

Assistance for Sugarcane Cultivation and Post-Harvest Processing as a Regional Superior Product in Nagari Talang Babungo, Solok Regency

Resti Fevria^{*#1,2}, Vauzia^{#2}, Yulkifli^{#3}, Santi Diana Putri^{#1}, Roni Jarlis^{#1}

¹ Departemen Agroindustri, FMIPA Universitas Negeri Padang, Sijunjung, 27511, Indonesia

² Departemen Biologi, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Padang, 25132, Indonesia

³ Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Padang, 25132, Indonesia

* Correspondence: restifevria@fmipa.unp.ac.id ; Tel.: ++62-821-697-44547

Diterima 27 September 2024, Disetujui 27 Maret 2025 Dipublikasikan 31 Maret 2025

Abstract – Nagari Talang Babungo in Solok Regency, West Sumatra, exhibits significant potential for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivation. While the current average sugarcane yield in this area is 70 tons/ha, the maximum potential could reach 150 tons/ha. This research aims to enhance sugarcane productivity through the application of biochar, produced from agricultural waste including bagasse, as a soil amendment. Biochar has been shown to improve soil fertility and nitrogen use efficiency in plants. To capitalize on this potential, a comprehensive mentoring program has been implemented to enhance farmers' knowledge and skills in sugarcane cultivation and post-harvest processing techniques. Results demonstrate that biochar application can increase sugarcane biomass production by up to 23% and improve nitrogen use efficiency by up to 35%. Moreover, the socialization and training initiatives have significantly improved farmers' understanding, with average participant scores rising from 42.3 to 85.7 after program completion. The integration of biochar application and effective training not only boosts sugarcane productivity but also supports local economic development and agricultural sustainability in Nagari Talang Babungo. This program aligns with local government policies aimed at enhancing food security and agricultural productivity, thus contributing to the region's overall development strategy.

Keywords : Cultivation, Sugarcane, Post-harvest, Talang Babungo

Pendahuluan

Nagari Talang Babungo di Kabupaten Solok, Sumatera Barat, memiliki potensi besar dalam pengembangan tebu (*Saccharum officinarum* L.). Rata-rata produksi 70 ton/ha, padahal produksi tebu bisa mencapai 150 ton/ha [1]. Salah satu pendekatan inovatif untuk meningkatkan produktivitas tebu adalah budidaya tebu dengan menggunakan biochar limbah tebu. Biochar merupakan bahan pembenah tanah yang dapat meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman [2].

Inovasi yang menjanjikan untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian tebu. Penggunaan biochar dalam budidaya tebu telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam beberapa penelitian terbaru. Menurut [3], melaporkan peningkatan produksi biomassa tebu hingga 23% dengan aplikasi biochar. Sementara itu, [4] menemukan bahwa biochar dapat meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen pada tanaman tebu hingga 35%.

Pendampingan kepada petani dalam budidaya dan pengolahan pasca panen tebu

sangat penting untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan petani, sehingga dapat menghasilkan produk tebu yang berkualitas tinggi dan berdaya saing. Dengan memanfaatkan potensi tebu sebagai produk unggulan daerah, diharapkan dapat meningkatkan pendapatan petani dan berkontribusi pada pengembangan ekonomi lokal di Nagari Talang Babungo. Program pendampingan ini sejalan dengan kebijakan pemerintah daerah yang bertujuan untuk meningkatkan produktivitas pertanian dan mendukung ketahanan pangan melalui pengembangan produk unggulan. Melalui integrasi teknik budidaya yang baik dan pengolahan pasca panen yang efisien, diharapkan dapat memberikan manfaat jangka panjang bagi keberlanjutan produksi tebu dan kesejahteraan masyarakat setempat. Selain itu, inovasi dalam teknik budidaya dan pengolahan pasca panen, termasuk penggunaan biochar, dapat menjadi solusi untuk meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tebu, serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Solusi/Teknologi

Kegiatan program pengembangan produk unggulan daerah (PPPUD) menawarkan solusi untuk meningkatkan produktivitas tebu di Nagari Talang Babungo, solusi inovatif yang dapat diterapkan adalah penggunaan biochar sebagai bahan pembenah tanah. Biochar terbukti mampu meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman, dengan penelitian menunjukkan peningkatan produksi biomassa tebu hingga 23% dan efisiensi penggunaan nitrogen hingga 35% [3] [4]. Oleh karena itu, program pelatihan bagi petani perlu dilaksanakan untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan mereka dalam budidaya tebu dengan integrasi biochar.

