

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

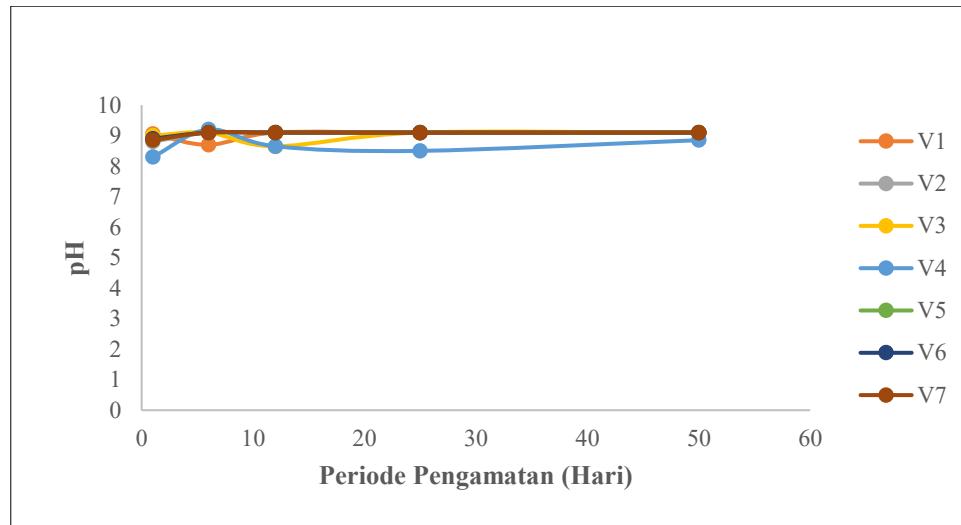
4.1 Umum

Pelaksanaan penelitian fitoremediasi pada tanah tercemar timbal (Pb) menggunakan tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides* L.) dengan penambahan variasi *biochar* sebagai pendukung dalam proses fitoremediasi. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental pada skala laboratorium menggunakan media *polybag* berisi tanah yang tercemar Pb artifisial dengan konsentrasi 200 mg/kg, yang diberi perlakuan berupa tiga jenis *biochar*, yaitu *biochar* tempurung kelapa, sekam padi, dan daun ranting. Penelitian diawali dengan fase aklimatisasi tanaman, kemudian dilanjutkan dengan fase fitoremediasi yang seluruhnya dilaksanakan di *greenhouse* yang berada di depan Reservoir, Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas. Selama periode pengamatan hingga 50 hari, dilakukan pemantauan terhadap konsentrasi Pb, kondisi tanah, serta respon morfologi tanaman. Proses preparasi dan destruksi sampel tanah dilakukan di Laboratorium Air dan Laboratorium Penelitian Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, sebelum dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

4.2 Kondisi Lingkungan Tanah

Kondisi lingkungan tanah selama pelaksanaan penelitian fitoremediasi, yang meliputi pH, kelembapan, dan suhu tanah. Pengukuran parameter ini dilakukan secara berkala pada setiap variasi perlakuan untuk mengetahui kondisi media tanam selama proses fitoremediasi berlangsung serta memastikan bahwa lingkungan tanah berada pada kondisi yang relatif seragam dan mendukung pertumbuhan tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides* L.). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai pH, kelembapan, dan suhu tanah selama periode pengamatan cenderung stabil dan berada pada kisaran yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman dan aktivitas *biochar* dalam tanah.

Perubahan pH tanah untuk semua variasi perlakuan selama 50 hari periode pengamatan dapat dilihat pada **Gambar 4.1** berikut.



Gambar 4. 1 Grafik pH Tanah

Keterangan:

Variasi 1 : Tanaman + Pb

Variasi 2 : Tanaman + Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 3 : Tanaman + Pb + *Biochar* sekam padi

Variasi 4 : Tanaman + Pb + *Biochar* daun ranting

Variasi 5 : Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 6 : Pb + *Biochar* sekam padi

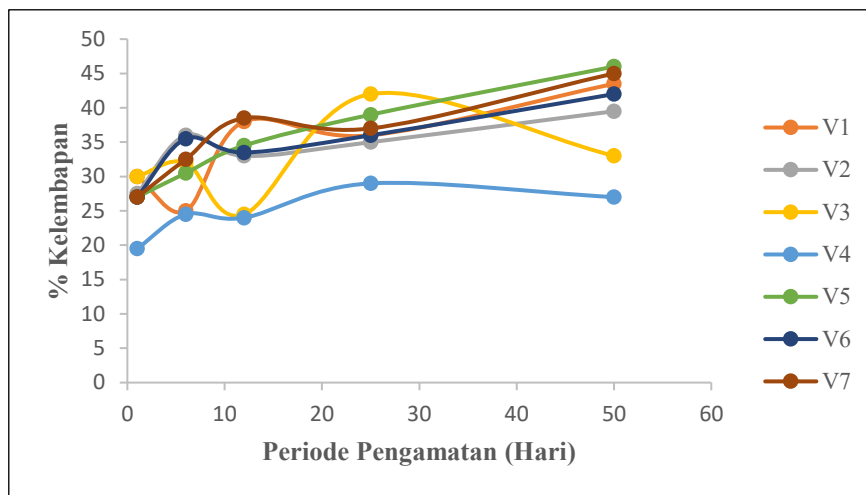
Variasi 7 : Pb + *Biochar* daun ranting

Berdasarkan grafik hasil pengukuran pH pada setiap variasi dan periode pengamatan, dapat diketahui bahwa pH tanah umumnya berada pada kondisi basa dan cenderung stabil sepanjang penelitian. Pada hari ke-1 pengamatan masih terlihat adanya perbedaan nilai pH antar perlakuan, yaitu berkisar antara 8,3 hingga 9,05. Namun, mulai hari ke-6 sampai hari ke-50 nilai pH pada hampir seluruh perlakuan menjadi relatif sama, yakni berada di sekitar 9,1. Kondisi ini menunjukkan bahwa media telah mencapai keadaan yang stabil sehingga perlakuan yang diberikan tidak menyebabkan perubahan pH yang berarti dari waktu ke waktu. Meskipun demikian, pada variasi ke-4 masih tampak adanya fluktuasi pH yang sedikit lebih rendah dibandingkan perlakuan lainnya, yaitu berkisar antara 8,5–9,2, namun tetap termasuk dalam kategori basa.

