

Perbandingan Efektivitas Biochar Dari Serbuk Kayu dan Ampas Sagu Dalam Penyerapan Emisi CO₂ Dalam Tanah

¹Naomi M. Simamora*, ²Frans A. Asmuruf, ³Himawan, ⁴Sriyanto, ⁵Alowisya Futwembun, ⁶Suwito

^{1,2,3,4,5,6}Departemen Kimia, FMIPA, Universitas Cenderawasih, Jayapura,

Email: margaretanaomi88@gmail.com

ABSTRAK

Peningkatan gas CO₂ terjadi karena lebih banyak gas yang dihasilkan daripada yang diserap. Hal ini mengakibatkan penumpukan gas CO₂ di atmosfer dan menyebabkan pemanasan global. *biochar* memiliki struktur cincin aromatik yang stabil dan bersifat berpori, sehingga dapat menyerap dan menyimpan karbon tanah dalam jangka waktu yang lama sebagai amandemen tanah sembari juga meregenerasi tanah. Biochar serbuk kayu (B1) dan ampas sagu (B2) dipirolisis masing-masing pada suhu 600 dan 400 °C selama satu dan dua jam. Proses penyerapan emisi CO₂ dilakukan dengan cara menginkubasi tanah yang sudah dicampur dengan biochar selama 20 hari. Hasil uji karakterisasi (kadar air dan luas permukaan) dari kedua jenis biochar menunjukkan bahwa B1 memiliki kadar air dan luas permukaan yang lebih besar daripada B2. Pada uji kualitas tanah, didapatkan bahwa TB1 (tanah + Biochar serbuk kayu) menurunkan C-organik (C-organik = 0,04%; kontrol = 0,043%) dan meningkatkan NPK tanah, sedangkan TB2 (tanah + biochar ampas sagu) meningkatkan C-organik dan NPK tanah. Hasil uji inkubasi tanah, menunjukkan kenaikan fluks CO₂ pada TB1 sampai hari ke-5 dan mengalami penurunan pada hari ke-10 sampai hari terakhir inkubasi, sedangkan untuk TB2 emisi CO₂ terus meningkat. Hasil uji pH selama inkubasi berlangsung tidak mengalami perubahan yang signifikan. Berdasarkan hasil pengujian ini maka dapat disimpulkan bahwa serbuk kayu lebih efektif menyerap emisi CO₂, sedangkan ampas sagu lebih efektif dalam meregenerasi tanah.

Kata kunci : B0, B1, B2, CO₂, C-organik.

ABSTRACT

The increase in CO₂ gas occurs because more gas is produced than it absorbs. This results in the accumulation of CO₂ gas in the atmosphere and causes global warming. Biochar has a stable aromatic ring structure and is porous, so it can absorb and store soil carbon for a long period of time as soil amendment while also regenerating soil. Wood sawdust biochar (B1) and sagu pulp (B2) are pyrolyzed at 600 and 400 °C respectively for one and two hours. The CO₂ emission absorption process is carried out by incubating soil that has been mixed with biochar for 20 days. The results of the characterization test (moisture content and surface area) of both types of biochar show that B1 has a greater moisture content and surface area than B2. In the soil quality test, it was found that TB1 (soil + wood sawdust biochar) decreased C-organic (C-organic = 0.04%; control = 0.043%) and increased soil NPK, while TB2 (soil + sagu pulp biochar) increased C-organic and soil NPK. The results of the soil incubation test showed that the CO₂ flux increased in TB1 until the 5th day and decreased on the 10th day until the last day of incubation, while for TB2 CO₂ emissions continued to increase. The results of the pH test during

incubation did not experience significant growth. Based on the results of this test, it can be concluded that Wood Sawdust is more effective in absorbing CO₂ emissions, while sago pulp is more effective in regenerating soil.

Key Word : B0, B1, B2, CO₂, C-organic.

Pendahuluan

Laju emisi CO₂ secara signifikan dihasilkan dari kegiatan industri, pertambangan, asap kendaraan, pertanian, kehutanan, dan industri manufaktur lainnya. Pada abad ke-21 diperkirakan suhu bumi akan meningkat sebesar 1,5-5,8 °C, bahkan setelah 11 tahun terakhir suhu permukaan bumi telah dilaporkan meningkat sebesar 0,8 °C, selain kenaikan suhu rata-rata global, pelepasan karbon ke atmosfer juga dilaporkan menyebabkan kenaikan air laut sebesar 15-23 cm selama abad ke-20, kerusakan ekosistem dan kebakaran hutan juga menyebabkan semakin cepatnya laju emisi karbon. Laju emisi karbon yang telah terjadi menyebabkan rusaknya lapisan ozon yang diakibatkan oleh Gas Rumah Kaca (GRK). Kondisi ini telah dilaporkan terjadi sejak 1850 (awal periode revolusi industri) (Sudibya *et al.*, 2022).