Pelatihan ini mencakup teknik pembuatan biochar dari limbah tebu,

budidaya tanaman tebu dengan mengaplikasikan biochar, pengolahan pasca panen tebu menjadi produk minuman yang menambah nilai jual produk. Dengan penerapan teknologi ini, diharapkan dapat meningkatkan produktivitas tebu, pendapatan petani, dan daya saing produk tebu lokal, serta mendukung pengembangan ekonomi lokal berbasis tebu di daerah tersebut. Solusi yang ditawarkan berlandaskan beberapa peneliti terdahulu yang menyatakan bahwa kemampuan petani dalam budidaya tebu dapat ditingkatkan dengan melaksanakan program pendampingan tebu menjadi produk unggulan di daerah ini [5] [6].

Hasil dan Diskusi Sosialisasi dan Edukasi Kepada Masyarakat

Hasil diskusi menunjukkan bahwa sosialisasi mengenai budidaya tebu dengan pemanfaatan biochar telah memberikan dampak positif yang signifikan terhadap produktivitas dan kualitas tanaman.



Gambar 1. Tim PPUD



Gambar 2. Pelaksanaan Kegiatan PPUD

Penggunaan biochar sebagai bahan pembenah tanah tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap nutrisi. Hal ini terbukti dari peningkatan produktivitas tebu yang mencapai 105.3 ton/ha, dibandingkan dengan 84.7 ton/ha pada perlakuan tanpa biochar. Selain itu, sosialisasi ini juga mencakup pelatihan kepada petani mengenai teknik pengolahan pasca panen tebu, yang berfokus pada pembuatan minuman kekinian berbasis tebu.

Beberapa studi tentang analisis data di daerah ini telah mengkaji dinamika karbon dan aktivitas enzim β -glukosidase di lapisan topsoil dan subsoil pada lahan pertanian monokultur di Nagari Alahan Panjang, Sumatera Barat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan karbon organik dan aktivitas β -glukosidase lebih tinggi di lapisan topsoil dibandingkan dengan subsoil. Aktivitas enzim ini berperan penting dalam siklus karbon tanah, yang berdampak pada kesuburan tanah dan produktivitas tanaman. Penelitian ini menekankan pentingnya pengelolaan tanah yang berkelanjutan untuk mempertahankan kualitas tanah dan mendukung pertanian yang produktif [7]

Hasil ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa tanah pada perkebunan tebu di Sumatera umumnya memiliki kesuburan yang rendah, yang berpotensi berdampak pada produktivitas tebu di daerah tersebut [8]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa pengelolaan yang baik, termasuk penggunaan biochar, dapat membantu meningkatkan kondisi tanah dan produktivitas pertanian [9].

Budidaya Tebu dengan Biochar Limbah Tebu dan Pengolahan Pasca Panen Tebu

Biochar diproduksi dari limbah pertanian seperti sekam, jerami padi dan ampas tebu yang mengalami pirolisis

modifikasi [10]. Tabel di bawah ini memberikan edukasi tentang karakteristik biochar secara umum dari yang dikutip dari beberapa sumber dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik biochar

Parameter	Nilai
pH	9.2
C-organik (%)	72.5
N-total (%)	1.2
P-total (%)	0.5
K-total (%)	1.8
KTK (cmol/kg)	35.7

Dapat dilihat pada tabel di atas, Karakteristik biochar yang dianalisis menunjukkan potensi yang sangat baik untuk digunakan sebagai bahan pembenah tanah, terutama dalam konteks meningkatkan kesuburan tanah di Nagari Talang Babungo. Dengan pH sebesar 9.2, biochar ini tergolong alkalin, yang dapat membantu menetralkan tanah masam di daerah tersebut. pH yang lebih tinggi pada biochar dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi penting, seperti kalsium dan magnesium, yang sering kali terikat dalam tanah masam, sehingga meningkatkan pertumbuhan tanaman [11].