Berdasarkan penjelasan dari Khalid dkk. (2017), tanah dengan pH yang terlalu rendah dapat meningkatkan kelarutan logam sehingga berpotensi meningkatkan toksisitas bagi tanaman, sedangkan pada pH yang terlalu tinggi logam cenderung terpresipitasi sehingga sulit diserap oleh tanaman. Oleh karena itu, kondisi tanah dengan pH netral umumnya lebih mendukung proses fitoremediasi karena logam masih cukup tersedia untuk diserap tanaman tanpa menyebabkan stres berlebihan pada tanaman. Dan pada penelitian Truong (2008) Tanaman akar wangi tahan terhadap logam berat, salinitas dan dapat tumbuh pada pH antara 3,3-12,5 sehingga tanaman akar wangi tetap bisa tumbuh dengan baik pada rentang tanah tersebut.

Berdasarkan hasil penelitian Truong (2008) rentang pH setiap variasi perlakuan adalah antara 3,3-12,5. Berdasarkan hasil pengukuran pH tanah, seluruh perlakuan menunjukkan kondisi basa dengan kisaran pH 8,5–9,2. Namun variasi 4 memiliki nilai pH paling rendah yaitu 8,85 pada hari ke-50 sehingga relatif lebih mendekati netral, kondisi ini yang mendukung ketersediaan logam bagi tanaman. Rendahnya pH pada Variasi 4 dapat disebabkan sebagai efek gabungan dari, sifat *biochar* daun ranting yang secara alami kurang alkalis akibat kadar abu dan kation basa yang lebih rendah dibanding *biochar* tempurung kelapa dan sekam padi (Puspita dkk., 2021) serta aktivitas eksudat akar tanaman akar wangi yang melepaskan asam organik selama proses penyerapan Pb (Irhamni dkk., 2017). Semua pH berada pada rentang 3-11,5, sehingga tanaman akar wangi tetap dapat tumbuh dengan dengan baik.

Perubahan kelembapan tanah untuk semua variasi perlakuan selama 50 hari periode pengamatan dapat dilihat pada **Gambar 4.2** berikut.



Gambar 4. 2 Grafik Kelembapan Tanah

Keterangan:

Variasi 1 : Tanaman + Pb

Variasi 2 : Tanaman + Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 3 : Tanaman + Pb + *Biochar* sekam padi

Variasi 4 : Tanaman + Pb + *Biochar* daun ranting

Variasi 5 : Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 6 : Pb + *Biochar* sekam padi

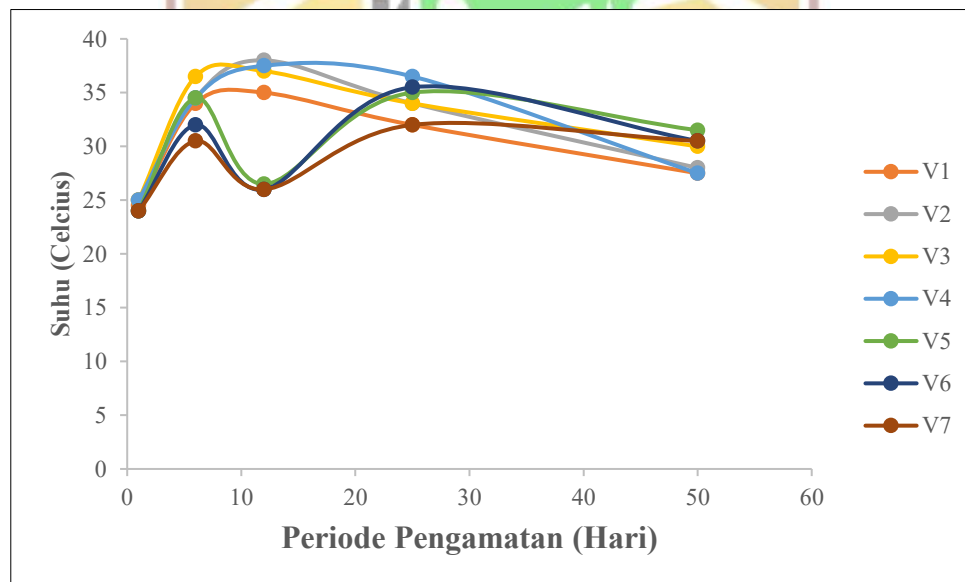
Variasi 7 : Pb + *Biochar* daun ranting

Berdasarkan grafik hasil pengukuran kelembapan tanah pada setiap variasi pada periode pengamatan, dapat diketahui bahwa nilai kelembapan mengalami perubahan selama penelitian namun masih berada pada rentang yang mendukung pertumbuhan tanaman. Pada hari pertama, kelembapan tanah relatif rendah pada seluruh perlakuan, kemudian meningkat pada hari ke-6 hingga hari ke-50 dengan nilai yang bervariasi antar perlakuan. Beberapa variasi menunjukkan peningkatan kelembapan yang cukup tinggi hingga akhir pengamatan, seperti variasi 5 dan 7, sedangkan variasi 4 cenderung memiliki kelembapan paling rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi ini dipengaruhi oleh posisi media tanam yang berada pada bagian terluar *greenhouse* sehingga menerima paparan radiasi matahari yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Peningkatan radiasi matahari dapat meningkatkan suhu media tanam dan laju evaporasi, sehingga kandungan air dalam tanah berkurang lebih cepat (Allen dkk., 1998). Selain itu, *biochar* daun ranting (biomassa tanaman) memiliki struktur pori yang didominasi oleh mesopori dan makropori yang dapat meningkatkan pergerakan serta

drainase air dalam media tanam. Sementara itu, variasi 3 yang menggunakan *biochar* sekam padi juga menunjukkan kelembapan yang relatif rendah. Kondisi ini diduga berkaitan dengan karakteristik pori *biochar* sekam padi yang memengaruhi distribusi dan retensi air di dalam tanah. Menurut Blanco-Canqui (2021), pengaruh *biochar* terhadap kelembapan tanah sangat bergantung pada karakteristik pori *biochar* dan kondisi lingkungan tempat penelitian. Selain itu, ukuran pori dan luas permukaan *biochar* berperan penting dalam proses penyimpanan dan pergerakan air di dalam tanah (Lehmann & Joseph, 2015).

Hasil pengukuran kelembapan selama periode penelitian adalah 20 - 46%. Menurut Ilamsyah dkk., (2021), sebagian besar tanaman tumbuh subur pada kelembapan 20% – 60%. Sehingga kelembapan tanah selama periode masuk ke dalam rentang kelembapan tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman akar wangi.