Sektor pertanian dan tata guna lahan menyumbang emisi CO₂ dengan jumlah 29,9 Gigaton/tahun atau berkisar 20% dari total emisi global. Emisi tersebut dihasilkan dari respirasi tanah. Respirasi tanah terdiri dari respirasi akar, respirasi di permukaan tanah, dan degradasi bahan organik tanah. Respirasi tanah menghasilkan produk akhir yaitu CO₂ dan H₂O (Sasmita & Septiyanda, 2022). Gas CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer dari kegiatan di bumi lebih banyak dibandingkan dengan gas CO₂ yang di serap oleh bumi sehingga terjadi penambahan nilai CO₂ di atmosfer (Pratama, 2019).

Salah satu cara terbaik mengurangi emisi CO₂ adalah menggunakan kembali sisa tumbuhan yaitu limbah biomassa yang dikonversi menjadi biochar (Sarwono, 2016). Menurut Woolf *et al.* (2010), implementasi biochar berkelanjutan berpotensi

mengurangi emisi karbon sebesar 12% dari total emisi CO₂ ekivalen yang dihasilkan dari kegiatan antropogenik yaitu 1,8 Gigaton/tahun dari 15,4 Gigaton emisi yang dilepas per tahun. Contoh biomassa yang digunakan menyerap CO₂ adalah limbah bubur kertas dan pohon jagung (Igalavithana *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2022).

Pada penelitian ini, biomassa yang digunakan yaitu serbuk kayu dan ampas sago. Penambahan biochar dari serbuk kayu dan ampas sago diharapkan dapat menyerap karbon untuk mengurangi emisi global. Banyaknya jumlah biochar pada tanah maka akan memperbesar kapasitas CO₂ yang dapat ditahan oleh biochar tersebut sehingga diharapkan dapat mengurangi emisi CO₂ dari respirasi tanah (Herlambang *et al.*, 2021). Berdasarkan permasalahan di atas, maka Peneliti melakukan penelitian ini dengan tujuan membandingkan efektivitas biochar dari ampas kayu dan ampas sago sebagai penyerap emisi CO₂ di dalam tanah.

Metode Penelitian

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah furnace, beker, botol ukuran 30 m, galon ukuran 1,5 L, oven, cawan porselen, lemari asam, timbangan analitik, desikator, pH meter, ayakan 40 mesh, batang pengaduk, spatula, pipet tetes, Erlenmeyer 100 mL, statif dan klem, buret 50 mL, gelas ukur 10 mL, corong kaca, botol semprot, kertas saring, aluminium foil, labu destilat, kondensor, pompa, dan spektrofotometer UV-Vis.. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah gergajian kayu dan ampas sago sebagai bahan baku biochar, tanah pada kedalaman 10-30

cm, NaOH 40% dan 1 M, HCl 1 M, indikator PP, indikator MM, ekstrak olsen, KH_2PO_4 , ammonium heptamolibdat, asam askorbat, antimonium kalium tartrat, indikator universal, KCl 1 M, katalisator berupa CuSO_4 dan K_2SO_4 (1:2), indikator conway, H_2SO_4 pekat, asam borat, serbuk Zn, glukosa, dan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1 N. Penelitian dilakukan di Laboratorium Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Cenderawasih, dari bulan Februari hingga Juni 2024.

Pembuatan Biochar

Bahan baku biochar berupa serbuk kayu dan ampas sagu dicuci menggunakan air bersih. Setelah itu masing-masing cangkang dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 105°C selama 1 jam untuk menghilangkan kadar air pada kedua sampel. Serbuk kayu kemudian dipirolisis pada suhu 600°C selama 1 jam dan ampas sagu pada suhu 400°C pada suhu puncak (Ghani, 2014; Anastasia, 2022). Masing-masing biochar diayak sampai lolos saringan ukuran 40 mesh.

Persiapan dan uji karakteristik tanah

Sampel tanah diambil dari daerah Koya Timur. Sampling tanah dilakukan pada kedalaman 10-30 cm. Hal ini karena pada lapisan ini memiliki kandungan bahan organik dan mineral yang tinggi. Sampel tanah diambil secara acak menggunakan cangkul. Tanah yang dipakai memiliki karakteristik berwarna kehitaman, kasar, bergumpal, dan padat.