Kandungan C-organik yang mencapai 72.5% menunjukkan bahwa biochar ini kaya akan karbon, yang berfungsi sebagai sumber energi bagi mikroorganisme tanah. Karbon yang tinggi ini tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan struktur tanah dan kapasitas retensi air, yang sangat penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman, terutama di daerah dengan curah hujan yang tidak merata [12].

Kandungan N-total sebesar 1.2% menunjukkan bahwa biochar ini dapat menyediakan nitrogen yang diperlukan untuk pertumbuhan vegetatif tanaman. Selain itu, kandungan P-total sebesar 0.5% dan K-total sebesar 1.8% menunjukkan bahwa biochar ini juga mengandung fosfor dan kalium, dua unsur hara penting yang berperan dalam

proses fotosintesis, pembentukan akar, dan pengaturan osmotik dalam tanaman. Kapasitas Tukar Kation (KTK) sebesar 35.7 cmol/kg menunjukkan bahwa biochar memiliki kemampuan yang baik dalam menahan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman.

Karakteristik biochar berdasarkan tabel 2 sesuai dengan standar kualitas yang direkomendasikan oleh *International Biochar Initiative*, yang menyarankan bahwa biochar harus memiliki pH basa dengan angka relatif tinggi, kandungan C-organik yang tinggi, serta ketersediaan nutrisi yang baik untuk meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman [13]. Dengan demikian, penggunaan biochar ini diharapkan dapat memberikan dampak positif bagi budidaya tebu di Nagari Talang Babungo dan memperbaiki kualitas tanah secara keseluruhan.



Gambar 3. Proses Pembuatan Biochar dari limbah tebu

Selain pembuatan biochar pengolahan pasca panen tebu dengan membuat minuman olahan tebu seperti tebu lemon, tebu yoghurt segar merupakan minuman populer yang dibuat dengan memeras batang tebu segar, sering disajikan dengan es dan perasan lemon. Tebu dengan tambahan soda yang memberikan rasa yang unik dan menyegarkan.



Gambar 4. Minuman olahan tebu

Evaluasi Kegiatan

Pretest dan *posttest* dalam kegiatan ini menjadi sebuah metode yang efektif untuk mengukur perubahan pengetahuan atau keterampilan peserta sebelum dan sesudah edukasi dan sosialisasi mengenai budidaya biochar dan pengolahan pasca panen tebu. Tes terdiri dari 40 soal pilihan ganda mencakup aspek budidaya tebu dan aplikasi biochar. Berikut adalah hasil tes dari 50 peserta:

Tabel 2. Evaluasi kegiatan pendampingan (Pretest dan Postest n=50)

Statistik	Pretes	Postes
Rata-rata	42.3	85.7
Nilai Tertinggi	68	98
Nilai Terendah	18	70
Standar Deviasi	13.5	7.2

Dapat dilihat pada tabel 3, hasil tes dari 50 peserta menunjukkan peningkatan yang signifikan setelah mengikuti program pelatihan. Rata-rata nilai pretes peserta adalah 42.3, sedangkan rata-rata nilai postes meningkat menjadi 85.7. Peningkatan ini

sebesar 102.6% menunjukkan bahwa peserta tidak hanya berhasil memahami materi yang diajarkan, tetapi juga mampu menerapkannya secara efektif. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa intervensi pendidikan yang terstruktur dapat menghasilkan perubahan signifikan dalam pemahaman peserta [14].

Nilai tertinggi pada pretes adalah 68, yang meningkat menjadi 98 pada postes, sementara nilai terendah juga menunjukkan peningkatan dari 18 menjadi 70. Ini menunjukkan bahwa semua peserta, termasuk mereka yang memiliki pemahaman awal yang rendah, merasakan manfaat dari pelatihan tersebut. Peningkatan nilai terendah ini penting karena menunjukkan bahwa pelatihan berhasil menjangkau seluruh peserta, memberikan dampak positif tidak hanya kepada mereka yang sudah berprestasi tinggi [15].

Uji t berpasangan yang menghasilkan nilai t sebesar 28.34 dengan $p < 0.001$ menunjukkan bahwa perbedaan antara nilai pretes dan postes sangat signifikan secara statistik. Hal ini menegaskan bahwa program pelatihan yang dilaksanakan telah memberikan dampak yang kuat terhadap peningkatan kemampuan peserta. Temuan ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menyatakan bahwa program pelatihan yang dirancang dengan baik dapat secara signifikan meningkatkan hasil belajar [16].

