



Perbaikan Beberapa Sifat Tanah Sulfat Masam dengan Penerapan Biochar Sekam Padi Teraktivasi Diperkaya *Trichoderma* sp. dan Limbah Agroindustri untuk Mendorong Hasil IR Zink

Muhammad Helmy Abdillah^{1*}, Mila Lukmana², Aida³

^{1,2,3}Program Studi Budidaya Tanaman Perkebunan, Politeknik Hasnur, Kalimantan Selatan, Indonesia

ARTIKEL INFO

Sejarah artikel
Diterima 10/03/2023
Diterima dalam bentuk revisi 11/12/2023
Diterima dan disetujui 10/01/2024
Tersedia online 07/03/2024
Terbit 21/06/2024

Kata kunci
Ameliorasi
Bahan organik lokal
Biofortifikasi
Sekam padi

ABSTRAK

Padi varietas unggul baru (VUB) yang ditanam di atas tanah mineral pasang surut sangat sulit untuk menghasilkan produksi yang maksimal. Hal ini disebabkan sifat tanah yang buruk, diantaranya pirit dan kerapatan massa tanah yang tinggi. Aplikasi biochar yang telah diaktifkan dan diperkaya limbah agroindustri yang berlimpah diharapkan mampu memperbaiki beberapa sifat tanah sehingga mendorong produktivitas VUB IR Zink. Tujuan penelitian ini untuk menetapkan dosis biochar sekam padi teraktivasi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan dikombinasikan limbah padat agroindustri terhadap penurunan pirit dan kerapatan massa tanah pada tanah sulfat masam serta menilai pengaruhnya terhadap volume akar dan berat gabah kering giling yang dihasilkan dari tanaman padi IR Zink. Penelitian ini dilakukan pada Januari – Juni 2022 di dalam screen UV kebun percobaan Politeknik Hasnur menggunakan rancangan faktorial tersarang dan hasil pengamatan peubahnya dianalisis menggunakan model BNJ α 5%. Bahan yang digunakan yakni sekam padi yang diolah menjadi biochar dan diaktivasi menggunakan asam laktat, biakan *Trichoderma* sp. dalam media beras, limbah padat karet remah, dan limbah *solid decanter*. Perlakuan merupakan kombinasi antara 60% biochar sekam padi teraktivasi diperkaya 10% biakan *Trichoderma* sp. pada beras dikombinasikan masing-masing limbah padat tersebut sebesar 30%, kemudian hasil kombinasi tersebut diaplikasikan ke tanah, sebanyak 30 g, 40 g, dan 50 g per tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar diperkaya *Trichoderma* sp. yang dikombinasikan limbah padat karet remah pada taraf perlakuan 40 g per tanaman padi dinyatakan efektif dalam menurunkan pirit dan kerapatan massa tanah, serta dapat meningkatkan volume akar dan berat gabah kering giling tanaman padi IR Zink.

© 2024 Politeknik Pembangunan Pertanian Manokwari

*Email Penulis Korespondensi : abdillah.helmy21@gmail.com
abdillah.helmy21@gmail.com¹, milalukmana@gmail.com², aidapolihasnur99@gmail.com³

ABSTRACT

New high-yielding rice varieties (VUB) planted on tidal mineral soils are difficulted to produce maximum production. That is due to poor soil properties, including pyrite and high soil mass density. The application of enriched biochar from agroindustrial waste had expected to improve several soil properties to encourage the productivity of VUB IR Zink. The purpose of this study was to determine the dosage of activated rice husk biochar enriched with Trichoderma sp. and combined agro-industrial solid waste on pyrite reduction and soil mass density in acid sulfate soils as well as assess the effect on root volume and weight of milled dry grain produced from IR Zink rice plants. This research was conducted from January to June 2022 in the Hasnur Polytechnic Experimental Garden UV

screen using a nested factorial design, and the observed variables were analyzed using the BNJ α 5% model. The rice husk is processed into biochar and activated using lactic acid, Trichoderma sp. in rice media, crumb rubber solid waste, and decanter solid waste. The treatment combined 60% activated rice husk biochar enriched with 10% Trichoderma sp. culture on rice amalgamated 30% of each solid waste. The combination results were applied to the soil, as much as 30 g, 40 g, and 50 g per plant. The results showed that biochar enriched with Trichoderma sp. combined with crumb rubber solid waste applied at 40 g per rice plant was to be appropriate and effective in reducing pyrite and bulk density, as well as increasing root volume and weight of dry-milled grain IR Zink rice plants.

PENDAHULUAN

Aksi nasional ketahanan pangan dan gizi bagi masyarakat telah menjadi program pemerintah yang wajib dilakukan oleh setiap pemerintah daerah (Mardya *et al.*, 2023; Nurahadiyatika *et al.*, 2022). Peraturan Pemerintah Nomor 17 tahun 2015 bagian kelima pasal 52 ayat 2 huruf d telah menjadi dasar dalam menjalankan aksi nasional ini agar krisis pangan dan pencemaran lingkungan dapat teratasi. Diantara upaya untuk melaksanakan aksi tersebut diantaranya dengan penggunaan varietas Inpari Nutri Zink (IR Zink) dan variasi teknologi perbaikan kesuburan tanah melalui teknik pengelolaan lahan untuk meningkatkan produktivitas. Upaya tersebut mulai dijalankan oleh Pemerintah di Kalimantan Selatan guna mencegah krisis pangan sekaligus menurunkan prevalensi stunting di wilayah tertinggal (BPMI, 2020).

Keberhasilan program ketahanan pangan menggunakan varietas unggul baru (VUB) yang dikombinasikan dengan variasi teknologi untuk

meningkatkan kesuburan tanah menjadi suksesti program ketahanan pangan yang ditujukan untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas pangan. Kajian program ini menjadi tolok ukur pemerintah dalam melaksanakan program selanjutnya yakni ketahanan pangan dan kecukupan gizi bagi masyarakat dengan cara membudidayakan VUB IR Zink diberbagai daerah. Namun budidaya IR Zink di Kalimantan Selatan berpotensi belum dapat menghasilkan produktivitas secara maksimal. Hal ini dikarenakan IR Zink cukup sensitif pada kualitas tanah sawahnya yang buruk seperti rendahnya pH tanah, kejenuhan basa, keharaan makro, serta besi dan aluminium yang tinggi sehingga berimplikasi buruk pada beberapa karakteristik fisika dan biologi tanah. Oleh karena itu, untuk mendukung pelaksanaan program ini memerlukan tindakan amandemen tanah agar terjadi perbaikan sifat tanah secara optimal sebelum dilakukan pemupukan dan penanaman IR Zink.

Sebagian besar, lahan-lahan sawah di Kalimantan Selatan memiliki kemasaman aktif yang termasuk dalam katagori lahan sulfat masam aktual (Razie, 2019). Karakteristik tanah mineral sulfat masam didominasi lapisan pirit dari persenyawaan besi dan sulfida sebagai penyebab kemasaman aktif. Hal ini berdampak pada aktivitas H^+ yang meningkat pada larutan tanah. Pengolahan tanah yang keliru, menjadi penyebab terangkatnya lapisan besi-sulfat sehingga membentuk lapisan pirit dan menghasilkan mineral jarosit. Kondisi ini diinisiasi oleh bakteri pereduksi sulfat *Desulfovibrio desulfuricans* (Duverger *et al.*, 2020), yang menyebabkan pH tanah menjadi sangat masam sehingga berdampak langsung dengan menurunnya produksi gabah kering giling bahkan kematian tanaman padi. Oleh karena itu diperlukan penerapan amandemen tanah dari bahan-bahan organik yang telah diolah seperti kompos maupun biochar.