Perubahan suhu tanah untuk semua variasi perlakuan selama 50 hari periode pengamatan dapat dilihat pada **Gambar 4.3** berikut.



Gambar 4. 3 Grafik Suhu Tanah

Keterangan:

Variasi 1 : Tanaman + Pb

Variasi 2 : Tanaman + Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 3 : Tanaman + Pb + *Biochar* sekam padi
Variasi 4 : Tanaman + Pb + *Biochar* daun ranting
Variasi 5 : Pb + *Biochar* tempurung kelapa
Variasi 6 : Pb + *Biochar* sekam padi
Variasi 7 : Pb + *Biochar* daun ranting

Berdasarkan grafik hasil pengukuran, suhu tanah selama penelitian berada pada kisaran yang relatif stabil, yaitu dari 24 – 38°C. Suhu cenderung meningkat pada awal hingga pertengahan pengamatan, kemudian menurun dan kembali stabil pada akhir penelitian. Perubahan suhu ini tidak dipengaruhi secara signifikan oleh perlakuan, melainkan oleh kondisi lingkungan. Fluktuasi suhu juga berkaitan dengan perubahan musim, yaitu awal penelitian berlangsung pada musim kemarau, pertengahan penelitian memasuki musim hujan, dan akhir penelitian kembali pada kondisi kemarau. Secara umum, kisaran suhu tersebut masih mendukung pertumbuhan tanaman dan proses fitoremediasi.

Akar wangi (*Chrysopogon zizanioides* L.) merupakan tanaman rumput menahun yang memiliki adaptabilitas tinggi, namun pertumbuhan optimalnya sangat dipengaruhi oleh kondisi termal tanah. Agar sistem perakarannya dapat berkembang dengan maksimal dan memproduksi minyak atsiri yang berkualitas, akar wangi membutuhkan suhu tanah dalam rentang 25°C hingga 35°C. Meskipun tanaman ini masih mampu bertahan pada fluktuasi suhu yang ekstrem, pertumbuhan biomassa akar akan melambat secara signifikan jika suhu tanah turun di bawah 15°C, karena suhu yang hangat sangat krusial untuk memacu aktivitas metabolik dan pemanjangan sel pada jaringan akarnya (Mahmoudpour dkk., 2021).

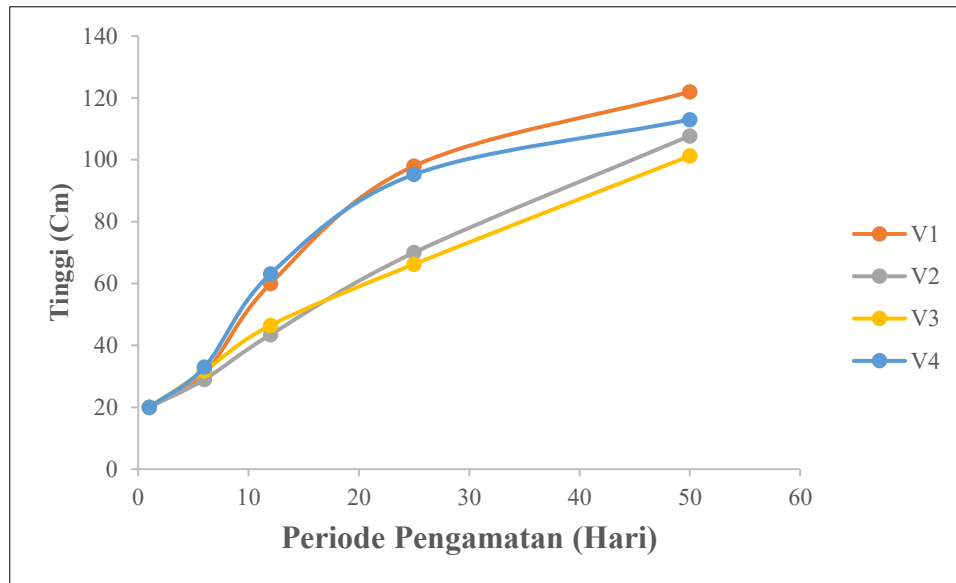
Hasil Pengukuran suhu tanah yaitu, 24–38°C walaupun ada hasil pengukuran di luar rentang hasil penelitian dari Mahmoudpour dkk. (2021) tanaman akar wangi tetap tumbuh dengan baik dari awal penelitian sampai akhir penelitian.

4.3 Analisis Respon Morforlogi Setiap Variasi Perlakuan

Respon morfologi tanaman akar wangi *Chrysopogon zizanioides* L. selama proses fitoremediasi yang diamati melalui tinggi batang pada setiap variasi perlakuan. Data yang digunakan merupakan hasil pengukuran secara berkala setiap periode pengambilan

sampel, sehingga dapat menggambarkan perubahan pertumbuhan tanaman pada media tanah tercemar Pb dengan penambahan berbagai jenis *biochar*. Analisis respon morfologi ini dilakukan untuk menilai kemampuan adaptasi dan pertumbuhan tanaman.

Perubahan tinggi tanaman akar wangi untuk variasi 1-4 selama 50 hari periode pengamatan dapat dilihat pada **Gambar 4.4** berikut.



Gambar 4. 4 Grafik Tinggi Batang Akar Wangi

Keterangan:

Variasi 1 : Tanaman + Pb

Variasi 2 : Tanaman + Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 3 : Tanaman + Pb + *Biochar* sekam padi

Variasi 4 : Tanaman + Pb + *Biochar* daun ranting

Tinggi tanaman akar wangi untuk variasi 1-4 di awal periode pengamatan sampai akhir periode pengamatan yaitu, hari ke-50 dapat dilihat pada **Tabel 4.1** berikut.

Tabel 4. 1 Perubahan Tinggi Tanaman Akar Wangi

Variasi 1	
Day 1	Day 50
	

Variasi 2	
Day 1	Day 50
	
Variasi 3	
Day 1	Day 50
	
Variasi 4	
Day 1	Day 50
	

Berdasarkan data morfologi tanaman akar wangi, pertumbuhan tanaman ditinjau dari parameter tinggi batang menunjukkan perbedaan antar variasi perlakuan. Pada parameter tinggi batang, variasi V1 menunjukkan pertumbuhan terbaik dengan tinggi mencapai 122 cm pada hari ke-50, diikuti oleh V4 (113 cm) dan V2 (107,75 cm). Sementara itu, pertumbuhan terendah terdapat pada V3 (101,25 cm). Perlakuan pada V1 memberikan kondisi yang paling mendukung pertumbuhan tinggi tanaman dibandingkan variasi lainnya. Hal ini dapat disimpulkan bahwa penambahan *biochar* tidak menghasilkan pertumbuhan tanaman yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan tanpa *biochar*.