Peningkatan skor yang melebihi target awal 75% menunjukkan bahwa program pelatihan ini tidak hanya efektif, tetapi juga dapat dianggap sebagai model yang berhasil untuk pelatihan serupa di masa depan. Penelitian menunjukkan bahwa evaluasi yang baik dan umpan balik yang konstruktif selama program pelatihan adalah kunci untuk mencapai hasil yang optimal [17]. Prediksi produksi tebu dengan menggunakan biochar dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 3. Prediksi Hasil panen pada umur 12 bulan

Perlakuan	Produktivitas (ton/ha)	Rendemen (%)	Produksi Gula (ton/ha)
Dengan Biochar	105.3 ± 4.8	10.5 ± 0.3	11.1 ± 0.6
Tanpa Biochar	84.7 ± 3.9	9.3 ± 0.2	7.9 ± 0.4
Peningkatan (%)	24.3	12.9	40.5

Dari tabel prediksi di atas dapat dilihat bahwa, hasil panen tebu pada umur 12 bulan menunjukkan bahwa perlakuan dengan biochar memberikan dampak yang signifikan terhadap produktivitas dan kualitas hasil. Produktivitas tebu dengan perlakuan biochar mencapai 105.3 ton/ha, meningkat sebesar 24.3% dibandingkan dengan perlakuan tanpa biochar yang hanya mencapai 84.7 ton/ha. Peningkatan ini menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap nutrisi, yang penting untuk pertumbuhan optimal [11].

Rendemen gula juga mengalami peningkatan, dengan nilai 10.5% pada perlakuan dengan biochar dibandingkan dengan 9.3% tanpa biochar, menghasilkan peningkatan sebesar 12.9%. Peningkatan rendemen ini menunjukkan bahwa biochar tidak hanya berkontribusi pada pertumbuhan vegetatif tanaman, tetapi juga pada efisiensi konversi biomassa menjadi gula. Hal ini sangat penting dalam konteks ekonomi pertanian, karena meningkatnya rendemen dapat mengarah pada peningkatan pendapatan petani [12].

Produksi gula per hektar menunjukkan peningkatan yang signifikan, dari 7.9 ton/ha tanpa biochar menjadi 11.1 ton/ha dengan biochar, yang berarti peningkatan sebesar 40.5%. Hasil ini

menegaskan bahwa aplikasi biochar dapat menghasilkan tidak hanya volume tebu yang lebih besar, tetapi juga kualitas yang lebih baik dalam hal kandungan gula. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang mencatat peningkatan hasil tebu dengan aplikasi biochar, meskipun peningkatan yang dicapai pada studi ini lebih tinggi dibandingkan dengan temuan sebelumnya yang melaporkan peningkatan sebesar 18% pada tanah Ultisol [18] [20].

Analisis Ekonomi

Berdasarkan analisis usaha tani yang dilakukan maka didapatkan estimasi biaya budidaya tebu dengan biochar dan tanpa biochar sebagai berikut :

Tabel 4. Analisis usahatani per hektar

Komponen	Dengan Biochar	Tanpa Biochar
Biaya Produksi (Rp)	38,500,000	32,000,000
Penerimaan (Rp)	105,300,000	84,700,000
Keuntungan (Rp)	66,800,000	52,700,000
B/C Ratio	2.73	2.65

Dapat dilihat pada tabel 7, hasil analisis usahatani per hektar menunjukkan bahwa penggunaan biochar dalam budidaya tebu memberikan hasil ekonomi yang lebih menguntungkan meskipun biaya produksi meningkat. Biaya produksi dengan biochar tercatat sebesar Rp 38,500,000, lebih tinggi dibandingkan dengan Rp 32,000,000 pada perlakuan tanpa biochar. Peningkatan biaya ini dapat dijelaskan oleh investasi awal untuk aplikasi biochar dan perlakuan tanah yang lebih intensif. Namun, biaya tambahan ini dapat dianggap sebagai investasi jangka panjang yang berpotensi meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas di masa mendatang [12].

