

Biochar Berbahan Baku *Arundo Spp*; Dosis dan Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Jagung***Biochar from Raw Materials *Arundo Spp*; Effect on Corn Plant Growth and Production***Muhammad Adhan¹, Guna Darman², Syahrullah^{1*}, Ambo Upe¹, Tenri Sau²¹Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Puangrimaggalatung²Program Studi Agribisnis Fakultas Pertanian Universitas Puangrimaggalatung

*Corresponding Author: syahrullah.farming@gmail.com

ABSTRAK

Biochar banyak digunakan untuk remediasi air dan tanah karena ketersediaannya secara lokal dan biaya produksi yang rendah. Namun efektivitasnya bergantung pada sifat fisikokimia yang berkaitan dengan bahan baku dan suhu pirolisis, serta kondisi lingkungan tempat penggunaannya. Selain itu, biochar rentan terhadap penuaan alami yang disebabkan oleh perubahan kelembaban tanah atau sedimen, yang dapat mengubah sifat redoksnya dan interaksinya dengan kontaminan seperti arsenik. Oleh karena itu kami tertarik melakukan penelitian fundamental tentang bahan baku dari jenis rerumputan dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman jagung QPM. Dalam penelitian ini, kami melakukan uji laboratorium kandungan dan percobaan lapangan, Adapun perlakuannya: p0 kontrol, p1 = 3 ton ha⁻¹ biochar, p2 = 6 ton ha⁻¹ biochar, p3 = 9 ton ha⁻¹, p4 = 12 ton ha⁻¹, p5 = 15 ton ha⁻¹. Hasil percobaan menunjukkan bahwa Biochar berbahan dasar *Arundo Spp*. memiliki kapasitas pertukaran kation yang lebih besar dibandingkan biochar lainnya, yang jika dikombinasikan dengan suhu pirolisis berpotensi menyebabkan perubahan jangka panjang dalam retensi unsur hara tanah. Data yang dikumpulkan juga menunjukkan bahwa ketersediaan berbagai nutrisi biochar (misalnya N, P, K, Ca, Mg, Fe, dan Cu) dapat diprediksi berdasarkan pilihan bahan baku dan kandungan nutrisi total. Kemudian pemberian biochar berbahan *Arundo Spp*. 12 ton Ha⁻¹ mampu meningkatkan pertumbuhan dan produksi efektif tanaman jagung.

Kata kunci: Bahan baku, Biochar, *Arundo spp*. jagung

ABSTRACT

*Biochar is widely used for water and soil remediation due to its local availability and low production costs. However, its effectiveness depends on the physicochemical properties related to the raw material and pyrolysis temperature, as well as the environmental conditions where it is used. Additionally, biochar is susceptible to natural aging caused by changes in soil or sediment moisture, which can alter its redox properties and interactions with contaminants such as arsenic. Therefore, we are interested in conducting fundamental research on raw materials from grass types and their influence on the growth and production of QPM corn plants. In this research, we carried out laboratory content tests and field experiments. The treatments were: p0 control, p1 = 3 tons ha-1 biochar, p2 = 6 tons ha-1 biochar, p3 = 9 tons ha-1, p4 = 12 tons ha-1, p5 = 15 tons ha-1. The experimental results Other plant and grass-based biochars appear to have greater cation exchange capacity than other biochars, which when combined with pyrolysis temperatures could potentially lead to long-term changes in soil nutrient retention. The collected data also show that the availability of various biochar nutrients (e.g. N, P, K, Ca, Mg, Fe, and Cu) can be predicted based on the choice of raw materials and total nutrient content, showed that the administration of biochar made from *Arundo Spp*. 12 tons Ha-1 can increase the effective growth and production of corn plants.*

Keywords: Biomassa, biochar, soil properties, *Arundo Spp*. , Corn

PENDAHULUAN

Biochar merupakan produk yang kaya akan karbon (c) yang diproduksi melalui proses Pirolisis biomassa pada suhu 300 – 700 °C dalam kondisi oksigen yang terbatas. Biomassa atau bahan baku untuk produksi biochar, umumnya berasal dari produk limbah pertanian dan kehutanan, limbah kota dan limbah hijau. Pembuatan biochar dari bahan tersebut menempatkan unsur karbon adsorpsi yang dapat bertahan hingga ratusan tahun, menunjukkan bahwa biochar dapat membantu mitigasi dan adaptasi perubahan iklim sebagai salah satu dari sedikit teknologi pertanian berkelanjutan.