Pengujian Penyerapan Emisi CO_2

Penelitian utama dilakukan di wadah plastik yang mana masing-masing wadah diisi dengan 250 gram tanah. Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap jenis biomassa dan temperatur. Suhu pirolisis ampas sagu sudah dalam suhu terbaik dalam proses pembuatan biochar, yaitu masing-masing sampel serbuk kayu dan ampas sagu dipirolisis dengan suhu 600°C dan 400°C , serta perlakuan control tanpa penambahan biochar. Pada reaktor dengan penambahan biochar digunakan dosis sebesar 10% (Sasmita *et al.*, 2022) dari berat sampel tanah. Masing-masing perlakuan dilakukan 1 kali pengulangan. Setelah

itu sampel diberi tabung yang berisi larutan NaOH 0,1 M sebanyak 30 mL, lalu wadah ditutup rapat hingga kedap udara dan ditempatkan dalam ruangan dengan suhu kamar $\pm 30^\circ\text{C}$. Uji kadar CO_2 terserap pada larutan absorben NaOH 0,1 M dilakukan pada hari ke 5, 10, 15, dan 20 dengan metode titrasi asam basa. Larutan absorben kemudian akan dititrasi menggunakan HCl 0,1 M lalu didapatkan kadar CO_2 yang terserap pada larutan absorben 1 (Sasmita *et al.*, 2022).

Parameter Pengujian Lainnya

Parameter lain yang diamati dalam penelitian ini terdiri dari parameter kualitas tanah dan karakteristik biochar. Uji kualitas tanah meliputi kadar C-organik tersedia, Nitrogen, Fosfor dan Kalium. Sedangkan Karakteristik biochar dianalisis antara lain : kadar air, dan luas permukaan biochar.

Analisis dan pengolahan data

Parameter yang dianalisis pada penelitian ini adalah kadar CO_2 yang diperoleh dari metode titrasi asam basa. Untuk mengetahui nilai emisi CO_2 yang dihasilkan dapat dilihat dari hasil perhitungan dengan rumus berikut:

$$\text{Mg CO}_2 = \frac{(b-a) \times t \times 250}{n} \dots \text{persamaan 1 (Sasmita et al., 2022)}$$

Dimana:

a = ml HCl untuk sampel tanah

b = ml HCl untuk control

t = normalitas HCl

n = Jumlah hari inkubasi.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Analisis Kadar Air

Berdasarkan data pada tabel 1, didapatkan bahwa Biochar serbuk kayu (B1) memiliki kadar air yang lebih tinggi dibandingkan biochar ampas sagu (B2). Seharusnya semakin tinggi suhu pirolisis, maka semakin sedikit pula kadar airnya. Adanya perbedaan hasil dikarenakan biochar

bersifat higroskopis, sehingga dapat menyerap air di udara saat proses penimbangan sampel

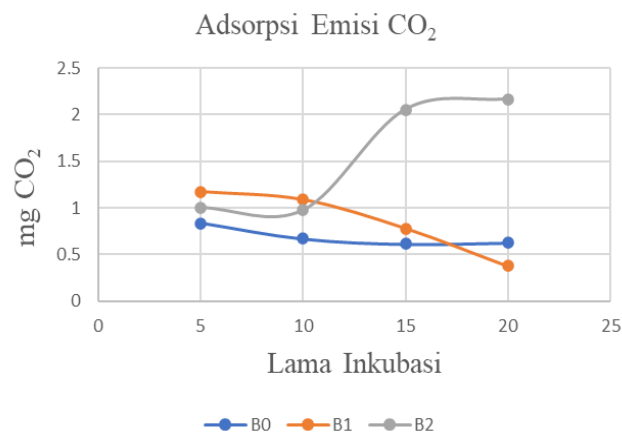
Tabel 1. Hasil Kadar Air

Kode Sampel	Massa Sampel Sebelum dioven (gr)	Massa Sampel Setelah dioven (gr)	FKa	Kadar Air (%)
B0	5,038	3,873	1,3	23
B1	1,0050	0,9135	1,1	9
B2	1,0182	0,9710	1,7	6,4

Pen

garuh Penambahan Biochar Serbuk Kayu dan Ampas Sagu Terhadap Penyerapan Emisi CO₂