Beberapa penelitian telah melaporkan rendahnya produksi padi yang dibudidayakan di tanah sulfat masam sehingga memerlukan pengelolaan air dan penerapan bahan organik yang tepat (Koesrini *et al.*, 2020; Ratmini, 2018; Subiksa & Sukristyonubowo, 2021). Abdillah & Widiyastuti (2022) dan Suriani *et al.* (2020) melaporkan bahwa penerapan kompos pada tanah sulfat masam dapat meningkatkan hasil padi dan mengadsorpsi logam toksik pada kondisi tergenang, namun di sisi lain bahwa penerapan kompos juga berpotensi mendegradasi ikatan kovalen antar mineral tanah pada kondisi teroksidasi sehingga ikatan tersebut dapat terlepas dan pada akhirnya

saat kondisi kering akan tereduksi kembali yang menimbulkan penurunan pH (He *et al.*, 2021).

Penerapan bahan organik lokal sebagai upaya meningkatkan produktivitas tanah mineral sulfat masam memerlukan modifikasi yang terukur dan terarah, guna mencegah kerusakan dan emisi yang lebih besar dari tanah sulfat masam. Annisa & Nursyamsi (2016) dan Khairullah *et al.* (2021) melaporkan bahwa penerapan bahan organik dan penggunaan varietas padi berdampak pada fluktuasi kelarutan logam dan emisi gas rumah kaca (GRK) yang terbentuk dalam satu siklus budidaya padi, sehingga kegiatan intensifikasi di tanah sulfat masam perlu memperhatikan faktor tersebut. Abdillah (2022) melaporkan bahwa kompos berbahan organik lokal dengan kombinasi limbah agroindustri yang diterapkan pada tanah sulfat masam berdampak pada kenaikan pirit serta fluk CO_2 dan CH_4 . Penerapan kompos pada tanah sulfat masam harus diubah sehingga degradasi kualitas tanah mineral dan emisinya dapat ditekan.

Bentuk bahan organik yang kompetibel diterapkan pada kondisi lahan tergenang ialah bahan organik yang berbentuk arang. Yusuf & Mukhlis (2020) melaporkan penerapan biochar sekam padi ke tanah sawah sulfat masam dapat mereduksi emisi gas yang ditimbulkan dari sekresi tanaman dan mikroorganisme. Selain itu, Awad *et al.* (2021), Nkoh *et al.* (2022) dan Wang *et al.* (2022) melaporkan bahwa degradasi mineral yang berpotensi melarutkan logam beracun bagi tanaman dapat direduksi dengan pori-pori pada permukaan biochar. Mekanisme adsorpsi kimia dari biochar juga berperan dalam menekan kembalinya logam

agar tidak berdampak pada penurunan pH tanah saat terjadi reduksi (Yang *et al.*, 2021).

Chang *et al.* (2021) dan (Yulnafatmawita *et al.*, 2023) melaporkan bahwa penambahan biochar dapat meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air melalui pori mikro biochar, meningkatkan porositas tanah dan menurunkan kepadatan isi tanah sehingga mempengaruhi arsitektur akar. Zhang & Shen (2022) dan Lv *et al.* (2023) melaporkan bahwa kombinasi pemupukan konvensional dengan biochar mampu meningkatkan populasi mikroba yang membentuk enzim-enzim sebagai prekursor untuk mendorong pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Penerapan biochar mampu menurunkan degradasi hara makro dan mikro akibat kelarutan, perlindungan, fiksasi dan dominasi logam (Alotaibi *et al.*, 2021; Biliyas *et al.*, 2023; Neththasinghe *et al.*, 2023; Rasuli *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022; Xiu *et al.*, 2023). Namun dalam berbagai penelitian belum ditemukan efektifitas penerapan biochar teraktivasi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan dikombinasikan dengan limbah agroindustri perkebunan. Hal ini patut dicoba sebagai upaya memanfaatkan limbah-limbah yang dihasilkan oleh pabrik-pabrik agroindustri yang juga mengandung nutrisi sehingga dapat dimanfaatkan dan meningkatkan perannya dalam melaksanakan industri hijau yang menerapkan konsep *reuse* dan *recycle*. Aktivasi biochar dan pengayaan dengan limbah agroindustri serta jamur *Trichoderma* sp. diharapkan mendorong kompleksitas tersedianya keharmonisan dan enzimatik yang diperlukan oleh tanaman.

Ditengah kebijakan industri hijau yang diterapkan pemerintah, industri pengolahan hasil perkebunan dituntut melakukan *reuse* dan *recycle* terhadap limbah (Silalahi & Supijatno, 2017), sehingga mengurangi tumpukan dan pencemaran pada tanah dan air di area pabrik pengolahan hasil perkebunan. Diantara limbah-limbah yang dihasilkan dari kegiatan agroindustri yakni limbah padat yang dihasilkan dari mesin *decanter* pengolahan CPO (*Crude Palm Oil*) yang disebut limbah padat dekanter dan limbah padat yang dihasilkan dari mesin *hammer mill* pengolahan SIR (*Standar Indonesia Rubber*) yang disebut limbah padat karet remah (LPKR). Maryani (2018) melaporkan bahwa penerapan limbah padat dekanter berdampak positif terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit, karena mengandung unsur esensial yang diperlukan tanaman. Abdillah *et al.* (2021) melaporkan bahwa terjadi nilai eksponensial pada peningkatan dosis aplikasi LPKR terhadap hasil jagung manis.

Keberadaan unsur esensial pada limbah-limbah tersebut terjadi karena dekomposisi terhadap kandungan utama limbah yang dilakukan oleh mikroorganisme selama proses pengendapan di bak penampungan yang diberi perlakuan khusus sebelum dibuang ke bak pembuangan (*land field area*) (Imran & Mustaka, 2020). Dari hasil penelitian tersebut, limbah padat ini sangat potensial dimanfaatkan sebagai sumber hara penyubur tanah apalagi jika dikombinasikan dengan agen hayati yang mampu bersimbiosis dengan tanaman dan di sisi lain juga sebagai agen remediasi tanah.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk menilai ketepatan penerapan dosis biochar sekam padi teraktivasi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan dikombinasikan limbah padat dekanter maupun limbah padat karet remah terhadap penurunan prosentase pirit dan kerapatan massa tanah/ *bulk density* (BD) pada tanah sulfat masam serta menilai pengaruhnya terhadap volume akar dan berat gabah kering giling dari tanaman padi IR Zink.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada Januari – Juni 2022 di *screen house* kebun percobaan Program Studi Budidaya Tanaman Perkebunan, Politeknik Hasnur di Kabupaten Barito Kuala,

Tabel 1. Karakteristik Tanah yang Digunakan

Karakteristik tanah	Indeks
pH	3,74
N (mg kg ⁻¹)	72,23
P (mg kg ⁻¹)	1,18
K _{dd} (me kg ⁻¹)	0,14
Pirit (%)	0,35
<i>Bulk Density</i> %	1,37
Porositas (%)	40,3