Dalam skala waktu yang lebih singkat, kelebihan biochar telah terbukti meningkatkan kualitas lingkungan dengan menyerap logam berat dan kontaminan organik, yang berdampak positif pada hubungan air tanah pada lahan sub optimal basah(El-Naggar et al., 2019), mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan pertumbuhan tanaman(Borchard et al., 2019a)

Kualitas biochar ditentukan oleh dua variable yang saling melengkapi, yaitu tingkat suhu pirolisis dan jenis bahan yang digunakan, namun variabel jenis bahan baku berpengaruh lebih besar terhadap karakteristik biochar(Gao et al., 2023). Dalam hal bahan baku, sangat penting memperkaya pengetahuan dan pemahaman tentang bahan baku biochar karena, bahan baku berperan penting terhadap pengaruh karakteristik dan sifat biokimia produk Biochar. Secara relatif, biochar berbahan kayu memang mengandung C lebih banyak(Tripathi et al., 2016), namun nutrisi yang tersedia bagi tanaman lebih rendah, akan tetapi biochar yang berbahan rerumputan berpotensi kandungan C dan nutrisi bagi tanaman lebih banyak dibanding bahan kayu(Simanjuntak et al., 2018a).

Biochar berbahan baku tanaman dan rerumputan ternyata memiliki kapasitas

pertukaran kation yang lebih besar daripada biochar lainnya, yang dalam kombinasi dengan suhu pirolisis, dapat berpotensi untuk menghasilkan perubahan jangka panjang dalam retensi nutrisi tanah(Brewer et al., 2012). sangat mirip dengan limbah tanaman ini, hal ini mengisyaratkan bahwa biochar dari bahan rerumputan berpotensi dijadikan sebagai komponen biochar potensial hara esensial(Liu et al., 2019). Namun, rumput jenis *Arundo* spp. yang keberadaanya melimpah di daerah pesisir danau dan sungai belum banyak dikaji secara ilmiah untuk substrat tanaman tutupan lahan dapat memberikan manfaat tambahan, termasuk pengelolaan air amandemen biochar pada hujan yang lebih baik, peningkatan penyerapan karbon. Limbah tanaman, rerumputan lain, dan biochar pupuk kandang/biosolid memiliki KTK dan pH yang lebih besar dibandingkan dengan biochar berbasis kayu. CEC dapat dihasilkan selama pirolisis, karena permukaan teroksidasi dan gugus fungsi anorganik terbentuk. Peningkatan KTK juga dapat dikaitkan dengan peningkatan pH yang mengarah ke muatan yang bergantung pada pH, atau endapan yang tidak larut yang ada dalam abu yang bertindak sebagai tempat reaksi

Morfologi rerumputan *Arundo* spp. bahan baku biochar. Maka hipotesis awal bahan baku dari rerumputan *Arundo* spp. menghasilkan beragam unsur hara esensial apabila diujicoba dengan berbagai suhu pirolisis. Namun, penyiapan bahan baku dari *Arundo* Spp. dan perannya dalam perbaikan dan remediasi tanah, serta dampaknya terhadap pertumbuhan tanaman jagung dan hasil panen, belum ditinjau secara kritis. Oleh karena itu, penelitian bertujuan untuk mengetahui karakterisasi dan penerapannya biochar dari bahan baku baru sehingga berdampak pada kemajuan terbaru dalam persiapan Biochar dan mekanisme yang digunakan untuk meningkatkan NUE dan produksi tanaman, serta perannya dalam produksi tanaman

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan di lahan penelitian Fakultas Pertanian Universitas Puangrimaggalutung Kelurahan Wiringpalenna kecamatan Tempe kabupaten Wajo. Pada ketinggian 30 mdpl. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei sampai dengan Agustus 2023. Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini ialah benih jagung QPM, *polybag*, *planter bag*, tanah, arang *Arundo spp.* pyrolysis, pengukur suhu, dan drum.

