

PEMANFAATAN LIMBAH TONGKOL JAGUNG UNTUK PEMBUATAN  
PRODUK PUPUK BIOCHAR HYBRID KAYA NUTRISI MAKRO N, P, K, S.

*Utilization Of Corn Cob Waste For The Production Of Hybrid Biochar Fertilizer  
Products Rich In Macro Nutrients N, P, K, S.*

I Gusti Bagus Sugiantara D. P\*, Baiq Asya Faras Khairunnisa, Najma Auliya  
Maharani Hayyi, M. Bagus Cahyadi, Riry Rahmiati, Oktaviani, Cokorda Istri  
Wulan Darmayanti, Ailsa Nabilah, Muhammad Fauzan, Mazhari Seneng  
Diraksa, Ir. R. Sri Tejo Wulan, M.Sc., Ph.D

Universitas Mataram

Jalan Majapahit No. 62 Mataram, Nusa Tenggara Barat

Informasi artikel	
Korespondensi	: <a href="mailto:dwisugiantara77@gmail.com">dwisugiantara77@gmail.com</a>
Tanggal Publikasi	: 27 Agustus 2025
DOI	: <a href="https://doi.org/10.29303/wicara.v3i4.2430">https://doi.org/10.29303/wicara.v3i4.2430</a>

### ABSTRAK

Lahan pertanian di Desa Akar-Akar didominasi oleh tanah kering dengan produktivitas rendah yang menjadi kendala utama bagi masyarakat petani. Di sisi lain, limbah tongkol jagung yang melimpah pasca panen belum dimanfaatkan secara optimal dan seringkali dianggap sebagai sampah. Kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) ini bertujuan untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan masyarakat petani di Desa Akar-Akar mengenai potensi pemanfaatan tongkol jagung sebagai biochar untuk perbaikan kualitas tanah. Metode kegiatan yang digunakan adalah pendekatan partisipatif melalui sosialisasi dan demonstrasi praktik. Tahap sosialisasi memberikan pemahaman teoritis mengenai manfaat biochar, sementara tahap demonstrasi mempraktikkan secara langsung proses pembuatan biochar menggunakan metode pirolisis sederhana dengan teknologi *single drum kiln*. Hasil dari kegiatan ini menunjukkan adanya peningkatan pemahaman dan kesadaran masyarakat secara signifikan mengenai manfaat biochar dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, serta kemampuan mereka untuk memproduksi biochar secara mandiri dari limbah pertanian lokal. Kesimpulan dari program ini adalah sosialisasi dan demonstrasi teknologi biochar tongkol jagung berhasil memperkenalkan sebuah solusi yang berbiaya rendah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah kesuburan tanah kering, sekaligus mengubah limbah menjadi sumber daya bernilai di Desa Akar-Akar.

**Kata kunci:** biochar, tongkol jagung, tanah kering, perbaikan tanah, pemberdayaan Masyarakat

### ABSTRACT

*Agricultural land in Akar-Akar Village is dominated by dry soil with low productivity, which has become a major challenge for local farmers. On the other hand, corn cobs, which are abundantly available as post-harvest waste, have not been utilized optimally and are often considered as trash. This Community Service Program (KKN) aims to enhance the knowledge and skills of farmers in Akar-Akar Village regarding the potential use of corn cobs as biochar to improve soil quality. The method applied is*

*a participatory approach through socialization and practical demonstration. The socialization stage provides theoretical understanding of the benefits of biochar, while the demonstration stage practices the direct process of producing biochar using a simple pyrolysis method with single drum kiln technology. The results of this activity indicate a significant increase in the community's understanding and awareness of the benefits of biochar in improving the physical, chemical, and biological properties of soil, as well as their ability to independently produce biochar from local agricultural waste. The conclusion of this program is that the socialization and demonstration of corn cob biochar technology successfully introduced a low-cost, environmentally friendly, and sustainable solution to address the issue of dry soil fertility, while simultaneously transforming waste into a valuable resource in Akar-Akar Village.*

*Keywords: biochar, corn cobs, dry soil, soil improvement, community empowerment*

## PENDAHULUAN

Desa Akar-Akar merupakan wilayah yang sebagian besar penduduknya menggantungkan hidup pada sektor pertanian. Namun, tantangan utama yang dihadapi adalah kondisi lahan yang didominasi oleh tanah kering atau lahan marginal. Lahan jenis ini secara inheren memiliki produktivitas alami yang rendah, dicirikan oleh kandungan bahan organik yang minim, struktur tanah yang tidak stabil, serta kapasitas menahan air dan unsur hara yang sangat terbatas (Nurida, 2014; Sari et al., 2020a). Kondisi ini secara langsung berdampak pada hasil panen yang tidak optimal, sehingga membatasi potensi peningkatan kesejahteraan ekonomi masyarakat petani dan menjadikan mereka rentan terhadap perubahan iklim, terutama kekeringan.