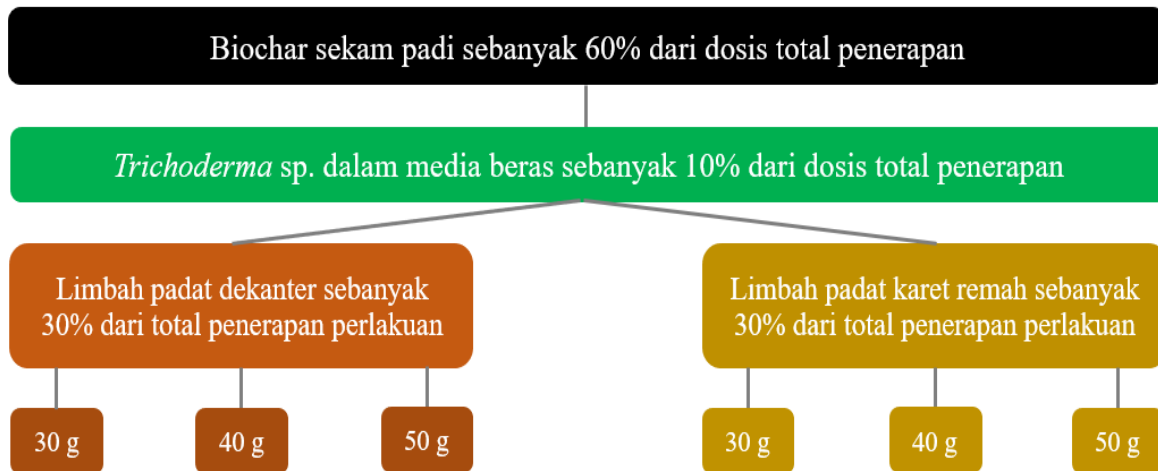
Rancangan penelitian ini didesain dengan rancangan acak lengkap (RAL) faktorial tersarang. Adapun faktor pertama adalah jenis limbah padat yang digunakan sebagai campuran biochar sekam padi yakni limbah padat dekanter dan limbah padat karet remah (LPKR). Faktor kedua yang digunakan adalah dosis 30 g, 40 g, dan 50 g dari kombinasi bahan-bahan tersebut yaitu biochar sekam padi yang telah teraktivasi, *Trichoderma* sp. dan limbah padat agroindustri (Gambar 1).

Provinsi Kalimantan Selatan. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu ember berukuran 28L sebagai wadah tanam, timbangan digital dan timbangan jarum untuk menimbang bahan, drum sebagai tempat membakar sekam (metode karbonisasi). Bahan yang digunakan yaitu benih IR Zink, sekam padi dari pabrik penggilingan beras di Ds. Karang Indah, *Trichoderma* sp. dalam biakan media beras, limbah padat dekanter dari pabrik kelapa sawit PT. X, limbah padat karet remah dari PT. Y, tanah mineral sulfat masam sebanyak 15 kg per ember yang diambil dari tegalan rawa di area kampus pada katagori luapan sungai tipe B. Adapun karakteristik tanah yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Selain perlakuan tersebut, juga diterapkan perlakuan kontrol menggunakan pupuk NPK majemuk (16-16-16) sebanyak 10 g dibagi dalam 2 kali pemberian yakni pada 7 HST (fase vegetatif) dan pada 70 HST (fase generatif). Hal ini dilakukan untuk membandingkan hasil dari perlakuan pemupukan NPK dengan pengaruh biochar sekam padi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan dikombinasikan limbah padat agroindustri dalam meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman IR Zink,

sehingga menjadi dasar dalam memberikan rekomendasi untuk para petani. Setiap perlakuan diulang 4 kali sehingga terdapat 28 satuan percobaan. Adapun pengkodean perlakuan sebagai berikut:

- BR = Biochar diperkaya *Trichoderma* sp. dan dikombinasikan LPKR
- BS = Biochar diperkaya *Trichoderma* sp. dan dikombinasikan padat dekanter
- KNPK = Menggunakan 10 g pupuk NPK



Gambar 1. Desain faktorial tersarang perlakuan

Dalam pelaksanaannya, penelitian ini diawali dengan penyemaian benih IR Zink pada baki berukuran 50 cm x 20 cm selama 21 hari dengan media tanam 2 kg tanah Alluvial yang dicampur dengan 100 g biochar sekam padi. Sembari menunggu pertumbuhan benih IR Zink, dilakukan pembuatan biakan *Trichoderma* sp. menggunakan media beras dengan cara yang diadopsi dari Haristia *et al.* (2021), Abdillah *et al.* (2023) dan Gusnawaty *et al.* (2017) yang diinkubasi selama 14 hari.

Pembuatan biochar berbahan sekam padi sebanyak 4 kg dilakukan pada drum tertutup selama 3 jam dengan temperatur >180°C. Sekam padi yang telah menjadi biochar diaktifkan menggunakan metode dehidrasi (Hung *et al.*, 2005; Irianty, 2010) menggunakan larutan asam laktat sebanyak 1000 ml (500 ml asam laktat : 500 ml air bersih). Pembuatan

asam laktat dengan cara fermentasi bahan organik yang dimodifikasi dari Maryanty *et al.* (2020) dan Murbawani & Sintia (2017). Setelah biochar sekam padi teraktivasi selesai dibuat dan *Trichoderma* sp. pada media beras telah tumbuh merata, maka bahan-bahan tersebut siap untuk dikombinasikan dengan limbah padat dekanter maupun LPKR, sesuai takaran yang telah dipaparkan pada Gambar 1.

Perlakuan diterapkan pada 15 hari setelah padi disemai. Perlakuan diaduk merata pada tanah mineral sulfat masam yang sudah disiapkan di ember 28L. Setelah diaduk merata, tahap selanjutnya diinkubasi 7 hari sebelum bibit IR Zink ditanam pada ember percobaan tersebut. Pada hari ke-21, dilakukan penanaman satu bibit padi IR Zink pada satu ember. Setiap 7 hari sekali, dilakukan perawatan tanaman dengan mengendalikan OPT secara manual

serta melakukan penyiraman menggunakan air PAM. Penyiraman dilakukan 7 hari sekali sebanyak 500 ml sampai tanaman berumur 40 HST. Pada 41 HST – 80 HST, tanaman disiram sebanyak 1500 ml. Pada 81 HST – 110 HST, tanaman disiram sebanyak 500 ml. Air siraman tertampung pada ember dan akan habis karena terjadi evapotranspirasi.