Analisis emisi CO₂ diketahui dengan cara menghitung gas CO₂ yang dihasilkan setiap rentang 5 hari pengamatan. Hasil analisis ini digunakan untuk mengetahui berapa besarnya gas CO₂ yang dihasilkan selama masa inkubasi. Tiap-tiap perlakuan pada penelitian ini memiliki pengaruh yang berbeda-beda terhadap nilai emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses respirasi tanah yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Fluks Emisi CO₂

Berdasarkan grafik di atas, didapatkan bahwa B2 menghasilkan Emisi CO₂ sampai akhir

inkubasi, sedangkan untuk sampel B1 mengalami penurunan pada hari ke-10 dan di hari terakhir inkubasi emisi yang dihasil lebih sedikit daripada B0 (kontrol), yang dimana penurunan tersebut diakibatkan jumlah C labil pada biochar semakin sedikit. Oleh karena itu, pada hari terakhir inkubasi jumlah C labil sudah habis terdekomposisi oleh mikroba sehingga menghasilkan emisi CO₂ yang lebih sedikit daripada tanah tanpa penambahan biochar.

Fluks emisi CO₂ berkaitan dengan PE tanah. Biochar yang dipirolisis dengan suhu tinggi memiliki C stabil yang tinggi dan C labil yang rendah mengakibatkan sulit didekomposisi oleh mikroba. Selain itu, biochar tersebut juga memiliki luas permukaan dan daya adsorpsi yang jauh lebih besar sehingga memberikan afinitas yang kuat terhadap bahan organik.

Berdasarkan data tabel 1, dapat diketahui bahwa tingginya suhu pirolisis B1 mengakibatkan terjadinya penyerapan C organik tanah, hal tersebut dapat dilihat pada hasil pengujian C-organik dan grafik fluks emisi CO₂. Sampel TB1 (tanah dan biochar serbuk kayu) memiliki kadar C-organik yang lebih rendah daripada tanah tanpa biochar, dan menghasilkan fluks CO₂ yang lebih rendah dibandingkan dengan B2, karena selain sulit terdekomposisi B1 juga menyerap karbon tanah karena sifatnya yang berpori dan mengakibatkan emisi yang dihasilkan lebih sedikit daripada B2.

Selain itu, pemilihan bahan baku biochar dan jenis tanah dapat mempengaruhi laju emisi CO₂. B1 (serbuk kayu) yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah hasil gergajian kayu dari pengusaha mebel yang berlokasi di pasar Youtefa. Berdasarkan hasil wawancara dengan salah satu karyawan tersebut, jenis kayu yang digunakan bervariasi tergantung kebutuhan konsumen menyebabkan sulit diidentifikasi. B2 (ampas sagu) memiliki komponen kimia berupa 4,33% selulosa, 1,64% hemiselulosa, dan 1,26% lignin (Haryati *et al.*, 2022). Kandungan kimia tanah sebelum dan sesudah penambahan biochar setelah inkubasi dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 2. Kandungan Kimia Tanah Sebelum dan Sesudah Penambahan Biochar

Sampel	Kadar (%)			
	C-organik	N	P	K
TB0	1,116	1,59	10,608	0,008
TB1 ₆₀₀	0,89	2	15,678	0,012
TB2 ₄₀₀	1,5496	2,6	24,83	0,01

Keterangan :

TB = Tanah dan penambahan biochar

Hubungan Luas Permukaan Terhadap daya adsorpsi CO₂

Pengujian luas permukaan dilakukan menggunakan uji Brunauer-Emmet-Teller (BET) surface area. Cara kerja BET adalah penyerapan gas nitrogen oleh permukaan biochar pada kondisi isothermal dan vakum (Marsyahyo, 2009).

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Mukherjee et al (2021) dan Yang et al (2021) dapat disimpulkan bahwa suhu pirolisis berbanding lurus terhadap luas permukaan dan volume total pori, serta berbanding terbalik terhadap diameter pori. Menurut Botahala (2022), luas permukaan yang besar menghasilkan kapasitas penyerapan bahan kimia yang tinggi. Volume pori dapat membatasi ukuran molekul yang diadsorpsi, sementara luas permukaan membatasi jumlah material yang dapat diadsorpsi. Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan didapatkan luas permukaan biochar dari serbuk kayu lebih besar daripada ampas sagu yang telah diuji oleh Anastasia (2022), maka daya adsorpsinya juga pasti lebih besar daripada biochar ampas sagu.

Berikut adalah hasil pengujian BET serbuk kayu (B1) yang dilakukan di Laboratorium Brin, Bandung dan hasil penelitian sebelumnya sampel ampas sagu (B2) di laboratorium Undip, Malang.