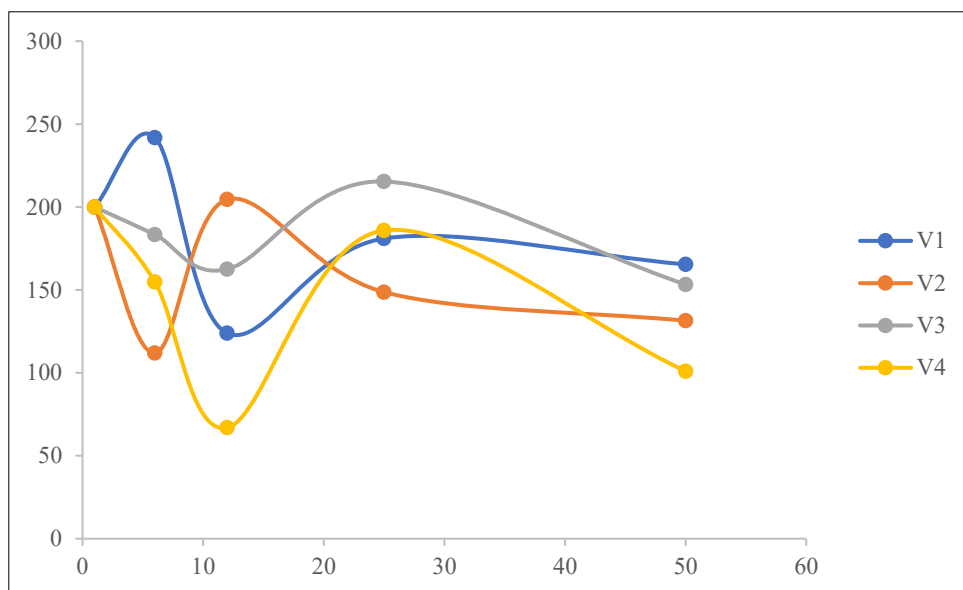
Berdasarkan hasil penelitian, penambahan *biochar* pada variasi V2, V3, dan V4 tidak menghasilkan tinggi tanaman lebih tinggi dibandingkan variasi tanpa *biochar* (V1). Hal ini menunjukkan bahwa *biochar* tidak selalu berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan tanaman, khususnya parameter tinggi tanaman (Tong dkk., 2021). Kondisi ini dapat terjadi karena tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides* L.) memiliki toleransi tinggi terhadap logam Pb, sehingga tetap mampu tumbuh optimal tanpa penambahan *biochar*. Selain itu, *biochar* berperan dalam mengimobilisasi logam Pb, sehingga menurunkan ketersediaannya bagi tanaman. Penurunan bioavailabilitas ini dapat mengurangi respon fisiologis tanaman yang berkaitan dengan pertumbuhan, sehingga tinggi tanaman tidak meningkat secara signifikan (Dorafshan dkk., 2023). Di sisi lain, penambahan *biochar* juga dapat mengubah sifat kimia tanah seperti peningkatan pH dan interaksi dengan unsur hara, yang dalam beberapa kondisi justru menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi atau fase adaptasi tanaman, sehingga pertumbuhan tinggi menjadi kurang optimal (Khalid dkk., 2017).

Penelitian Cahyo (2019) dengan paparan lebih tinggi yaitu, 800, 900, dan 1000 ppm, konsentrasi logam Pb tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap tinggi tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa secara morfologi tanaman tetap mampu beradaptasi pada kondisi tanah tercemar logam Pb, dengan pertumbuhan batang yang terus meningkat seiring waktu selama masa pengamatan, sehingga dapat disimpulkan bahwa akar wangi memiliki tingkat toleransi yang baik terhadap Pb tanpa mengalami gangguan morfologi yang signifikan pada parameter pertumbuhan tinggi batangnya.

Namun demikian, perbedaan nilai pertumbuhan antar variasi tersebut tidak dapat langsung disimpulkan sebagai perbedaan yang signifikan secara ilmiah, sehingga diperlukan analisis statistik. Oleh karena itu, analisis statistik menjadi tahap penting dalam memperkuat interpretasi hasil penelitian dan memastikan validitas kesimpulan yang diambil.

4.4 Analisis Penyisihan Pb pada Tanah serta Akumulasi pada Tanaman

Konsentrasi logam Pb di tanah pada variasi 1-4 dapat dilihat pada **Gambar 4.7** berikut



Gambar 4. 7 Konsentrasi Logam di Tanah pada Variasi 1 sampai Variasi 4

Keterangan:

Variasi 1 : Tanaman + Pb

Variasi 2 : Tanaman + Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 3 : Tanaman + Pb + *Biochar* sekam padi

Variasi 4 : Tanaman + Pb + *Biochar* daun ranting

Berdasarkan hasil analisis, Pada variasi 1 konsentrasi Pb berada pada rentang 123,895–241,887 mg/kg. Variasi 2 memiliki rentang konsentrasi 111,97–204,54 mg/kg. Selanjutnya, variasi Variasi 3 menunjukkan rentang konsentrasi dari 153,237–215,37 mg/kg. Sementara itu, variasi Variasi 4 memiliki rentang konsentrasi yaitu dari 66,93–200 mg/kg. Perbedaan rentang konsentrasi ini menunjukkan adanya dinamika perubahan kadar Pb pada masing-masing variasi perlakuan selama periode penelitian. Walaupun demikian, pada hari terakhir penelitian yaitu hari ke-50, setiap perlakuan menunjukkan penurunan dibandingkan hari pertama penelitian. Variasi 4 merupakan variasi dengan konsentrasi paling rendah pada akhir pengamatan yaitu, sebesar 96,98 mg/kg.