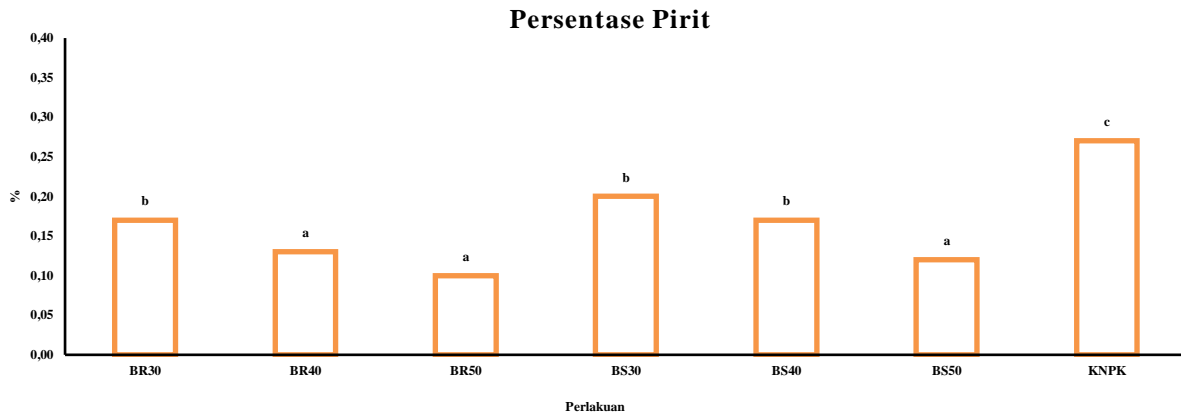
Adapun parameter yang diamati yakni prosentase pirit dan *BD* dilakukan saat tanaman berumur 90 HST dengan cara mengambil sampel tanah pada setiap ember percobaan. Sampel tanah dilakukan penetapan pirit (FeS_2) menggunakan spektrofotometer pada λ 432 nm dengan larutan H_2O_2 dan penetapan *BD* menggunakan metode gravimetri dengan alat ring sampel berbentuk silinder berukuran $98.21 \pm 0.7 \text{ cm}^3$. Perhitungan berat gabah kering giling (GKG) dilakukan setelah semua malai dipanen kemudian gabah dikeringkan selama 10 jam di bawah terik matahari, lalu dipisahkan gabah berisi dan gabah hampa dengan cara ditampi menggunakan nyiru. Penetapan volume akar tanaman IR Zink dilakukan setelah selesai perhitungan GKG, dengan cara mencabut tanaman dari tanah secara perlahan agar akar tidak rusak dan patah. Penetapan volume akar tanaman menggunakan metode gravimetri akar. Semua data tersebut dikumpulkan dan diuji homogenitasnya menggunakan model *Barlett*, namun apabila tidak homogen maka data peubah tersebut harus ditransformasikan hingga hasilnya dinyatakan homogen menurut uji *Barlett*. Apabila nilai dari masing-masing data pengamatan telah dinyatakan homogen, maka dilanjutkan uji signifikansi menggunakan

ragam *analysis of variance* (ANOVA). Setelah dilakukan uji signifikansi, apabila terdapat minimal sepasang perlakuan yang dinyatakan signifikan, maka dilakukan uji beda nilai tengah menggunakan model BNJ α 5% untuk menetapkan efektivitas masing-masing perlakuan terhadap penurunan prosentase pirit dan indeks kerapatan massa tanah (*BD*) serta menentukan pengaruhnya terhadap berat gabah kering giling (GKG) dan volume akar tanaman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prosentase Pirit

Gambar 2 menunjukkan hasil penerapan perlakuan yang mampu menurunkan konsentrasi pirit pada tanah sulfat masam dari 0,35% menjadi 0,13%, namun hasil ini tidak berbeda nyata dengan perlakuan BR50 (0,10%) dan BS50 (0,12%), sedangkan berbeda nyata dibandingkan perlakuan BR30, BS30, dan BS40 yang berpengaruh sama terhadap penurunan prosentase pirit. Penurunan prosentase pirit yang tidak signifikan terlihat pada perlakuan KNPk yakni 0,27%. Hal ini dikarenakan pupuk NPK tidak memiliki kemampuan dalam menyerap Fe, justru elemen pupuk diserap oleh Fe sehingga nutrisinya tidak tersedia bagi tanaman, sedangkan biochar sekam padi yang teraktivasi memiliki pori-pori yang dinamis sehingga mampu mengabsorpsi logam lebih kuat dan menahan potensial redoks senyawa Sulfat. Selain itu, diduga peran *Trichoderma* sp. dan kedua limbah padat pada kombinasi tersebut juga dapat mengadsorpsi kelarutan Fe yang menjadi bahan utama pembentukan pirit.



Gambar 2. Persentase kadar pirit (FeS_2) pada berbagai perlakuan biochar sekam padi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan jenis limbah agroindustry (huruf yang sama di atas diagram batang menunjukkan perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ α 5%)

Secara mekanis, biochar sekam padi teraktivasi bekerja lebih efektif dibandingkan biochar yang tidak teraktivasi, sebab luas permukaannya lebih besar dan terdapat gaya magnetik yang lebih kuat akibat kandungan bahan kimia larutan aktivator terhadap senyawa inorganik (Gęca *et al.*, 2022; Thompson *et al.*, 2016). Limbah padat juga berperan dalam menurunkan konsentrasi pirit karena mengandung senyawa asam organik sehingga terjadi ikatan kovalen antara bahan organik terdekomposisi dengan logam yang larut saat terjadinya reduksi di tanah sulfat masam (Abdillah & Widiyastuti, 2022), sedangkan *Trichoderma* sp. yang berperan mensekresikan siderofor saat mengonsumsi karbon yang berfungsi mengkhelat besi untuk membentuk kompleks besi terlarut sebagai mikro nutrisi pembentuk enzim dalam metabolismenya (Vinale *et al.*, 2013). Siderofor adalah peptida non-ribosomal yang diklasifikasikan menjadi jenis hidroksamat, katekolat, karboksilat, dan campuran antar ketiganya yang berperan

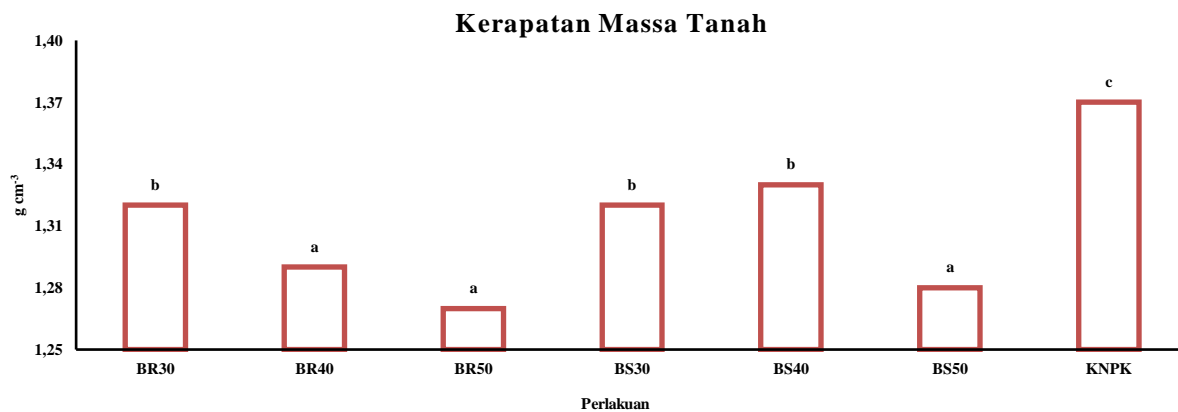
penting bagi keberlangsungan kehidupan mikroorganisme dalam memperoleh, mengangkut, dan memproses ion logam esensial saat melakukan metabolisme dalam tubuhnya (Renshaw *et al.*, 2002). Namun lebih lanjut, belum ditemukan interaksi spesifik *Trichoderma* sp. dengan limbah padat agroindustry terhadap kelarutan logam pada tanah sulfat masam.