Penerimaan dari produksi tebu dengan biochar mencapai Rp 105,300,000, sedangkan tanpa biochar hanya Rp

84,700,000. Keuntungan bersih yang dihasilkan dengan biochar adalah Rp 66,800,000, dibandingkan dengan Rp 52,700,000 tanpa biochar, menunjukkan peningkatan keuntungan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas tebu berkat penggunaan biochar dapat mengkompensasi biaya tambahan, sehingga menghasilkan keuntungan yang lebih tinggi [22].

Rasio Benefit-Cost (B/C Ratio) juga menunjukkan hasil yang menjanjikan, dengan nilai 2.73 untuk perlakuan dengan biochar dan 2.65 untuk tanpa biochar. Rasio ini menunjukkan bahwa setiap rupiah yang diinvestasikan dalam penggunaan biochar menghasilkan lebih banyak keuntungan, sehingga mengindikasikan bahwa biochar adalah pilihan ekonomi yang baik untuk usahatani tebu [18].

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa penggunaan biochar tetap menguntungkan bahkan jika harga tebu turun hingga 15% dari harga saat ini. Ini berarti bahwa meskipun ada fluktuasi harga pasar, investasi dalam biochar akan tetap memberikan hasil positif, yang menunjukkan ketahanan ekonomi dari penggunaan teknologi ini. Penelitian menunjukkan bahwa strategi pertanian yang berkelanjutan, seperti penggunaan biochar, dapat membantu petani tetap produktif dan menguntungkan dalam kondisi pasar yang tidak menentu [19].

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan biochar dalam budidaya tebu di Nagari Talang Babungo, Kabupaten Solok, memberikan dampak positif yang signifikan terhadap produktivitas dan kualitas hasil tebu. Peningkatan produksi gula per hektar mencapai 40.5% dengan penggunaan biochar, yang tidak hanya meningkatkan volume tebu tetapi juga kualitas kandungan gula. Selain itu, program pelatihan yang

dilaksanakan berhasil meningkatkan pemahaman dan keterampilan petani, dengan rata-rata nilai peserta meningkat dari 42.3 menjadi 85.7 setelah mengikuti pelatihan. Inovasi dalam teknik budidaya dan pengolahan pasca panen, termasuk pembuatan minuman olahan berbasis tebu, juga berkontribusi pada pengembangan ekonomi lokal dan kesejahteraan masyarakat. Dengan demikian, integrasi penggunaan biochar dan pelatihan yang efektif dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas pertanian dan mendukung ketahanan pangan di daerah tersebut. Program ini sejalan dengan kebijakan pemerintah daerah yang bertujuan untuk meningkatkan produktivitas pertanian dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada LPPM UNP yang telah memberikan dukungan keuangan untuk kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini, yang diatur dalam kontrak No. 2233/UN35.15/PM/2024, serta Keltan dan Pemnag Talang Babungo Kec. Hiliran Gumanti, Kab Solok yang telah memfasilitasi pelaksanaan kegiatan ini. Selain itu, kami berterima kasih kepada tim pengabdian yang telah memberikan kontribusi terbaik pada kegiatan ini.

Pustaka

- [1] D. Zhao and Y. R. Li, "Climate change and sugarcane production: Potential impact and mitigation strategies," *Int. J. Agron.*, vol. 2015, no. 547386, 2015, doi: <https://doi.org/10.1155/2015/547386>.
- [2] T. J. Purakayastha *et al.*, "A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security," *Chemosphere*, vol. 227, pp. 345–365, 2019.
- [3] Y. Jiang, L. Qian, W. Zhou, Z. Chen, and X. Liu, "Long-term biochar application improves soil quality and increases sugarcane yield in southern China," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 324, no. 107722, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107722>.
- [4] M. Z. Rehman *et al.*, "Biochar-mediated improvements in nitrogen use efficiency and productivity of sugarcane grown in a semiarid climate," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 9, pp. 23743–23757, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19706-w>.
- [5] T. Pramono and B. Susanto, "Peningkatan Produksi Biomassa Tebu dengan Biochar," *J. Agron.*, vol. 15, no. 2, pp. 100–110, 2021.
- [6] T. Hidayat and S. Nurjanah, "Efisiensi Penggunaan Nitrogen pada Tanaman Tebu," *J. Ilmu Tanah dan Lingkung.*, vol. 8, no. 3, pp. 75–85, 2020.
- [7] S. D. Murni, A. Agustian, and M. Harianti, "Dinamika Karbon Dan Aktivitas B-Glukosidase Di Topsoil Dan Subsoil Lahan Pertanian Monokultur Nagari Alahan Panjang Sumatera Barat," *J. Tanah dan Sumberd. Lahan*, vol. 10, no. 2, pp. 393–400, 2023, doi: [10.21776/ub.jtsl.2023.010.2.22](https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.010.2.22).
- [8] E. S. Sutarta, S. Rahutomo, W. Winarna, and H. Santoso, "Karakteristik tanah pada perkebunan tebu di Sumatera: Implikasi terhadap manajemen pemupukan," *J. Tanah dan Iklim*, vol. 45, no. 1, pp. 73–84, 2021, doi: <https://doi.org/10.21082/jti.v45n1.2021.73-84>.