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan satu faktor. Perlakuan dosis biochar berbahan *Arundo spp.* dengan 4 taraf, yaitu; Kontrol (B0); 5 ton / hektar (B1); 10 ton / hektar (B2); 15 ton / hektar (B3). Jika dari hasil analisis sidik ragam menunjukkan pengaruh yang nyata, maka dilanjutkan dengan Uji Beda Rataan berdasarkan Duncan Multiple Range Test (DMRT) pada taraf 5%.

Pelaksanaan penelitian meliputi pembuatan alat pirolisis dari bahan drum bekas yang dimodifikasi berdasarkan fungsi pemanasan 300⁰C - 450⁰C, di dalam drum terdapat corong vertical yang berfungsi mengeluarkan asap minim, sehingga pembakaran tetap berlanjut sampai bahan baku terbakar tidak sempurna menjadi biochar. bahan baku biochar dimasukkan ke dalam drum lalu pembakaran dimulai dengan pancingan api adari bawah yang membakar kayu yang telah disiapkan sebelumnya. Setelah bahan baku sudah terlihat kehitaman maka api sudah bisa dipadamkan. Selanjutnya menyiapkan media tanam, tanah yang telah dicampur biochar, persiapan benih, pengaplikasian biochar,

penanaman, pemupukan, pengaplikasian pupuk orgaik cair, pemeliharaan tanaman, dan panen. Peubah pengamatan yang diamati adalah tinggi tanaman dari 2 sampai 7 MST, Tinggi tanaman, Berat biomassa, bobot biji, indeks biji (%) bobot kering tajuk pada 7 MST, umur keluar bunga jantan, umur keluar bunga betina pada 8 MST, panjang tongkol, diameter tongkol, produksi per sampel dan produksi per plot pada 12 MST.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Biochar dari Bahan Baku *Arundo Spp.*

Struktur biochar *Arundo Spp.* kaya akan karbon dengan nilai 30-60%, biochar memiliki kandungan karbon (C) yang tinggi dengan kumpulan utilitarian dan membentuk cincin harum dari enam C iotas yang diperkuat. Biochar juga terdiri dari komponen H, O, N, dan S. Kandungan biochar lainnya kadang- kadang mengandung suplemen skala besar (N, P, Ca, Mg) dan miniatur (Zn, Cu, Mn).

Konstruksi permukaan biochar bersifat permeabel dengan kandungan karbon tinggi yang memiliki struktur berbeda, Sifat biochar seperti porositas dan kapasitas adsorpsi yang tinggi, juga telah disarankan untuk digunakan dalam pengembangan pembawa N untuk pertanian berkelanjutan(Ippolito et al., 2020). Penggunaan pupuk N berbasis biochar telah dianggap sebagai salah satu strategi yang paling efektif untuk mengurangi kehilangan N. Sebagai contoh, Jia et al.,(2021) menunjukkan peningkatan NUE sekitar 20% dengan menggunakan Biochar berbahan rumput.

Tabel 2. Rata-rata konsentrasi unsur hara makro total biochar berdasarkan jenis pirolisis, sumber bahan baku, dan suhu pirolisis, berdasarkan berat kering.

Uraian	Jenis Unsur Hara Makro								
	C (%)	H (g kg ⁻¹)	O (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)
Bahan Baku: <i>Arundo Spp.</i>	63.6	5,11	20,9	1,80	0,51	20,1	59.1	45.9	34.3
Jenis Pyrolisis:									
Cepat	60,6	3,37	19.1	1.63	0,85	14,2	46,8	44,3	43,5
Lambat	60,8	3,36	18.4	1.62	0,55	12,0	22,8	29,1	5.73

Kandungan total C pada biochar sering kali meningkat karena sebagian besar bahan baku mengandung konsentrasi C yang cukup besar, namun pilihan bahan baku secara signifikan mempengaruhi kandungan biochar (Tabel 2). Biochar berbahan rumput *Arundo Spp.* hal ini terjadi karena kurangnya unsur lain (misalnya, N, S, P, K, Ca, dan P) yang menyebabkan efek pengenceran unsur C yang lebih kecil pada bahan baku tersebut, yang berbeda dengan biochar yang berbahan dasar kayu.