Kerapatan Massa Tanah (*BD*)

Gambar 3 menunjukkan hasil perlakuan BR50 dapat menurunkan *BD* tanah dengan nilai paling rendah yakni $1,27 \text{ g cm}^{-3}$, namun berdasarkan BNJ taraf α 5% dinyatakan tidak berbeda dengan perlakuan BS50 ($1,28 \text{ g cm}^{-3}$) dan BR40 ($1,29 \text{ g cm}^{-3}$) terhadap penurunan *BD* tanah. Nilai *BD* tanah pada perlakuan BR30 ($1,32 \text{ g cm}^{-3}$), BS30 ($1,32 \text{ g cm}^{-3}$), BS40 ($1,33 \text{ g cm}^{-3}$), dinyatakan berbeda dibandingkan perlakuan KNPK ($1,37 \text{ g cm}^{-3}$). Hal ini mungkin disebabkan pembentukan pori tanah yang diinisiasi oleh biochar sekam padi teraktivasi sehingga ikatan mineral liat semakin lemah dan

terbentuk kerenggangan antar partikel tanah liat ketika diberikan biochar sekam padi yang telah diperkaya dan ditambahkan bahan-bahan organik limbah padat agroindustri, sedangkan pada perlakuan penerapan KNPK tidak banyak pori yang terbentuk karena sifat pupuk hanya menyuplai unsur hara saja, oleh karena itu penerapan pupuk NPK tersebut terlihat tidak

efektif dalam memperbaiki sifat fisik tanah. Blanco-Canqui (2017) dan Masulili (2010) menjelaskan bahwa penerapan biochar sekam padi dapat memperbaiki sifat fisik tanah, khususnya menurunkan *BD* tanah. Hal ini berdampak besar pada pertumbuhan akar dan pada akhirnya mempengaruhi perkembangan tanaman secara keseluruhan.



Gambar 3. Kerapatan massa tanah pada berbagai perlakuan biochar sekam padi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan limbah agroindustri (huruf yang sama di atas diagram batang menunjukkan perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ α 5%)

Pengayaan biochar dengan agen hayati *Trichoderma* sp. berdampak pada penurunan *BD* tanah. Jian *et al.* (2016) dan Toyota *et al.* (1996) melaporkan terjadi penurunan *BD* tanah akibat sebaran spora fungi yang membuka ruang antar partikel tanah agar membentuk pori sehingga porositas lebih baik. Selain pengayaan tersebut, diduga penerapan limbah padat dekanter dan LPKR terbukti memengaruhi kepadatan tanah. Kenampakan fisik limbah padat dekanter seperti tanah hitam yang cukup padat namun memiliki meso pori yang cukup banyak (Hikmawan *et al.*, 2021), sedangkan LPKR terlihat lebih granul dan remah (Abdillah

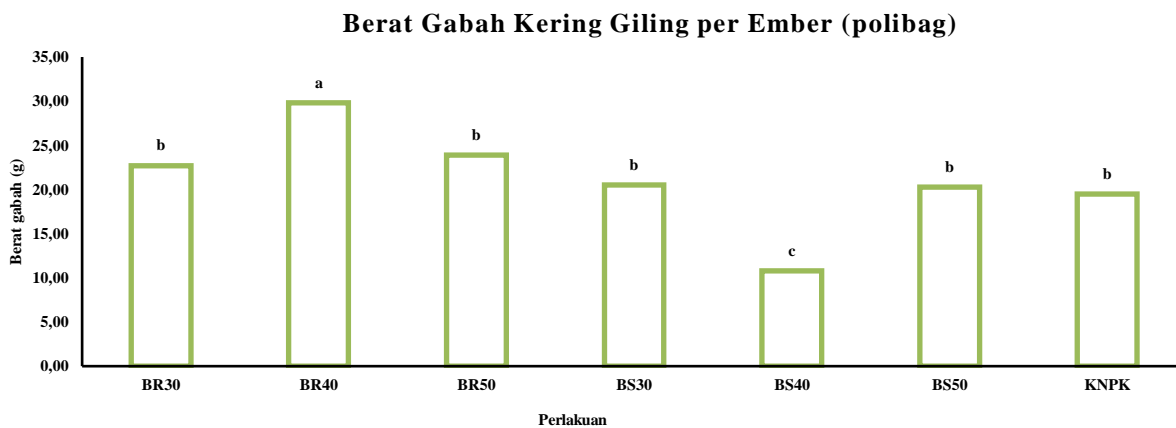
et al., 2020). Hal ini yang diduga mempengaruhi dinamika kerapatan massa tanah sehingga indeks *BD* tanah pada BR50 lebih rendah dibandingkan BS50.

Berat Gabah Kering Giling per Tanaman

Gambar 4 menunjukkan penerapan biochar sekam padi teraktivasi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan dikombinasikan LPKR maupun limbah padat dekanter dapat meningkatkan kuantitas gabah padi. Berat gabah per tanaman dapat meningkat dan mampu bersaing dengan hasil perlakuan KNPK. Berdasarkan BNJ α 5%, penerapan BR40 secara signifikan dapat meningkatkan

berat gabah kering giling 43% dari hasil penerapan KNPK dan berbeda nyata dengan perlakuan lain. Perlakuan BR30, BR50, BS30, BR50, dan KNPK masing-masing tidak berbeda nyata, sedangkan secara signifikansi dinyatakan berbeda dengan perlakuan BS40 yang menghasilkan indeks berat gabah kering giling yang paling rendah. Hal ini dipengaruhi peningkatan kapabilitas tanah oleh biochar

diperkaya yang dikombinasikan limbah padat karet remah dapat mendukung perkembangan dan produksi tanaman, dengan menyediakan hara dan mampu meretensi logam. Pengayaan biochar sekam padi dengan *Trichoderma* sp. yang dikombinasikan LPKR ternyata lebih mampu mendukung penyediaan unsur hara untuk pembentukan gabah padi.



Gambar 4. Berat gabah kering giling hasil perlakuan level dosis biochar sekam padi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan jenis limbah agroindustri (huruf yang sama di atas diagram batang menunjukkan perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ α 5%)

Efek LPKR mampu menyediakan unsur hara dalam kondisi jenuh mineral karena LPKR terbentuk dari bahan organik dan cukup tinggi kandungan Fosfor yang terkumpul dari proses penambahan pupuk TSP untuk mempercepat koagulasi lateks saat panen oleh para penyadap lateks (Abdillah & Aldi, 2020). Fosfor menjadi unsur hara makro yang berperan dalam pembentukan biji. Abdillah *et al.* (2020) menjelaskan bahwa pemberian perlakuan pada dosis tertentu akan berdampak pada perbaikan tanah dan akhirnya berimbas pada meningkatnya hasil tanaman padi dengan

korelasi yang positif. Pernyataan ini juga didukung Sainju *et al.* (2022) dan Sainju & Liptzin (2022) yang menegaskan bahwa terjadi hubungan antar karakteristik tanah terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman. Hal ini mengindikasikan bahwa perbaikan tanah akan meningkatkan kapabilitas tanah dalam mendorong produksi tanaman yang maksimal (Khalil *et al.*, 2015).

