang telah teradsorpsi tetap terikat oleh *biochar*.

Sebaliknya, variasi 1 (tanpa *biochar*) membentuk kelompok tersendiri dengan konsentrasi Cd tertinggi (5,80 mg/kg), yang menunjukkan perbedaan nyata dibandingkan sebagian besar variasi lainnya. Kondisi ini terjadi karena tidak adanya matriks adsorben yang dapat mengimobilisasi Cd, sehingga sebagian besar Cd tetap tersedia di dalam tanah meskipun sebagian telah diserap oleh tanaman. sementara itu, variasi 2 (tanaman + *biochar* sekam padi), variasi 6 (tanaman + *biochar* tempurung kelapa), dan variasi 4 (tanaman + *biochar* biopellet daun-ranting) berada pada kelompok tengah, yang mencerminkan keseimbangan antara proses adsorpsi Cd oleh *biochar* dan pelepasan kembali sebagian Cd akibat aktivitas eksudat akar. Oleh karena itu, konsentrasi Cd pada kelompok ini berada pada tingkat menengah dan menunjukkan perbedaan nyata terhadap kelompok dengan konsentrasi Cd tertinggi maupun terendah. Pola pengelompokan hasil DMRT tersebut menunjukkan bahwa perbedaan signifikan yang terdeteksi oleh ANOVA berasal dari perbedaan konsentrasi Cd antarkelompok perlakuan yang terbentuk akibat dominasi proses adsorpsi oleh *biochar* atau desorpsi yang dipengaruhi oleh aktivitas akar tanaman.

2. Uji Duncan pada Tinggi Tanaman

Berikut merupakan hasil analisis statistik uji lanjut Duncan pada tinggi tanaman untuk melihat perbedaan yang signifikan antar perlakuan dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Analisis Statistik Uji Lanjut DMRT pada Tinggi Tanaman

Variasi	P-Value	Post Hoc DMRT
1	0,001	a
2		a
3		a
4		a
5		b
6		b
7		b

Berdasarkan hasil analisis statistik menggunakan *One-Way* ANOVA, diperoleh nilai p-value sebesar 0,001($p < 0,05$). Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada tinggi tanaman antarvariasi perlakuan. Untuk

mengetahui kelompok perlakuan yang memiliki perbedaan nyata, dilakukan uji lanjut *Duncan Multiple Range Test* pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Hasil DMRT menunjukkan adanya dua kelompok homogen, yaitu kelompok a dan b.

Kelompok b terdiri atas variasi 5, 6, dan 7, yang memiliki nilai rata-rata tinggi tanaman 0 cm karena pada perlakuan tersebut tidak ditanami akar wangi. Oleh karena itu, ketiga variasi tersebut tidak berbeda nyata satu sama lain, tetapi berbeda nyata dibandingkan dengan seluruh perlakuan yang ditanami akar wangi. Sedangkan, kelompok a (variasi 1, 2, 3, dan 4) menunjukkan variasi tinggi tanaman antara 60,05–76,20 cm dengan variasi 1 tanpa *biochar* mencapai tinggi tertinggi (76,20 cm), sedangkan ketiga variasi ber*biochar* (2, 3, dan 4) tumbuh lebih rendah, dengan variasi 2 (*biochar* sekam padi) terendah (60,05 cm).

Pola ini terjadi karena dua mekanisme yang bekerja dalam arah yang berlawanan. Pertama, pada variasi 1, Cd berada dalam bentuk paling *bioavailable* karena tidak ada *biochar* yang mengimobilisasinya, sehingga paparan Cd pada taraf tersebut memicu respons hormesis, yaitu tanaman mengaktifkan jalur toleransi logam berat yang justru menstimulasi pemanjangan batang sebagai bentuk adaptasi terhadap stres, sejalan dengan sifat akar wangi yang sangat toleran terhadap rentang pH yang lebar (3,3–9,5) (Dhan dkk., 2009). Kedua, pada variasi 2–4, penambahan *biochar* memang menekan bioavailabilitas Cd melalui peningkatan pH dan adsorpsi permukaan, tetapi peningkatan pH tanah ke arah basa (7,8–9,1) yang melampaui kisaran optimal pertumbuhan (pH 5,0–8,0) turut menurunkan ketersediaan hara esensial serta aktivitas mikroorganisme tanah (Gentili dkk., 2018).

Variasi 2 tumbuh paling rendah karena *biochar* sekam padi memiliki kandungan silika tertinggi di antara ketiga jenis *biochar*, yang menurunkan kemampuan media dalam menahan air dan hara bagi akar (Wang dkk., 2016). Dengan demikian, signifikansi hasil ANOVA pada parameter tinggi tanaman tidak hanya mencerminkan perbedaan keberadaan tanaman (kelompok a dan b), tetapi juga mengonfirmasi bahwa di antara perlakuan bertanaman sekalipun, keseimbangan antara penurunan toksisitas Cd dan penurunan ketersediaan hara akibat *biochar* menjadi faktor penentu utama laju pertumbuhan tinggi tanaman akar wangi selama proses fitoremediasi.