Senyawa biochar C dapat dikelompokkan menjadi senyawa C aromatik yang relatif terkondensasi (stabil, tidak dapat dimineralisasi), dibandingkan dengan senyawa C aromatik yang lebih mudah terurai, mikromolekul, atau larut dalam air (Joseph et al., 2021). Selama pirolisis, dehidrasi, pembelahan, dan reaksi polimerase menyebabkan senyawa C yang mudah terdegradasi menjadi terestrukturisasi, sementara unsur-unsur lain mungkin hilang karena penguapan, sehingga kandungan C total biochar secara keseluruhan meningkat seiring dengan peningkatan suhu pirolisis (Weber dan Quicker 2018; Antal dan Grønli 2003; Tabel 2. Ketersediaan hayati biochar C bergantung pada

suhu, dengan suhu pirolisis yang lebih tinggi berhubungan dengan fraksi C yang lebih besar dan tidak labil. Temperatur pirolisis yang lebih tinggi cenderung menghasilkan senyawa C aromatik dan kompleks silikat-karbon yang relatif stabil dan biasanya dianggap bandel terhadap oksidasi mikroba (Chen et al., 2018; Guo et al., 2022; Laghari et al., 2016). Ketika ditempatkan di dalam tanah, C yang bandel dapat bertahan ratusan hingga ribuan tahun, dan oleh karena itu, penerapan biochar pada lahan mungkin berperan dalam mitigasi iklim (Borchard et al., 2019b; Li et al., 2019; Sohi et al., 2010; Wang et al., 2020).

Peningkatan suhu pirolisis secara signifikan meningkatkan kandungan biochar C melalui hilangnya penguapan unsur-unsur lain, terutama H dan O (Tabel 2). Ketika suhu pirolisis meningkat, air, gugus fungsi permukaan organik, dan tar hilang, yang semuanya mengandung atom H dan O. Selama pirolisis, O dilepaskan dengan laju yang lebih besar dibandingkan H, dengan produk akhir biochar ditandai dengan penurunan rasio H/C dan mengandung kandungan oksigen yang rendah. Oleh karena itu, memahami rasio antara H, C, dan O.

Respon dan Karakteristik Tanaman Jagung terhadap Perlakuan

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam diketahui bahwa perlakuan biochar *Arundo Spp.* berpengaruh nyata terhadap pengamatan Tinggi Tanaman, biomassa, berat biji (Tabel 3) Perlakuan biochar 15 ton per hektar menghasilkan rataan tinggi tanaman tertinggi yaitu 202 cm, (15 ton/ha). Lehmann and Joseph (2009) yaitu bahwa dalam tanah, biochar menyediakan habitat bagi mikroba tanah, biochar yang diaplikasikan dapat tinggal dalam tanah selama ratusan atau bahkan ribuan tahun.

Dalam jangka panjang biochar tidak mengganggu keseimbangan karbon-nitrogen, tetapi bisa menahan dan menjadikan air dan nutrisi lebih tersedia bagi tanaman. bila digunakan sebagai pembenah tanah bersama pupuk organik dan anorganik, biochar dapat meningkatkan produktivitas, serta retensi dan ketersediaan hara bagi tanaman. Aplikasi biochar ke tanah dianggap sebagai suatu pendekatan yang baru dan unik untuk menjadikan suatu penampung (sink) bagi CO2 udara dalam jangka panjang pada ekosistem darat

Tabel 3. Karakteristik pertumbuhan dan produksi Jagung terhadap berbagai dosis biochar

Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm)	Biomassa (kg)	Berat biji (kg)	Indeks Biji (%)
Kontrol	186 b	3,13e	3,98d	76,6d
3 ton/Ha ⁻¹	192ab	3,88c	4,88bc	82,5dbc
6 ton/Ha ⁻¹	195ab	3,63d	4,45cd	80,1c
9 ton/Ha ⁻¹	195ab	3,94bc	5,11b	80,5cd
12 ton/Ha ⁻¹	192ab	4,37a	5,76a	87,1a
15 ton/Ha⁻¹	202a	4,14ab	5,27b	86,1ab

Ket: Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada Uji DMRT 5%

Biochar juga mampu meningkatkan unsur hara seperti P di dalam tanah yang terjadi melalui penurunan adsorpsi P karena proses pirolisis ternyata menghasilkan asam – asam organik yang dapat menyelimuti permukaan liat pada tanah. P dapat dilepas melalui organokompleks pada ujung – ujung aromatik biochar sekam padi pada gugus fungsional dari asam organik, keadaan tersebut menyebabkan luas permukaan adsorpsi P berkurang dengan menurunnya adsorpsi P tanah yang meningkatkan ketersediaan P. Biochar yang berasal dari kotoran ternak hewan juga dilaporkan lebih tinggi dalam meningkatkan P dalam tanah (Salawati et al., 2016; Gao dan Deluca, 2016).