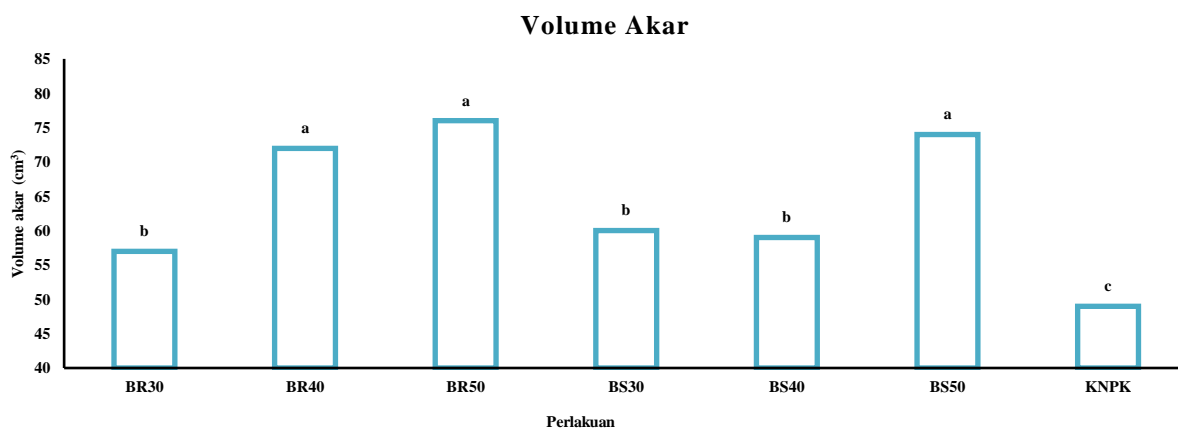
Sang *et al.* (2018) dan Singh *et al.* (2018) melaporkan bahwa aplikasi biochar sekam padi mampu meningkatkan dan mempertahankan nutrisi tanah agar tidak mudah hilang.

Pengayaan dengan *Trichoderma* sp. juga berdampak pada kapasitas biochar dalam menjaga kondisi tanah sehingga akar bertahan dari cekaman logam dan dapat menyerap unsur hara secara maksimal (Maftuah *et al.*, 2020; Purwanto *et al.*, 2022). Peran *Trichoderma* sp. sangat penting dalam menyediakan hara dan menjadi agen hayati bagi tanaman (Halifu *et al.*, 2019; Zin & Badaluddin, 2020). Selain itu, hasil tanaman juga ditentukan oleh penggunaan varietas yang adaptif terhadap cekaman biotik dan abiotik sehingga pertumbuhan dan produksinya dapat optimal sesuai kemampuan genetiknya yang berinteraksi dengan kondisi eksternal dari agroekosistem lahan tersebut (Sinaga & Nambela, 2020).

Volume Akar Tanaman

Gambar 5 menunjukkan volume akar terbesar yang terlihat pada perlakuan BR50 yakni 76 cm³, namun tidak berbeda dengan

BR40 yakni 72 cm³ dan BS50 yakni 74 cm³. Perlakuan BR30 (57 cm³), BS30 (60 cm³) dan BS40 (59 cm³) dinyatakan tidak berbeda pada setiap perlakuannya, sedangkan volume akar paling kecil dihasilkan dari perlakuan KNPK yakni 49 cm³. Hal ini dipengaruhi oleh porositas tanah yang juga dapat tergambar pada nilai *BD* tanah. Umumnya, semakin tinggi nilai *BD*, maka porositas tanah semakin kecil. Hal ini menghambat pertumbuhan akar. Selain itu, pertumbuhan akar memerlukan ketersediaan hara. Unsur hara yang diserap akar berfungsi membentuk sel-sel diseluruh bagian tanaman termasuk pada bagian perakaran sehingga terbentuk akar-akar sekunder dan tersier. Hal ini hanya dapat diinisiasi oleh perbaikan sifat-sifat tanah sehingga kondisi zona perakaran menjadi lapang dan pada akhirnya pertumbuhan akar terjadi lebih mudah dalam menyerap unsur hara (Blake *et al.*, 2008).



Gambar 5. Volume akar tanaman hasil perlakuan level dosis biochar sekam padi yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan jenis limbah agroindustri (huruf yang sama di atas diagram batang menunjukkan perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ α 5%.)

Kartika *et al.* (2021) melaporkan bahwa aplikasi biochar mengurangi hambatan terhadap

pemanjangan akar, pertumbuhan akar sekunder/tersier, peningkatan luas permukaan akar, dan

volume akar. Akar sekunder pada tanah yang diamandemen dengan biochar lebih panjang dibandingkan tanpa biochar. Sejalan dengan ini, Cavalieri-Polizeli *et al.* (2022) dan Correa *et al.* (2019) menyatakan bahwa terdapat hubungan yang kuat dan signifikan antara kualitas struktur tanah terhadap ketahanan penetrasi akar dan pertumbuhan akar yang dipengaruhi oleh bahan organik tanah sehingga volume tanah dapat meningkat. Penerapan biochar diperkaya dengan tambahan kombinasi bahan yang tepat mampu memengaruhi karakter fisikokimia tanah sehingga mendorong perkembangan akar secara maksimal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penerapan biochar teraktivasi asam laktat yang diperkaya *Trichoderma* sp. dan limbah padat dekanter dan limbah padat karet remah mampu memengaruhi hasil perkembangan tanaman padi IR Zink. Aplikasi biochar teraktivasi asam laktat yang dikombinasikan LPKR pada dosis 40 gram (BR40) per tanaman lebih efektif dan efisien dalam menurunkan prosentase pirit dan kerapatan massa tanah (*BD*) serta dapat meningkatkan volume akar tanaman yang berdampak pada peningkatan berat gabah kering giling 43% dibandingkan dengan pemberian NPK majemuk pada tanah sulfat masam. Sarannya adalah melakukan uji efektifitas terhadap prosentase dan jenis dari limbah padat yang diterapkan pada uji multilokasi (uji kelayakan). Dari hasil penelitian ini merekomendasikan formulasi perlakuan terbaik pada kawasan agroindustri untuk dapat memaksimalkan pemanfaatan limbahnya agar tidak dibuang percuma, sehingga terjadi *green economy circular*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada P3M Politeknik Hasnur dalam memfasilitasi kegiatan penelitian ini. Kepada Badan Standardisasi Instrumen Pertanian (BSIP) dan Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) wilayah Kalimantan Selatan yang memberikan bantuan benih dan fasilitasnya guna mendukung penelitian ini. Selain itu diucapkan terimakasih kepada Sdr(i) Putriana, Helsa Feronika, dan Nadia Aprilia Putri yang berkontribusi sebagai helper.

PERNYATAAN KONTRIBUSI

Muhammad Helmy Abdillah sebagai konseptor, riset supervisor, dan author manuskrip. Mila Lukmana sebagai reset desainer dan co-author manuskrip. Aida sebagai kolektor data dan pelaksana riset.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, M. H., Lukmana, M., Indriani, I., Nurul, N., Putri, N. A., Santi, A., Nur, R., Paimin, P. (2023). Upaya menangani gejala virus tungro pada padi dengan melatih petani membuat biakan trichoderma sebagai agen hayati kesuburan tanah dan kesehatan tanaman. *Sasambo*, 5(4), 633-644.
- Abdillah, M. H. (2022). Pengaruh kompos dikombinasikan limbah agroindustri terhadap perbaikan tanah, pertumbuhan padi, dan emisi CH₄ dan CO₂ di tanah mineral pasang surut. *Indonesian Soil and Climate Journal*, 46(1), 1–12.
- Abdillah, M. H., & Aldi, M. (2020). Aplikasi limbah padat karet remah pada tanah podsolik merah kuning terhadap ketersediaan hara makro dan perbaikan sifat fisika tanah. *EnviroScienteeae*, 16(2), 264-275.
- Abdillah, M. H., Effendi, N. R., & Rusnandar, N. (2020). Karakteristik fisik dan kimia limbah padat industri karet remah dengan masa inkubasi berbeda. *Agrisains*, 6(1), 1-7.
- Abdillah, M. H., Lukmana, M., & Aldi, M. (2021). Pengaruh aplikasi limbah padat karet remah pada tanah podsolik merah kuning

- terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman jagung manis (*Zea mays saccharata* Sturt). *Jurnal Pertanian Agros*, 23(2), 310-318.
- Abdillah, M. H., Saidy, A. R., & Wahdah, R. (2020). Pertumbuhan dan produksi tanaman padi varietas Inpara-3 pada tanah tergenang yang diberikan abu batubara. *Rawa Sains: Jurnal Sains STIPER Amuntai*, 10(1), 1-8.
- Abdillah, M. H., & Widiyastuti, D. A. (2022). Peningkatan kualitas kimia tanah sulfat masam dengan aplikasi kombinasi bahan organik lokal dan limbah agroindustri. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(1), 120-131.
- Alotaibi, K. D., Arcand, M., & Ziadi, N. (2021). Effect of biochar addition on legacy phosphorus availability in long-term cultivated arid soil. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, 1-11.
- Annisa, W., & Nursyamsi, D. (2016). Pengaruh amelioran, pupuk dan sistem pengelolaan tanah sulfat masam terhadap hasil padi dan emisi metana. *Indonesian Soil and Climate Journal*, 40(2), 135-145.
- Awad, M., El-Sayed, M. M., Li, X., Liu, Z., ... & Hessini, K. (2021). Diminishing heavy metal hazards of contaminated soil via biochar supplementation. *Sustainability*, 13(22), 12742.
- Bilias, F., Kalderis, D., Richardson, C., Barbayiannis, N., & Gasparatos, D. (2023). Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. *Science of The Total Environment*, 858, 159782.
- Blake, G. R., Steinhardt, G. C., Pombal, X. P., Muñoz, J. N., Cortizas, A. M., Arnold, R. W., ... & Stepniewski, W. (2008). Plant roots and soil physical factors. *Encyclopedia of soil science*, 571-578.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711.
- BPMI. (2020). *Fokus Penurunan Stunting di Sepuluh Provinsi*. Biro Pers, Media Dan Informasi Sekretariat Presiden. <https://www.presidentri.go.id/siaran-pers/fokus-penurunan-stunting-di-sepuluh-provinsi/>
- Cavalieri-Polizeli, K. M. V., Marcolino, F. C., Tormena, C. A., Keller, T., & Moraes, A. D. (2022). Soil structural quality and relationships with root properties in single and integrated farming systems. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 901302.
- Chang, Y., Rossi, L., Zotarelli, L., Gao, B., Shahid, M. A., & Sarkhosh, A. (2021). Biochar improves soil physical characteristics and strengthens root architecture in Muscadine grape (*Vitis rotundifolia* L.). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, 1-11.
- Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of experimental botany*, 70(21), 6019-6034.
- Duverger, A., Berg, J. S., Busigny, V., Guyot, F., Bernard, S., & Miot, J. (2020). Mechanisms of pyrite formation promoted by sulfate-reducing bacteria in pure culture. *Frontiers in Earth Science*, 8, 588310.
- Gęca, M., Wiśniewska, M., & Nowicki, P. (2022). Biochars and activated carbons as adsorbents of inorganic and organic compounds from multicomponent systems—A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 305, 102687.
- Gusnawaty, H. S., Taufik, M., & Asis, A. (2017). Uji efektivitas beberapa media untuk perbanyakkan agens hayati *Trichoderma* SP. *Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan Tropika*, 17(1), 70-76.
- Halifu, S., Deng, X., Song, X., & Song, R. (2019). Effects of two *Trichoderma* strains on plant growth, rhizosphere soil nutrients, and fungal community of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* annual seedlings. *Forests*, 10(9), 758.
- Haristia, W., & Pribadi, T. (2021). Perbanyakkan agen hayati *Trichoderma* SP. menggunakan media beras di laboratorium pengamatan hama dan penyakit tanaman di Banyumas. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 2, 240-249.
- He, Y., Yang, M., Huang, R., Wang, Y., & Ali, W. (2021). Soil organic matter and clay zeta potential influence aggregation of a clayey red soil (Ultisol) under long-term fertilization. *Scientific Reports*, 11(1), 20498.
- Hikmawan, O., Naufa, M., & Ainun, N. N. (2021). Penentuan persen komposisi air, lumpur dan minyak kelapa sawit pada heavy phase di decanter pada pabrik kelapa sawit. *Jurnal Teknik Dan Teknologi*, 16(31), 28-35.
- Hung, Y. T., Lo, H. H., Wang, L. K., Taricska, J. R., & Li, K. H. (2005). Granular activated carbon adsorption. In *Physicochemical Treatment Processes* (pp. 573-633). Totowa, NJ: Humana Press.

- Imran, I., & Mustaka, Z. D. (2020). Identifikasi kandungan kapang dan bakteri pada limbah padatan (decanter solid) pengolahan kelapa sawit untuk pemanfaatan sebagai pupuk organik. *Agrokompleks*, 20(1), 16-21.
- Irianty, S. R. (2010). Pembuatan arang aktif dari arang sisa pembuatan asap cair cangkang kelapa sawit dengan metode aktivasi kimia-fisika. *Seminar Nasional Fakultas Teknik-UR*, 1–10.
- Jian, C., Youchen, D., Feng, G. U. O., Wuhan, Y., Weijing, C., & Shubo, W. A. N. (2016). Ecological effect of *Trichoderma* agent on platform field soil improvement in saline coastal area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 24(1), 90–97.
- Kartika, K., Sakagami, J. I., Lakitan, B., Yabuta, S., Akagi, I., Widuri, L. I., ... & Nurrahma, A. H. I. (2021). Rice husk biochar effects on improving soil properties and root development in rice (*Oryza glaberrima* Steud.) exposed to drought stress during early reproductive stage. *AIMS Agriculture and Food*, 6(2), 737-751.
- Khairullah, I., Alwi, M., & Annisa, W. (2021, April). The fluctuation of rice production of tidal swampland on climate change condition (Case of South Kalimantan Province in Indonesia). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 724, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- Khalil, H. A., Hossain, M. S., Rosamah, E., Azli, N. A., Saddon, N., Davoudpoura, Y., ... & Dungani, R. (2015). The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1006-1015.
- Koesrini, K., Saleh, M., & Hidayat, A. R. (2020). Peningkatan produktivitas padi melalui ameliorasi dan pemberian pupuk hayati di lahan rawa pasang surut tipe B. *Jurnal Pertanian Agros*, 22(2), 186-194.
- Lv, Y., Xu, L., Guo, X., Liu, J., Zou, B., Guo, Y., ... & Zhao, M. (2023). Effect of biochar on soil physiochemical properties and bacterial diversity in dry direct-seeded rice paddy fields. *Agronomy*, 13(1), 4.
- Maftuah, E., Saleh, M., & Pratiwi, E. (2020). The potentials of biochar from agricultural waste as a carrier material of biofertilizer for swamplands the potentials of biochar from agricultural waste as a carrier material of biofertilizer for swamplands. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2064–2072.
- Mardya, B., Muhsinin, M., & Wulan, D. R. (2023). The correlation between basic measles immunization historical and nutritional status on toddler: factorial stunting prevalence. *Jurnal Keperawatan*, 14(02).
- Maryani, A. T. (2018). Efek pemberian decanter solid terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) dengan media tanah bekas lahan tambang batu bara di pembibitan utama. *Journal of Sustainable Agriculture*, 33(1), 50-56.
- Maryanty, Y., Saputra, F. L. W., & Prasetyo, R. (2020). Pembuatan asam laktat dari selulosa oleh bakteri *Lactobacillus delbrueckii* dengan selulase dari bakteri *Bacillus subtilis* dan *Bacillus circulans*. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, 4(2), 153-161.
- Masulili, A., Utomo, W. H., & Syechfani, M. S. (2010). Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agric. Sci.*, 2(1), 39.
- Murbawani, A. E., & Sintia, D. I. (2017). Pabrik asam laktat dari molase dengan proses fermentasi. In *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. Fakultas Vokasi ITS.
- Neththasinghe, N. A. S. A., Dissanayaka, D. M. S. B., & Karunarathna, A. K. (2023). Rhizosphere nutrient availability and nutrient uptake of soybean in response to biochar application. *Journal of Plant Nutrition*, 46(17), 1-11.
- Nkoh, J. N., Ajibade, F. O., Atakpa, E. O., Baquy, M. A.-A., Mia, S., Odii, E. C., & Xu, R. (2022). Reduction of heavy metal uptake from polluted soils and associated health risks through biochar amendment: A critical synthesis. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 6(5), 100086–100100.
- Nurahadiyatika, F., Atmaka, D. R., & Imani, A. I. (2022). Peningkatan ketahanan pangan dan pengentasan status kemiskinan dalam konvergensi penurunan angka stunting. *Media Gizi Indonesia*, 17(1), 215–220.
- Purwanto, B., Indrawati, I., Sumadi, S., Nuraini, A., & Setiawati, M. R. (2022). Pemanfaatan *Trichoderma harzianum* dan biochar untuk mengatasi cekaman kekeringan pada kedelai fase reproduktif. *Jurnal Agro*, 9(2), 219–230.
- Rasuli, F., Owliaie, H., Najafi-Ghiri, M., & Adhami, E. (2022). Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous

- soils. *Arid Land Research and Management*, 36(1), 1-26.
- Ratmini, N. P. S. (2019). Kajian provitas lahan sulfat masam Sumatera Selatan: Studi kasus Desa Mulya Sari Kecamatan Tanjunglago. *Agroecotania*, 2(1), 52-62.
- Razie, F. (2019). Potensi produksi padi di tanah sulfat masam dengan kedalaman pirit berbeda. *Pros. Lahan Basah*, 4(1), 92-96.
- Renshaw, J. C., Robson, G. D., Trinci, A. P., Wiebe, M. G., Livens, F. R., Collison, D., & Taylor, R. J. (2002). Fungal siderophores: structures, functions and applications. *Mycological Research*, 106(10), 1123-1142.
- Sainju, U. M., & Liptzin, D. (2022). Relating Soil chemical properties to other soil properties and dryland crop production. *Frontiers in Envi Sci.*, 10(12), 5114-5125.
- Sainju, U. M., Liptzin, D., & Jabro, J. D. (2022). Relating soil physical properties to other soil properties and crop yields. *Scientific Reports*, 12(1), 22025.
- Sang, D. A., Bakar, R. A., Ahmad, S. H., & Rahim, K. A. (2018). Influences of rice husk biochar (RHB) on rice growth performance and fertilizer nitrogen recovery up to maximum tillering stage. *Journal of Wetlands Envi. Management*, 6(1), 32-44.
- Silalahi, B. M. (2017). Pengelolaan limbah kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di angkana estate, Kalimantan Selatan. *Buletin Agrohorti*, 5(3), 373-383.
- Sinaga, A., & Nambela, J. (2020). Adaptifitas dan analisis pengaruh antar komponen terhadap hasil padi varietas unggul baru padi sawah irigasi. *Jurnal Triton*, 11(2), 9-15.
- Singh, C., Tiwari, S., Gupta, V. K., & Singh, J. S. (2018). The effect of rice husk biochar on soil nutrient status, microbial biomass and paddy productivity of nutrient poor agriculture soils. *Catena*, 171, 485-493.
- Subiksa, I. G. M., & Sukristyonubowo. (2021). Mitigation of pyrite oxidation impact in tidal swamp management for agriculture. *Int. Conf. on Sustain. Trop. Land Man.*, 684.
- Suriani, M., Mahbub, M., & Rodinah, R. (2020). Pengaruh kompos jerami padi terhadap kelarutan ferro (Fe^{2+}) dan pH tanah serta pertumbuhan tanaman padi ciherang di tanah sulfat masam. *Agroekotek View*, 3(1), 55-61.
- Thompson, K. A., Shimabuku, K. K., Kearns, J. P., Knappe, D. R., Summers, R. S., & Cook, S. M. (2016). Environmental comparison of biochar and activated carbon for tertiary waste water treatment. *Envi. sci. & tech.*, 50(20), 11253-11262.
- Toyota, K., Young, I. M., & Ritz, K. (1996). Effects of soil matric potential and bulk density on the growth of *Fusarium oxysporum f. sp. raphani*. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(9), 1139-1145.
- Vinale, F., Nigro, M., Sivasithamparam, K., Flematti, G., ... & Lorito, M. (2013). Harzianic acid: a novel siderophore from *T. harzianum*. *Mic. letters*, 347(2), 123-129.
- Wang, Y. Y., You, L. C., Lyu, H. H., Liu, Y. X., He, L. L., Hu, Y. Di, Luo, F. C., & Yang, S. M. (2022). Role of biochar-mineral composite amendment on the immobilization of heavy metals for *brassica chinensis* from naturally contaminated soil. *Environmental Technology and Innovation*, 28(5), 622-634.
- Wu, Y., Zou, Z., Huang, C., & Jin, J. (2022). Effect of biochar addition on phosphorus adsorption characteristics of red soil. *Frontiers in Envi. Science*, 10, 893212.
- Xiu, L., Gu, W., Sun, Y., Wu, D., Wang, Y., Zhang, H., ... & Chen, W. (2023). The fate and supply capacity of potassium in biochar used in agriculture. *Sci. Envi.*, 902, 165969.
- Yang, F., Xu, Z., Huang, Y., Tsang, D. C. W., Ok, Y. S., ... & Cao, X. (2021). Stabilization of dissolvable biochar by soil minerals: release reduction and organo-mineral complexes formation. *Hazardous Mats.*, 412(6), 125213-125222.
- Yulnafatmawita, Yasin, S., & Maira, L. (2023). Role of rice husk biochar in improving soil physical properties of ex gold-mined soil. *Journal Tropical Soil*, 28(3), 127-133.
- Yusuf, W. A., & Mukhlis. (2020). Water management and rice husk biochar application to solve acid sulfate soil problems to promote rice yield and reduce greenhouse gas emission. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1).
- Zhang, J., & Shen, J. L. (2022). Effects of biochar on soil microbial diversity and community structure in clay soil. *Ann. Microb.*, 72(1), 35.
- Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma spp.* for agriculture applications. *Ann. Agric. Sci.*, 65(2), 168-178.