Tabel 1. Hasil uji BET sampel B1 dan B2

Bahan Baku	Suhu Pirolisis (T°C)	Surface Area (m ² /g)	Total Pore Volume (cm ³ /g)	Jari-Jari Pori (nm)	Mean pore diameter
Serbuk Kayu	600	1.188,067	-	-	-
(Anastasia, 2022)	Ampas Sagu	400	3,79841	0,00786	3,796

Kapasitas adsorpsi CO₂ tergantung dari luas permukaan dan alkalitasnya yang dimana suhu pirolisis menjadi penentunya. Proses adsorpsi yang terjadi merupakan reaksi eksotermik yang luar biasa, dimana jumlah CO₂ akan berkurang

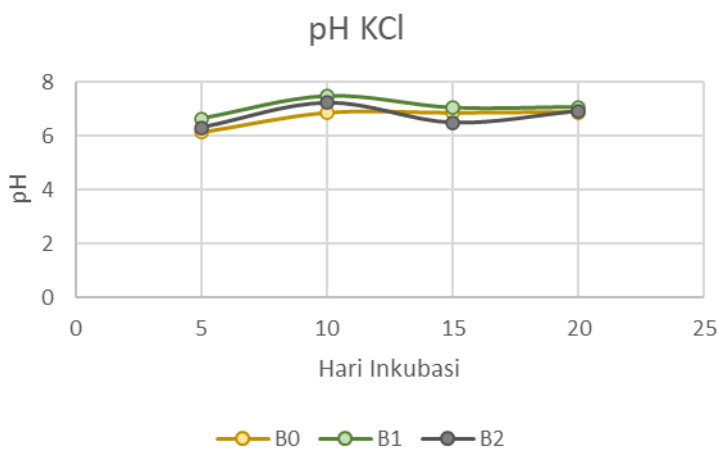
dengan meningkatnya suhu pirolisis. Biochar yang berasal dari kayu keras (lignin yang tinggi) lebih baik dalam menyerap CO₂ daripada biochar dari jenis rerumputan karena sifatnya yang lebih berpori (Lin, 2023)

Pengaruh Penambahan Biochar terhadap pH

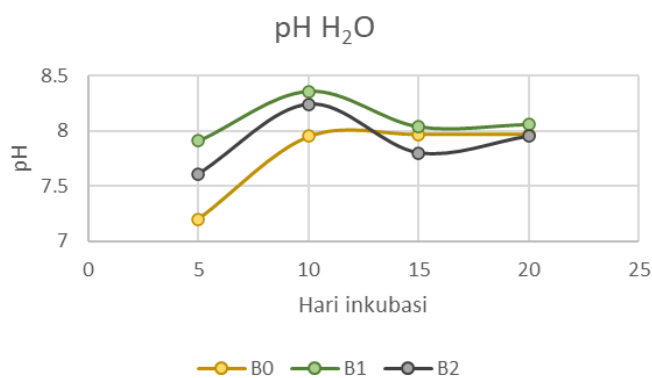
Hasil penelitian menunjukkan bahwa inkubasi pertama pH tanah actual (H₂O) dan potensial (KCl) berada dalam kondisi netral. Setelah 20 hari inkubasi dan pengamatan, pH yang dihasilkan tidak mengalami perubahan yang signifikan. Pengukuran pH tanah bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan biochar serbuk kayu dan ampas sagu terhadap pH tanah. Berikut adalah grafik pengukuran pH selama inkubasi berlangsung.

Pada gambar 2 dan 3, dapat disimpulkan bahwa reaksi pH KCl pada semua parameter dan

semua waktu inkubasi menunjukkan nilai yang lebih rendah dari pH H₂O. Suarmaprasetya & Soemarno (2021) menyatakan bahwa nilai pH menunjukkan konsentrasi ion H⁺ di dalam tanah yang dinyatakan sebagai $-\log [H^+]$. Konsentrasi H⁺ yang diekstrak dengan air menyatakan kemasaman aktif (aktual). Pengekstrak KCl 1 M menyatakan kemasaman cadangan (potensial). pH aktual adalah pH yang menunjukkan konsentrasi H⁺ di dalam larutan tanah sesuai dengan kondisi aslinya, sedangkan pH KCl atau yang disebut pH tanah potensial adalah pH yang menunjukkan nilai pH tanah setelah H⁺ di dalam jerapan tanah yang didesak keluar dan digantikan oleh kation K⁺.