Hasil penelitian variasi 1, yaitu hanya dengan tanaman *Chrysopogon zizanioides* L. saja tanpa penambahan *biochar* tetap dapat menyisihkan logam Pb di dalam tanah dengan konsentrasi awal penelitian yaitu, 200 mg/kg dan konsentrasi akhir penelitian 165,37 mg/kg. Namun, jika dibandingkan dengan perlakuan yang ditambahkan

biochar, variasi 4 dengan penambahan *biochar* daun dan ranting paling unggul dalam menyisihkan logam Pb di tanah dengan konsentrasi akhir 96,98 mg/kg. Selanjutnya, diikuti variasi 2 dengan penambahan *biochar* tempurung kelapa dengan penurunan konsentrasi logam Pb di tanah dari 200 mg/kg menjadi 131,42 mg/kg. Variasi dengan penyisihan logam Pb di tanah paling rendah yaitu, variasi 1 tanpa penambahan *biochar* dengan penurunan 200 mg/kg menjadi 165,37 mg/kg. Hal ini sejalan dengan penelitian (Ambaye dkk., 2021) bahwa *biochar* daun dan ranting yang memiliki struktur berpori dan mengandung banyak gugus aktif sehingga bisa mengikat logam Pb di permukaan *biochar* dan bisa membuat Pb menjadi tidak mudah bergerak di tanah. Berdasarkan **Tabel 2.3** *biochar* dedaunan dan ranting juga memiliki kapasitas adsorpsi terhadap logam Pb lebih tinggi dibandingkan *biochar* lainnya. Karakteristik ini mendukung kinerja tanaman *Chrysopogon zizanioides* L. dalam proses fitoremediasi. Selain itu, *biochar* daun dan ranting juga membantu memperbaiki struktur tanah sehingga akar dapat tumbuh lebih optimal dan meningkatkan proses fitostabilisasi Pb. Dengan demikian, kombinasi sifat *biochar* yang reaktif dan sistem akar akar wangi yang kuat menghasilkan sinergi yang lebih efektif dalam menurunkan kadar Pb di tanah.

Pola perubahan konsentrasi Pb menunjukkan adanya dinamika yang dipengaruhi oleh proses adsorpsi di dalam tanah. Penurunan konsentrasi pada tahap awal dapat dijelaskan oleh terjadinya pengikatan Pb oleh partikel tanah maupun oleh *biochar*, sehingga logam berada dalam bentuk yang lebih terimobilisasi dan ketersediaannya menurun, mekanisme ini sejalan dengan laporan bahwa *biochar* mampu meningkatkan retensi logam berat melalui interaksi fisik dan kimia yang menurunkan mobilitas serta bioavailabilitasnya dalam tanah (Guo dkk., 2020). Meskipun demikian, peningkatan konsentrasi yang terjadi pada periode pengamatan tertentu dapat dikaitkan dengan pelepasan kembali (desorpsi) Pb yang sebelumnya terikat secara lemah atau akibat redistribusi logam antar fraksi tanah, khususnya ketika kapasitas ikatan mulai mendekati kejenuhan atau ketika interaksi yang terbentuk bersifat reversibel, fenomena fluktuasi semacam ini telah dilaporkan dalam studi remediasi tanah yang menunjukkan bahwa sistem memerlukan waktu untuk mencapai kondisi kesetimbangan yang stabil (Nenova dkk., 2025). Seiring bertambahnya waktu kontak,

sistem akan bergerak menuju kesetimbangan baru antara proses adsorpsi dan desorpsi, sehingga pada akhir periode pengamatan konsentrasi Pb kembali menunjukkan kecenderungan menurun akibat terbentuknya ikatan yang lebih stabil antara Pb dengan permukaan *biochar* maupun fraksi tanah yang lebih kuat mengikat logam (Guo dkk., 2020).

Dalam mekanisme fitoremediasi, analisis distribusi logam Pb juga dilakukan pada jaringan tanaman. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui mekanisme serapan dan translokasi logam selama proses fitoremediasi. Perbedaan akumulasi pada akar, batang, dan daun menunjukkan bagaimana tanaman mengelola logam berat untuk mengurangi efek toksik serta mempertahankan fungsi fisiologisnya. Hasil analisis bagian akar, batang dan daun tanaman akar wangi dapat dilihat pada **Tabel 4.2**, **4.3**, dan **4.4** berikut

Tabel 4. 2 Konsentrasi Pb Pada Akar Tanaman (mg/kg)

Hari	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4
1	0	0	0	0
50	18,575	4,77	0,565	19,205

Tabel 4. 3 Konsentrasi Pb Pada Batang Tanaman (mg/kg)

Hari	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4
1	0	0	0	0
50	0	0	0	0

Tabel 4. 4 Konsentrasi Pb Pada Daun Tanaman (mg/kg)

Hari	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4
1	0	0	0	0
50	0	0	0	0

Berdasarkan **Tabel 4.1**, konsentrasi Pb pada akar tanaman menunjukkan nilai tertinggi dibandingkan bagian tanaman lainnya pada seluruh variasi perlakuan. Konsentrasi Pb tertinggi terdapat pada bagian akar variasi 4 (tanaman + Pb + *biochar* daun dan ranting) yaitu sebesar 19,205 mg/kg, sedangkan konsentrasi terendah terdapat pada variasi 3 (tanaman + Pb + sekam padi) yaitu, sebesar 0,565 mg/kg.

Pada **Tabel 4.2** dan **Tabel 4.3** Konsentrasi Pb pada bagian batang dan bagian daun hasilnya 0 mg/kg atau tidak terdeteksi adanya logam Pb pada bagian tanaman tersebut. Pada bagian akar menunjukkan bahwa akar merupakan bagian utama dalam proses penyerapan logam dari tanah. Akar memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi dan mengikat logam berat melalui dinding sel maupun senyawa organik pada zona rizosfer

sehingga logam dapat tertahan pada jaringan akar. Hal ini menunjukkan bahwa logam Pb yang telah diserap oleh akar tidak banyak ditranslokasikan menuju bagian batang maupun bagian daun. Hal ini disebabkan keterbatasan waktu pada penelitian ini yaitu, 50 hari yang disesuaikan dengan metode penelitian yang telah ditetapkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Pb masih lebih banyak terakumulasi pada akar. Kondisi ini juga sejalan dengan karakteristik akar wangi sebagai tanaman yang cenderung menahan Pb pada sistem perakaran. Penelitian Nascimento dkk. (2016) menunjukkan bahwa akumulasi pada pucuk masih terus meningkat hingga 90–120 hari. Oleh karena itu, waktu 50 hari pada penelitian ini belum cukup untuk menghasilkan translokasi Pb yang lebih besar menuju batang dan daun.