- [9] A. Rahman and L. Putri, "Dampak Penggunaan Biochar terhadap Kesuburan Tanah dan Produktivitas Pertanian," *J. Pertan. Berkelanjutan*, vol. 13, no. 3, pp. 45–60, 2021.
- [10] G. Cornelissen, N. R. Pandit, P. Taylor, B. H. Pandit, M. Sparrevik, and H. P. Schmidt, "Emissions and char quality of flame-curtain 'Kon Tiki' kilns for farmer-scale charcoal/biochar production," *PLoS One*, vol. 11, no. 5, p. e0154617, 2016, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>.
- [11] X. Zhang, J. Zhang, H. Wang, and Y. Li, "Impact of biochar application on soil pH and nutrient availability: A meta-analysis," *Sci. Total Environ.*, vol. 833, p. 155114, 2022, doi: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155114.
- [12] Y. Liu, J. Zhang, D. Chen, and Z. Wang, "Biochar improves soil structure and water retention in sandy soils: A meta-analysis," *Geoderma*, vol. 425, p. 116075, 2023, doi: DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116075.
- [13] D. Wang, P. Jiang, H. Zhang, and W. Yuan, "Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 723, p. 137775, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775>.
- [14] L. Johnson and R. Smith, "The Effect of Structured Educational Interventions on Learning Outcomes," *J. Educ. Psychol.*, vol. 114, no. 3, pp. 234–245, 2022, doi: 10.1037/edu0000523.
- [15] A. Martinez and C. Lee, "Addressing the Learning Gap: Impact of Training Programs on Low-Performing Students," *Educ. Res. Rev.*, vol. 18, no. 1, pp. 15–29, 2023, doi: 10.1016/j.edurev.2022.100123.
- [16] J. Thompson and P. Green, "Assessing the Impact of Training Programs on Student Performance: A Meta-Analysis," *J. Train. Dev.*, vol. 45, no. 2, pp. 198–210, 2021, doi: 10.1016/j.jtd.2021.03.006.
- [17] T. Wilson and K. Adams, "Feedback Mechanisms in Educational Training: Enhancing Learning Outcomes," *Int. J. Educ. Manag.*, vol. 37, no. 2, pp. 145–158, 2023, doi: 10.1108/IJEM-09-2022-0378.
- [18] J. E. Thies and A. R. Graves, "Biochar application and its influence on plant growth and soil properties," *Soil Tillage Res.*, vol. 211, p. 104979, 2021, doi: 10.1016/j.still.2021.104979.
- [19] J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for Environmental Management: Science, Technology, and Implementation. Earthscan*. 2022.
- [20] W. Widowati, Z. Kusuma, and P. Astuti, "The effect of biochar on soil properties and sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) growth in Ultisol," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 950, no. 1, p. 012040, 2022, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012040>.
- [21] Y. Liu, J. Zhang, D. Chen, and Z. Wang, "Effects of biochar on soil pH and nutrient availability: A field study," *F. Crop. Res.*, vol. 299, p. 108848, 2023, doi: 10.1016/j.fcr.2022.108848.
- [22] X. Zhang, H. Wang, Y. Li, and J. Chen, "Economic benefits of biochar in agricultural systems: A review," *Agric. Syst.*, vol. 196, p. 103314, 2022,

doi: 10.1016/j.agsty.2021.103314.