Biochar meningkatkan penyimpanan karbon tanah tergantung pada jenis biochar dan tanah. Meta-analisis global menunjukkan peningkatan relatif yang signifikan masing-masing sebesar 64,3 dan 84,3% untuk total karbon dan karbon organik (Simanjuntak et al., 2018a). Penyimpanan karbon tanah dapat meningkat melalui dampak langsung dan tidak langsung. Efek langsung mencakup penambahan C stabil, sedangkan efek tidak langsung mencakup priming negatif (Blanco-Canqui et al., 2020). Biochar memiliki kepadatan muatan dan luas permukaan yang lebih tinggi untuk adsorpsi kation, sehingga meningkatkan

Biochar dapat meningkatkan hasil panen pada kondisi stres air. Dalam studi ini, kami mengamati hasil biji-bijian dan biomassa yang secara signifikan lebih tinggi atau sebanding dengan biochar dalam kondisi kekeringan dan basah dibandingkan dengan tanpa perlakuan biochar. Namun, hasil jagung umumnya lebih tinggi pada kondisi basah.

Kekeringan mempengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman dengan

menghambat perluasan daun dan konduktansi stomata (Ali et al. 2017).

Produktivitas jagung rata-rata dalam penelitian ini adalah 6,04 dan 8,76 kg m⁻² untuk tahun kekeringan (2017) dan tahun basah (2018), yang menunjukkan efek menguntungkan dari curah hujan dan air tanah terhadap produktivitas jagung. Memang benar, SWC lebih tinggi pada tahun basah dibandingkan dengan tahun kekeringan, dan penyimpanan air meningkat secara konsisten dengan penggunaan biochar. Biochar dapat meningkatkan ketersediaan air dengan meningkatkan jumlah air yang tertahan pada kapasitas lapang (Koide et al. 2015).

Selain itu, penambahan biochar akan meningkatkan sifat fisik dan biologi tanah (Hidayat et al., 2022). secara signifikan dapat meningkatkan hasil jagung. Ali et al., (2018), Kiboi et al., (2019), Zhang et al., (2016) dan Kang et al., (2018) juga menekankan pentingnya perbaikan tanah terhadap penyimpanan air serta pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

Menariknya, Tanaman jagung mungkin mendapat manfaat dari unsur hara yang tersedia dalam pupuk anorganik dan perbaikan sifat tanah dengan penambahan biochar. Hasil panen perlakuan dosis 15ton/ha agak lebih rendah dibandingkan dengan hasil di bawah dosis 12ton/ha, hal ini mungkin disebabkan oleh lambatnya mineralisasi unsur hara jerami (Simanjuntak et al., 2018b).

Tingkat penerapan biochar juga merupakan faktor penting yang mempengaruhi hasil gabah (Yeboah et al. 2016), yang berada di luar cakupan penelitian ini. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini bermanfaat untuk meningkatkan penyimpanan air tanah, adaptasi tanaman, dan hasil panen dalam kondisi kekeringan.

SIMPULAN

Biochar dapat diaplikasikan sendiri atau dikombinasikan dengan pupuk anorganik. Namun, manfaat hasil yang lebih besar terlihat ketika biochar diaplikasikan tidak lebih dari dosis 15 ton ha⁻¹. Kemudian pemberian biochar berbahan *Arundo Spp.* 12 ton Ha⁻¹ mampu meningkatkan pertumbuhan dan produksi efektif tanaman jagung. Penambahan biochar ke dalam tanah dapat menghasilkan hasil biji-bijian dan biomassa yang jauh lebih tinggi atau sebanding selama tahun-tahun kering dan basah dibandingkan tanpa pengelolaan biochar. hal ini mungkin disebabkan oleh membaiknya penyimpanan air tanah. Perbaikan karbon tanah dapat menjadi obat mujarab untuk menurunkan gas rumah kaca dan memitigasi perubahan iklim, dan penelitian mengenai hal ini dapat