Nilai *Bioaccumulation Factor* (BAF) dari perlakuan variasi 1 sampai 4, yang mana variasi tersebut menggunakan tanaman akar wangi untuk proses fitoremediasi. Akhir pengamatan yaitu, hari ke-50 juga dianalisis Pb yang ada pada bagian tanaman akar wangi dapat dilihat pada **Tabel 4.4** berikut :

Tabel 4. 5 Nilai BAF Variasi 1 sampai 4

Variasi	Bagian Tanaman	Konsentrasi Akhir Bagian Tanaman (mg/kg)	Konsentrasi Akhir Tanah (mg/kg)	Nilai BAF	Keterangan
Variasi 1	Akar	18,575	165,373	0,112	<i>Excluder</i>
	Batang	0			
	Daun	0			
Variasi 2	Akar	4,77	131,428	0,036	<i>Excluder</i>
	Batang	0			
	Daun	0			
Variasi 3	Akar	0,565	153,238	0,004	<i>Excluder</i>
	Batang	0			
	Daun	0			
Variasi 4	Akar	19,205	96,98	0,198	<i>Excluder</i>
	Batang	0			
	Daun	0			

Berdasarkan nilai *Bioaccumulation Factor* (BAF) yang diperoleh, seluruh variasi menunjukkan nilai kurang dari 1. Secara umum, tanaman dengan nilai $BAF < 1$ dikategorikan sebagai tanaman tipe *excluder*, yaitu tanaman yang secara efektif mencegah logam berat memasuki area bagian atas tanaman, namun konsentrasi logam di sekitar area perakaran masih tinggi.

Hal ini didukung berdasarkan hasil nilai BAF pada penelitian Nugroho dan Lestari (2021) yang mana konsentrasi logam di tanah banyak diserap oleh akar dibandingkan bagian tanaman lainnya (batang dan daun). Efisiensi akar wangi menyerap Pb dari lingkungan ke bagian akar lebih tinggi dibandingkan dengan bagian tajuk. Menurut Brown (1995) suatu tanaman dapat disebut hiperakumulator apabila memiliki laju translokasi jenis tanaman *excluder* yaitu, tanaman yang mampu meadsorpsi logam berat dari tanah ke bagian akarnya. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman akar wangi kurang cocok untuk dijadikan sebagai fitoekstraksi Pb karena akumulasi logam lebih banyak di dalam akar. Tanaman akar wangi bisa digunakan sebagai fitostabilisasi logam Pb pada tanah karena memiliki sifat toleran terhadap logam Pb.

Nilai *Transfer Factor* (TF) dari perlakuan variasi 1 sampai 4, yang mana variasi tersebut menggunakan tanaman akar wangi untuk proses fitoremediasi. Nilai TF adalah perbandingan konsentrasi logam Pb di bagian daun dan di bagian akar. Nilai TF dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 6 Nilai TF Variasi 1 sampai 4

Variasi	Bagian Tanaman (mg/kg)		Nilai Transfer Factor (TF)	Keterangan
	Akar	Daun		
Variasi 1	18,58	0,00	0,00	Fitostabilisasi
Variasi 2	4,77	0,00	0,00	Fitostabilisasi
Variasi 3	0,57	0,00	0,00	Fitostabilisasi
Variasi 4	19,20	0,00	0,00	Fitostabilisasi

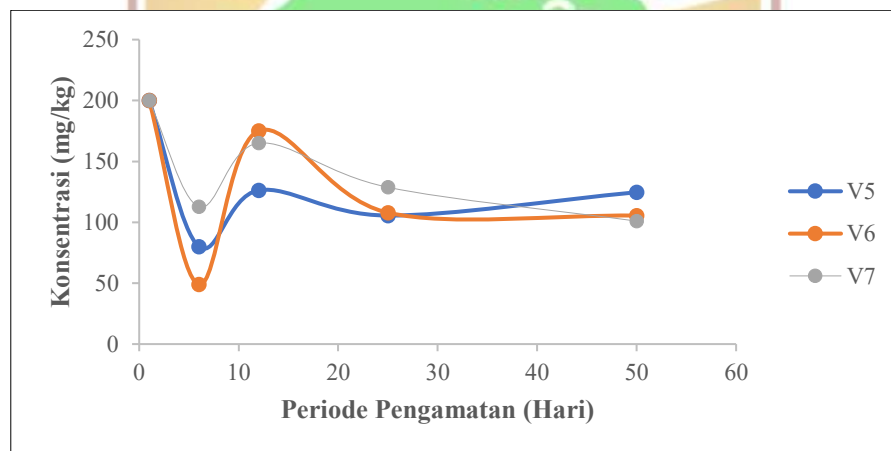
Nilai *Transfer Factor* (TF) pada variasi 1 sampai dengan variasi 4 menunjukkan nilai < 1 , yang berarti tanaman hanya mampu mentranslokasikan Pb di akar saja, dan tidak mampu dalam mentranslokasikan Pb ke batang maupun daun. Hal ini menunjukkan karakteristik tanaman sebagai tipe fitostabilisasi. Hal ini sejalan dengan nilai BAF yang < 1 , tanaman termasuk dalam kategori fitostabilisasi, karena tanaman akar wangi

mampu menyerap logam berat dari tanah, yang dominan di bagian akar dibanding bagian batang maupun ranting.

akumulasi total Pb dalam jaringan tanaman masih lebih rendah dibandingkan konsentrasi dalam tanah. Oleh karena itu, tanaman dalam penelitian ini lebih tepat dikategorikan sebagai *accumulator parsial* yang memiliki kemampuan translokasi logam, tetapi tidak menunjukkan kapasitas akumulasi tinggi.

4.5 Analisis Kemampuan *Biochar* dalam Menyisihkan Pb di dalam Tanah

Perlakuan variasi 5 sampai variasi 7 menggunakan media tanah dan hanya tambahan *biochar* tanpa menggunakan tanaman yang mana hasil analisis logam Pb yang masih tersedia di tanah selama periode pengamatan dapat dilihat **Gambar 4.7** berikut.



Gambar 4. 4 Konsentrasi Logam di Tanah Pada Variasi 5 sampai Variasi 7

Keterangan:

Variasi 5 : Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 6 : Pb + *Biochar* sekam padi

Variasi 7 : Pb + *Biochar* daun dan ranting

Berdasarkan hasil analisis konsentrasi Pb pada variasi 5,6, dan 7, di hari ke-50 yaitu, hari terakhir pengamatan konsentrasi Pb terendah terdapat pada variasi 7 yaitu, penambahan *biochar* daun ranting dengan konsentrasi di tanah 100,98 mg/kg. Hal ini berhubungan dengan variasi 4 yaitu, kombinasi tanaman dan penambahan *biochar* yang merupakan konsentrasi Pb terendah yang masih tersedia di tanah.