Gambar 2. Grafik pH aktual (H₂O) selama Inkubasi



Gambar 3. Grafik pH potensial (KCl) selama Inkubasi.

Umumnya nilai pH KCl pada seri tanah yang ada selalu lebih rendah dari pH H₂O dan memberikan ΔpH yang negatif. Hal ini berarti bahwa tanah tersebut memiliki muatan netto yang negatif. Muatan negatif tanah tersebut ditempati oleh basa-basa yang dapat ditukar. Perubahan nilai pH tanah ini terjadi akibat biochar mengandung gugus karboksil yang berperilaku sebagai asam dan gugus amino yang berlaku sebagai asam atau basa dapat bermuatan positif maupun negatif. Jika penambahan biochar ke lingkungan basa, amino akan berubah menjadi anion dan dalam lingkungan asam akan berubah menjadi kation (Sasmita et al., 2022).

Kesimpulan

Proses pembuatan biochar adalah dengan cara mempirolisis serbuk kayu dan ampas sagu yang telah dikeringkan masing-masing pada suhu 600 dan 400° C selama 1 dan 2 jam. B1 (biochar serbuk kayu) memiliki luas permukaan dan daya serap yang lebih besar daripada B2 (biochar ampas sagu) karena adanya perbedaan jenis biomassa dan suhu pada saat dipirolisis. Biomassa dari golongan kayu keras (memiliki kandungan lignin yang tinggi) cenderung lebih bersifat berpori karena sifatnya yang keras dan padat akan menghasilkan pori yang lebih banyak daripada biomassa lain. Semakin tinggi suhu pirolisis, juga akan meningkatkan luas permukaan biochar. Hal ini dikarenakan banyaknya gugus fungsi yang hilang selama proses pirolisis berlangsung, sehingga akan menghasilkan luas permukaan yang semakin besar pula. Kadar air dari kedua biochar tergantung suhu pirolisis. Semakin tinggi suhunya maka kadar airnya pun semakin kecil. B1 memiliki kadar air yang lebih besar daripada B2 dikarenakan Teknik penimbangan yang kurang tepat. Biochar yang baru selesai dipirolisis dapat menyerap air di udara, sehingga dapat mempengaruhi penentuan kadar air. B1 lebih efektif dalam menyerap CO₂ tanah karena sifatnya yang berpori dan memiliki stabilitas struktur yang lebih baik, sehingga dapat menyerap karbon tanah serta sulit terdekomposisi oleh mikroba.

Saran

Penyerapan emisi CO₂ pada penelitian ini kurang maksimal dikarenakan kurangnya waktu inkubasi sampel. Biochar yang diterapkan ke dalam tanah dapat menyerap dan menyimpan karbon tanah dalam jangka waktu panjang sebagai amandemen tanah. Maka diperlukan penelitian lanjut dengan memperpanjang jangka waktu inkubasi, karakterisasi tanah, dan analisis komunitas mikroba selama inkubasi berlangsung. Selain itu, diperlukan analisis distribusi pori terhadap sampel serbuk kayu dan