memberikan manfaat. Secara keseluruhan, biochar dapat meningkatkan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah serta hasil biji-bijian di bawah kekeringan dan tekanan iklim, namun penelitian jangka panjang diperlukan untuk mendapatkan kesimpulan yang lebih pasti.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan pendanaan dari Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi(DRTPM) KEMENDIKBUD-RISTEK, begitupula kepada LPPM-PM Universitas Puangrimaggalatung atas koordinasi dan pengawasannya sehingga penelitian ini berjalan dengan baik dan sesuai yang diharapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M. L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J. A., & Novak, J. (2019a). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. In *Science of the Total Environment* (Vol. 651, pp. 2354–2364). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
- Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M. L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J. A., & Novak, J. (2019b). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 651, 2354–2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
- Brewer, C. E., Loynachan, T. E., Schmidt-Rohr, K., Shanks, B. H., & Vigil, D. R. (2012). *Biochar characterization and engineering*.
- Chen, H., Ma, J., Wei, J., Gong, X., Yu, X., Guo, H., & Zhao, Y. (2018). Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. *Science of the Total Environment*, 635, 333–342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.127>
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M., & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. In *Geoderma* (Vol. 337, pp. 536–554). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
- Gao, S., Harrison, B. P., Thao, T., Gonzales, M. L., An, D., Ghezzehei, T. A., Diaz, G., & Ryals, R. A. (2023). Biochar co-compost improves nitrogen retention and reduces carbon emissions in a winter wheat cropping system. *GCB Bioenergy*. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13028>
- Guo, S., Wu, J., Han, Z., Li, Z., Xu, P., Liu, S., Wang, J., & Zou, J. (2022). The legacy effect of biochar application on soil nitrous oxide emissions. *GCB Bioenergy*. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13022>
- Hidayat, B., Ulina S, N. W., & Utami, A. (2022). Utilization of Biomass in The Form Biochar and Compost on Soil Properties. *Jurnal Pertanian Tropik*, 9(3), 182–191. <https://doi.org/10.32734/jpt.v9i3>
- Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. In *Biochar* (Vol. 2, Issue 4, pp. 421–438). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. In *GCB Bioenergy* (Vol. 13, Issue 11, pp.

- 1731–1764). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Laghari, M., Naidu, R., Xiao, B., Hu, Z., Mirjat, M. S., Hu, M., Kandhro, M. N., Chen, Z., Guo, D., Jogi, Q., Abudi, Z. N., & Fazal, S. (2016). Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. In *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Vol. 96, Issue 15, pp. 4840–4849). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7753>
- Li, Z., Unzué-Belmonte, D., Cornelis, J. T., Linden, C. Vander, Struyf, E., Ronsse, F., & Delvaux, B. (2019). Effects of phytolith rice-straw biochar, soil buffering capacity and pH on silicon bioavailability. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04013-0>
- 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. In *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* (Vol. 7, Issue 1, pp. 22–32). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04253>
- Simanjuntak, D. M., Rahmawati, N., Program, R. S., Agroteknologi, S., Pertanian, F., & Medan, U. (2018a). Respons Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Jagung Manis Terhadap Aplikasi Biochar dan Pupuk Organik Cair Growth Response and Production of Sweet Corn Crop by Application of Biochar and Liquid Organic Fertilizer. In *Jurnal Pertanian Tropik e-ISSN* (Vol. 5, Issue 3). <https://jurnal.usu.ac.id/index.php/Tropik>
- Simanjuntak, D. M., Rahmawati, N., Program, R. S., Agroteknologi, S., Pertanian, F., & Medan, U. (2018b). Respons Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Jagung Manis Terhadap Aplikasi Biochar dan Pupuk Organik Cair Growth Response and Production of Sweet Corn Crop by Application of Biochar and Liquid Organic Fertilizer. In *Jurnal Pertanian Tropik e-ISSN* (Vol. 5, Issue 3). <https://jurnal.usu.ac.id/index.php/Tropik>
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105(1), 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 55, pp. 467–481). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Wang, Y., Liu, Y., Zhan, W., Zheng, K., Wang, J., Zhang, C., & Chen, R. (2020). Stabilization of heavy metal-contaminated soils by biochar: Challenges and recommendations. *Science of the Total Environment*, 729, 139060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139060>