4.6 Analisis Statistik Seluruh Parameter Variasi Perlakuan

Analisis statistik yang digunakan yaitu *one way* ANNOVA untuk uji signifikan jika ($p > 0,05$) maka H_0 diterima dan tidak signifikan. Namun, jika ($p < 0,05$) H_0 ditolak dan dilanjutkan dengan uji Uji lanjut *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT). Analisis statistik dilakukan pada kondisi lingkungan tanah dan morfologi tanaman (tinggi tanaman). Hasil analisis statistik uji signifikan menggunakan *one way* ANOVA untuk setiap parameter yang di analisis dapat dilihat pada **Tabel 4.7** berikut.

Tabel 4. 7 Hasil *One Way* ANOVA Setiap Parameter

Parameter	P-Value	Keterangan	Kesimpulan
Tinggi Tanaman	0,866	H_0 diterima	Tidak signifikan
pH	0,055	H_0 diterima	Tidak signifikan
Kelembapan	0,045	H_0 ditolak	Lanjut uji DMRT
Suhu	0,507	H_0 diterima	Tidak signifikan
Konsentrasi logam Pb pada variasi 1-4	0,253	H_0 diterima	Tidak signifikan
Konsentrasi logam Pb pada variasi 5-7	0,268	H_0 diterima	Tidak signifikan

Berdasarkan hasil analisis statistik menggunakan *One Way* ANOVA pada **Tabel 4.5**, diketahui bahwa tidak semua parameter menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan. Parameter tinggi tanaman memiliki nilai *p-value* sebesar 0,866 ($p > 0,05$) sehingga H_0 diterima, yang berarti perlakuan yang diberikan tidak signifikan terhadap tinggi tanaman. Hal yang sama juga terjadi pada parameter pH dengan *p-value* 0,055 dan suhu dengan *p-value* 0,507, dimana kedua nilai tersebut lebih besar dari 0,05 sehingga menunjukkan tidak signifikan antar perlakuan. Sebaliknya, kelembapan sebesar 0,045 ($p < 0,05$) sehingga H_0 ditolak, yang menandakan adanya signifikan antar perlakuan. Oleh karena itu, pada parameter kelembapan tersebut dilakukan uji lanjut DMRT untuk mengetahui perbedaan nyata antar masing-masing perlakuan.

Hasil uji statistik menggunakan *One Way* Anova, menunjukkan tidak signifikan terhadap penurunan konsentrasi logam Pb di tanah yang hasil ($p > 0,05$). Hal ini disebabkan konsentrasi logam Pb di tanah tidak konsisten (naik-turun) setiap periodenya yang membuat hasil uji statistik tidak menunjukkan signifikan. Walaupun secara statistik penambahan *biochar* tidak signifikan terhadap konsentrasi Pb di tanah,

penambahan *biochar* dari hasil efisiensi penyisihan tetap menunjukkan adanya perubahan dengan variasi 4 menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi yaitu 51,51%.

Parameter kelembapan memiliki *p-value* ($p < 0,05$) sehingga perlu uji lanjut menggunakan uji DMRT. Hasil uji statistik lanjutan untuk parameter kelembapan tanah dapat dilihat pada **Tabel 4.6** berikut.

Tabel 4. 8 Hasil Uji DMRT untuk Parameter Kelembapan

Variasi	P-Value	Post Hoc
Variasi 1	0,045	b
Variasi 2		b
Variasi 3		b
Variasi 4		a
Variasi 5		b
Variasi 6		b
Variasi 7		b

Berdasarkan hasil uji lanjut DMRT pada parameter kelembapan diperoleh *p-value* sebesar 0,045 ($p > 0,05$) yang menunjukkan signifikan antar perlakuan. Hasil pengelompokan *post hoc* DMRT juga menunjukkan bahwa variasi 4 berada pada kelompok a, sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan variasi 4 memberikan perbedaan nyata pada parameter kelembapan tanah.

4.7 Evaluasi Kinerja Komparatif

Hasil dari perbandingan kinerja komparatif variasi 1 sampai variasi 7 untuk semua parameter pengamatan dapat dilihat pada **Tabel 4.6** berikut.

Tabel 4. 9 Perbandingan Efektivitas Setiap Variasi

Variasi	C Awal (mg/kg)	C Akhir (mg/kg)	Efisiensi Penyisihan (%)	Perubahan Tinggi Batang (cm)	pH	Kelembapan (%)	Suhu (°C)	BAF	TF
Variasi 1	200	165,37	17,31	20-122	8,7-9,1	25-43,5	24,5-35	0,112	0
Variasi 2		131,43	34,29	20-107,75	8,8-9,1	27,5-39,5	25-38	0,036	
Variasi 3		153,24	23,38	20-101,25	8,65-9,1	24,5-42	25-37	0,004	
Variasi 4		96,98	51,51	20-113	8,3-9,2	20-29	25-37,5	0,19	
Variasi 5		124,68	37,66	-	8,85-9,1	27-46	24-35	-	
Variasi 6		105,54	47,23		8,9-9,1	27-42	24-35,5		
Variasi 7		100,99	49,51		8,85-9,1	27-45	24-32		

Keterangan:

Variasi 1 : Tanaman + Pb

Variasi 2 : Tanaman + Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 3 : Tanaman + Pb + *Biochar* sekam padi

Variasi 4 : Tanaman + Pb + *Biochar* daun ranting

Variasi 5 : Pb + *Biochar* tempurung kelapa

Variasi 6 : Pb + *Biochar* sekam padi

Variasi 7 : Pb + *Biochar* daun ranting

Berdasarkan **Tabel 4.6** efektivitas penyisihan logam Pb pada masing-masing variasi menunjukkan hasil yang berbeda. Variasi 4 (tanaman + Pb + *biochar* daun ranting) memberikan efisiensi penyisihan tertinggi yaitu sebesar 51,51%, yang menunjukkan bahwa kombinasi tanaman dengan *biochar* jenis ini paling optimal dalam menurunkan konsentrasi Pb. Hal ini sesuai dengan **Tabel 2.3** yang mana kapasitas adsorpsi *biochar* daun ranting lebih unggul dari pada *biochar* tempurung kelapa maupun *biochar* sekam padi. Hal ini diduga karena *biochar* daun dan ranting memiliki, porositas, serta kandungan gugus fungsional yang lebih tinggi sehingga mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi logam berat, serta didukung oleh aktivitas akar tanaman dalam proses fitoremediasi. Hal ini berhubungan dengan hasil pengukuran pH, yang mana variasi 4 pada hari ke-12, 25 dan 50 menunjukkan pH yang mendekati pH netral yaitu, rentang dari 8,5-8,85 yang berbeda dengan variasi lain yaitu, di atas 9,1. Hal ini sesuai dengan penjelasan dari Khalid dkk. (2017), kondisi tanah dengan pH netral umumnya lebih mendukung proses fitoremediasi karena logam masih cukup tersedia untuk diserap tanaman tanpa menyebabkan stres berlebihan pada tanaman.