Daftar Pustaka

- Alimah, D., Istikowati, W. T., & Nugroho, Y. (2023). Kualitas Arang Kayu Akasia Daun Kecil (*Acacia auriculiformis*). *Jurnal Hutan Tropis*, 11(2).
- Almira, U., Sasmita, A., & Isnaini. (2021). Analisis Kadar Air, Kadar Abu, Volatil Dan Fixed Carbon Pada Biochar Cangkang Sawit Dengan Variasi Suhu Pirolisis. *JOM FTEKNIK*, 8(1).
- Amin, N. F., Garancang, S., & Abunawas, K. (2023). Konsep Umum Populasi dan Sampel dalam Penelitian. *Pilar*, 14(1).
- Anastasia, J. 2022. *Pemurnian Minyak Jelantah dengan Menggunakan Adsorben Karbon Aktif dari Ampas Sagu (Metroxtlon sp.)*. (Skripsi). Fakultas MIPA Universitas cenderawasih.
- AOAC. (1990). *The United Stated of America Legally Binding Document*. Arlington : Association of Official Analytical Chemist.
- Botahala, L. (2022). *Adsorpsi Arang Aktif (Kimia Permukaan - Kimia Zat Padat - Kimia Katalis)*. Yogyakarta: CV Budi Utama.
- Climate Action 101. (2021). *What is Biochar*. https://www-patch-io.translate.google.com/blog/biochar?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=t (Diakses Pada 2 Desember 2023).
- El-Naggar, A., et al. (2019). Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 241, pp. 458–467). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.044>
- Ghani, A. (2009). Potensi Arang Hayati Biochar sebagai Komponen Teknologi Perbaikan Produktivitas Lahan Pertanian. *IPTEK Tanaman Pangan*, 4(1).
- Ghani, W. (2014). Sawdust Derived Biochar: Characterization and CO₂ Adsorption. *Applied Science*, 14(13).
- Haryati, E., Sutarman, T., & Bunga, M. (2022). Analisis Sifat Fisika dan Kandungan Lignoselulosa Limbah Ampas Sagu (*Metroxylon spp*) Asal Kabupaten Jayapura, Papua. *PHYDAGOGIC: Jurnal Fisika Dan Pembelajarannya*, 5(1), 41–47. <https://doi.org/10.31605/phy.v5i1.2167>
- Herlambang, S., et al. (2022). *Biochar Inovasi Zero Water Organik*. Yogyakarta: Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat UPN Veteran Yogyakarta.
- Herlambang, S., Yudhiantoro, D., & Gomareuzzaman, M. (2021). *BIOCHAR*. Yogyakarta: Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat UPN Veteran Yogyakarta.
- Igalavithana, A. D., et al. (2017). Heavy metal immobilization and microbial community abundance by vegetable waste and pine cone biochar of agricultural soils. *Chemosphere*, 174, 593–603. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.148>
- Iskandar, T., & Rofiatin, U. Karakteristik Biochar Berdasarkan Jenis Biomassa dan Parameter Proses Pyrolisis. *Teknik kimia*, 12(1).
- Ispitasari, R. (2022). Pengaruh Waktu Destilasi terhadap Ketepatan Uji Protein Kasar pada Metode Kjeldahl dalam Bahan Pakan Ternak Berprotein Tinggi. *JOURNAL OF LABORATORY ISSN*, 5(1).
- Jindo, K., et al. (2020). Role of biochar in promoting circular economy in the

- agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. In *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* (Vol. 7, Issue 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. New York: Routledge.
- Li, S., & Tasnady, D. (2023). Biochar for Soil Carbon Sequestration: Current Knowledge, Mechanisms, and Future Perspectives. In *C-Journal of Carbon Research* (Vol. 9, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/c9030067>
- Lin, Z. (2023). Applications of Biochar on Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS). *E3S Web of Conferences*, 424. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342403011>
- Liu, L., Tan, Z., Gong, H., & Huang, Q. (2019). Migration and Transformation Mechanisms of Nutrient Elements (N, P, K) within Biochar in Straw-Biochar-Soil-Plant Systems: A Review. *Sustainable Chemistry and Engineering* (Vol. 7, Issue 1, pp. 22–32). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04253>
- Luo, Y., Zang, H., Yu, Z., Chen, Z., Gunina, A., Kuzyakov, Y., Xu, J., Zhang, K., & Brookes, P. C. (2017). Priming effects in biochar enriched soils using a three-source-partitioning approach: ¹⁴C labelling and ¹³C natural abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, 106, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.006>
- Mageti, I. M. (2022). *Validasi Metode Penentuan Kadar Fosfor Tersedia pada Tanah dengan Metode Olsen*. Skripsi. Departemen Analisis Kimia UII Yogyakarta.
- Marsyahyo, E. (2009). Analisis Brunnaeur Emmet Teller (BET) Topografi Permukaan Serat Rami (*Boehmeria nivea*) untuk Media Penguatan pada Bahan Komposit. *Jurnal Flywheel*, 2(2)
- Mukherjee, A., et al. (2021). Carbon dioxide capture from flue gas in biochar produced from spent coffee grounds: Effect of surface chemistry and porous structure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106049>.
- Mukhlis, Hidayat, B., & Sabrina, T. (2023). *BUKU BIOCHAR*. Medan: USUpress.
- Nurmahribi, W. (2021). *Analisis Penentuan C-Organik pada Sampel*. (Skripsi). Departemen Analisis Kimia UII Yogyakarta.
- Pratama, R. (2019). Efek Rumah Kaca TERHADAP BUMI. *Buletin Utama Teknik* 14(2).
- Prayitno, M. B., Erlita, L., & Sulistyani, D. P. (2022, September 27). Pengaruh Pemberian Kapur Dolomit dan Pupuk Urea terhadap Emisi Gas Karbon Dioksida (CO₂) pada Tanaman Padi (*Oryza sativa L.*) di Tanah Gambut. *Revitalisasi Sumber Pangan Nabati Dan Hewani Pascapandemi Dalam Mendukung Pertanian Lahan Suboptimal Secara Berkelanjutan*.
- Putra, W. F., Mukhtar, Z., & Sudjatmiko, S. (2020). Emisi Karbon Permukaan Tanah Pada Beberapa Penggunaan Lahan di Daerah Tropis (Kabupaten Bengkulu Selatan). *Naturalis*, 9(1).
- Putri, A. P. (2020). *Logbook Praktikum Analisis Air, Tanah, dan Udara*. Laboratorium.
- Sakin, E., Ramazanoglu, E., & Seyrek, A. (2021). Effects of Different Biochar Amendments on Soil Enzyme Activities and Carbondioxide Emission. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(22), 2933–2944. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1971694>.
- Saputra, J., & Ardika, R. (2012). Potensi Biochar dari Limbah Biomassa Perkebunan Karet Sebagai Amelioran dan Mengurangi Emisi Gas Rumah Kaca. *Warta Perkaretan*,

- 31(1), 43.
<https://doi.org/10.22302/ppk.wp.v31i1.265>.
- Sari, R. M. Y. A. (2023). Penentuan C-organik pada Tanah untuk Meningkatkan Produktivitas Tanaman dengan Metoda Spektrofotometri UV VIS. *Teknologi Pertanian*, 12(1).
- Sarwono, R. (2016). Biochar Sebagai Penyimpan Karbon, Perbaikan Sifat Tanah, dan Mencegah Pemanasan Global: Tinjauan Biochar As Carbon Sequestration and Soil Amendment, to Avoid Global Warming: A Review. *Terap.Indones*, 18(1), 79–90.
<http://kimia.lipi.go.id/inajac/index.php>.
- Sasmita, A., & Septiyanda, U. (2022). Variasi Penambahan Dosis Biochar Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Emisi Karbon Dioksida di Topsoil. *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, 6(2).
- Sasmita, A., Isnaini, I., & Almira, U. (2022). Pengaruh Penambahan Biochar Cangkang Sawit dengan Variasi Suhu Pirolisis Terhadap Emisi CO₂ dari Top Soil. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 9(2), 439–446.
<https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2022.009.2.25>.
- Setiani, V., Priastuti, U., & Yuniarta, D. (2021). Perbaikan Kualitas Tanah Menggunakan Biochar Limbah Jagung. *Prespitasi*, 18(1).
- Suarmaprasetya, R & Soemarno, S. 2021. Pengaruh Kompos Kotoran Kambing Terhadap Kandungan Karbon dan Fosfor Tanah dari Kebun. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 8(2), 505-514.
- Sudibya, A. H., louhenapessy, S. C., & Yudha, G. W. (2022). Pemanfaatan Biochar dalam menurunkan Emisi Karbon di Hutan Industri. *Journal of Science*, 2(2).
- Sulaeman, Suparto, & Eviati. (2005). *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, dan Pupuk*.
- Suwedi, N. (2005). Upaya Pencegahan dan Penanggulangan Dampak Pemanasan Global. *Tek. Ling*, 6(2).
- Tim Jagad Kimia. (2018). *Penetapan Fosfor (P2O5) Tersedia Metode Olsen*. URL: <https://Www.Jagadkimia.Com/2018/11/Penetapan-Fosfor-P2o5-Tersedia-Metode.Html> (Diakses Pada 2 Desember 2023).
- Tim Unit Jaminan Mutu. (2012). *Istruksi Kerja Laboratorium Kimia Tanah*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Umaternate, G. R., Abidjulu, J., & Wuntu, A. D. (2014). Uji Metode Olsen dan Bray dalam Menganalisis Kandungan Fosfat Tersedia pada Tanah Sawah di Desa Konarom Barat Kecamatan Dumoga Utara. *MIPA UNSRAT ONLINE*, 3(1).
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(5). <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>.
- Yang, C., Liu, J., & Lu, S. (2021). Pyrolysis temperature affects pore characteristics of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils. *Geoderma*, 397. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115097>.
- Yang, Y., Sun, K., Liu, J., Chen, Y., & Han, L. (2022). Changes in soil properties and CO₂ emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging. *Science of the Total Environment*, 839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156333>.
- Zhang, Y., Wang, J., & Feng, Y. (2021). The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. In *Catena* (Vol. 202). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105284>.
- Zimmerman, A. R., Gao, B., & Ahn, M. Y. (2011). Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(6), 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.so>