Hasil penelitian menunjukkan Variasi 4 (tanaman + Pb + *biochar* daun ranting) memiliki efisiensi penyisihan tertinggi yaitu 51,51%. Hal ini sejalan dengan hasil *Bioaccumulation Factor* (BAF) yang mana Variasi 4 paling tinggi nilai BAF nya dibandingkan variasi lainnya yaitu 0,190. Nilai BAF tinggi menunjukkan Tanaman Akar Wangi memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap logam Pb di tanah dalam proses fitoremediasi. Dan juga berhubungan dengan hasil analisis efisiensi penyisihan variasi tanpa tanaman, penambahan *biochar* daun ranting jugalah paling tinggi efisiensi penyisihannya di antara variasi 5-7 yaitu, 49,51 mg/kg. Hasil ini didukung oleh penelitian Yang dkk. (2019) bahwa penambahan *biochar* dari biomassa tanaman (daun

ranting) mampu meningkatkan akumulasi logam pada jaringan akar tanaman melalui perbaikan kondisi media tanam.

Sebaliknya, variasi 3 (tanaman + Pb + *biochar* sekam padi) menunjukkan efisiensi terendah yaitu hanya 23,38%, yang mengindikasikan bahwa penambahan *biochar* sekam padi pada kondisi ini belum efektif dalam meningkatkan penyerapan Pb oleh tanaman. V1 (tanaman tanpa *biochar*) tetap mampu menurunkan Pb sebesar 17,31%, yang menegaskan bahwa tanaman memiliki kemampuan alami dalam menyerap logam berat meskipun tanpa penambahan adsorben. Variasi 3 (23,38%) juga menunjukkan efektivitas yang rendah, sehingga *biochar* sekam padi pada kondisi ini belum bekerja optimal dalam mendukung proses remediasi.

Variasi 4 (tanaman + Pb + *biochar* daun ranting) dengan variasi paling optimum dan variasi 3 (tanaman + Pb + *biochar* sekam padi) dengan variasi paling minimum dalam menyisihkan logam Pb di tanah hal ini berhubungan dengan kapasitas adsorpsi pada **Tabel 2.3** dan **Tabel 2.4** ukuran pori *biochar*, variasi 4 paling unggul di dua parameter tersebut sedangkan variasi 3 paling rendah.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kombinasi antara tanaman dan *biochar* dapat meningkatkan efisiensi fitoremediasi melalui mekanisme adsorpsi logam, serta perbaikan sifat fisik dan kimia tanah. Menurut (Abyaneh dkk., 2024), *biochar* mampu meningkatkan immobilisasi logam berat seperti Pb di dalam tanah serta meningkatkan efisiensi fitoremediasi. tergantung pada jenis bahan baku *biochar* dan kondisi lingkungan. *Biochar* yang berasal dari biomassa lignoselulosa seperti daun dan ranting cenderung memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena struktur porinya yang berkembang dengan baik dan banyak mengandung gugus aktif (Alaboudi dkk., 2019). Dengan demikian, hasil pada variasi 4 dalam penelitian ini tergolong efektif dan konsisten dengan penelitian terdahulu.

Parameter kondisi lingkungan tanah yaitu, pH dan suhu tanah serta tinggi tanaman setelah diuji statistik hasilnya tidak signifikan. Namun, kelembapan tanah setelah uji lanjut yaitu, uji DMRT menunjukkan adanya signifikan antar variasi perlakuan, yang mana variasi 4 signifikan terhadap variasi perlakuan lainnya. Hasil analisis statistik

untuk perbandingan konsentrasi logam Pb di tanah antar variasi 1-7 menunjukkan tidak signifikan. Walaupun secara statistik perbedaan *biochar* tidak signifikan, tetapi dari nilai penyisihan hasil dari perhitungan efisiensi penyisihan menunjukkan adanya pengaruh.

4.8 Rekomendasi Akhir Periode Penelitian

Berdasarkan hasil pengamatan pada akhir periode penelitian (hari ke-50), diperoleh konsentrasi Pb pada media tanah yang bervariasi pada setiap perlakuan. Pada **Tabel 4.8** Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh variasi perlakuan memiliki konsentrasi Pb yang masih berada di bawah baku mutu tanah berdasarkan TKC Lampiran XIII Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, sehingga secara umum media tanah hasil penelitian telah mengalami penurunan kadar Pb dan berada pada kondisi yang lebih aman dibandingkan konsentrasi awal.

Tabel 4. 10 Konsentrasi Pb di Tanah di Akhir Periode Pengamatan

Variasi	Standar Baku Pb di Tanah*(mg/kg)	Konsentrasi Akhir (mg/kg)
V1	300	165,37
V2		131,43
V3		153,24
V4		96,98
V5		124,68
V6		105,54
V7		100,99

Meskipun demikian, tanaman dan media tanah hasil proses fitoremediasi tidak disarankan untuk digunakan kembali secara langsung karena masih berpotensi mengandung akumulasi logam Pb. Tanaman berperan sebagai akumulator logam, sedangkan tanah tetap menjadi matriks penyimpan logam sehingga keduanya berpotensi menjadi sumber kontaminasi sekunder apabila tidak dikelola dengan tepat. Secara teknis, tanaman dapat ditangani melalui insinerasi untuk mereduksi volume bahan organik, sementara logam berat akan terakumulasi pada residu abu yang selanjutnya dikategorikan sebagai limbah B3. Sementara itu, media tanah yang masih mengandung logam berat direkomendasikan untuk dikelola melalui

stabilisasi/solidifikasi atau penanganan sebagai limbah B3 guna mencegah mobilisasi kembali logam ke lingkungan.