Sejalan dengan tantangan tersebut, terdapat potensi sumber daya lokal yang belum termanfaatkan secara maksimal. Jagung merupakan salah satu komoditas pertanian utama di wilayah ini, yang menghasilkan volume limbah biomassa berupa tongkol jagung dalam jumlah besar setiap musim panen. Saat ini, limbah tongkol jagung tersebut seringkali hanya dibakar di tempat atau ditumpuk hingga membusuk, praktik yang tidak hanya melepaskan gas rumah kaca ke atmosfer tetapi juga menyia-nyiakan sumber daya karbon yang berharga. Pengelolaan limbah yang kurang tepat ini mencerminkan adanya kesenjangan antara ketersediaan sumber daya dan pemanfaatannya untuk solusi pertanian berkelanjutan.

Sebagai jawaban atas kedua permasalahan tersebut, teknologi biochar hadir sebagai sebuah solusi inovatif dan berkelanjutan. Biochar didefinisikan sebagai material padat kaya karbon yang stabil, dihasilkan dari proses konversi termokimia biomassa yang disebut pirolisis, yaitu pembakaran dalam kondisi oksigen terbatas atau tanpa oksigen sama sekali (Lehmann et al., 2020). Penting untuk dipahami bahwa biochar bukanlah pupuk yang menyediakan hara secara langsung, melainkan berfungsi sebagai pembenah tanah (*soil amendment*) yang mampu memberikan perbaikan struktural, fisik, kimia, dan biologi tanah dalam jangka panjang (Gani, 2009). Pemanfaatan limbah tongkol jagung untuk produksi biochar menciptakan sebuah model ekonomi sirkular yang ideal di tingkat desa. Dalam sistem ini, limbah dari aktivitas pertanian utama (tongkol jagung) diolah menjadi produk bernilai (biochar) yang kemudian digunakan untuk mengatasi masalah utama dalam aktivitas tersebut (kualitas tanah yang buruk). Siklus tertutup ini tidak hanya mengubah limbah menjadi aset, tetapi juga mengurangi ketergantungan petani pada input eksternal yang mahal dan meningkatkan ketahanan sistem pertanian lokal.

Mekanisme perbaikan kualitas tanah oleh biochar bersifat multifaset, dimulai dari perbaikan sifat fisik. Struktur biochar yang sangat berpori, persisten, dan ringan memberikannya kemampuan untuk bertindak seperti spons di dalam tanah. Ketika diaplikasikan, biochar akan menurunkan kepadatan lindak (*bulk density*) tanah, meningkatkan porositas total, dan yang terpenting bagi lahan kering, secara signifikan meningkatkan kapasitas retensi air tanah (Adekiya et al., 2020). Dengan kemampuannya menahan air lebih lama di zona perakaran, biochar secara efektif memitigasi dampak kekeringan dan memastikan ketersediaan air yang lebih stabil bagi tanaman, yang merupakan faktor pembatas utama di lahan kering.

Selain perbaikan fisik, biochar juga memberikan manfaat signifikan terhadap sifat kimia dan biologi tanah. Secara kimia, biochar umumnya bersifat basa ( $\text{pH} > 7.0$ ) sehingga efektif dalam menetralkan kemasaman tanah yang seringkali menghambat ketersediaan unsur hara (Nurida et al., 2013). Permukaannya yang luas dan bermuatan negatif menghasilkan Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang tinggi, memungkinkannya untuk menarik dan menahan kation hara esensial seperti Kalium ( $K^+$ ), Kalsium ( $Ca^{2+}$ ), dan Magnesium ( $Mg^{2+}$ ), sehingga mencegah kehilangan unsur hara akibat pencucian (Lehmann, 2007). Secara biologi, struktur pori biochar berfungsi sebagai habitat atau "rumah" yang ideal bagi mikroorganisme tanah yang menguntungkan, seperti bakteri dan jamur mikoriza (Glaser et al., 2002). Peningkatan populasi dan aktivitas mikroba ini akan mempercepat siklus hara, dekomposisi bahan organik, dan meningkatkan kesehatan tanah secara keseluruhan. Dampak biochar ini bersifat holistik dan sinergis; perbaikan struktur fisik (pori) menciptakan habitat yang lebih baik bagi mikroba (biologi), yang pada gilirannya meningkatkan ketersediaan hara yang ditahan oleh KTK tinggi biochar (kimia). Dengan demikian, biochar tidak sekadar menjadi aditif, melainkan secara fundamental merekayasa ulang ekosistem tanah menjadi lebih subur dan produktif.

Berdasarkan analisis permasalahan dan potensi solusi tersebut, kegiatan KKN ini dirancang dengan tujuan utama untuk melakukan sosialisasi dan pelatihan kepada masyarakat petani di Desa Akar-Akar. Mengingat adanya kesenjangan pengetahuan, fokus kegiatan bukanlah pada implementasi produksi skala besar, melainkan pada pemberdayaan masyarakat melalui transfer pengetahuan dan keterampilan praktis. Harapannya, melalui kegiatan ini, para petani dapat memahami potensi besar tongkol jagung sebagai bahan baku biochar dan menguasai teknik pembuatannya secara mandiri. Manfaat jangka panjang yang diharapkan adalah adopsi sukarela praktik ini untuk meningkatkan kesuburan tanah, produktivitas tanaman, dan pada akhirnya, kesejahteraan ekonomi keluarga petani di Desa Akar-Akar.

### METODE KEGIATAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini dilaksanakan selama periode Kuliah Kerja Nyata (KKN). Seluruh rangkaian kegiatan, mulai dari sosialisasi hingga demonstrasi praktik, dipusatkan di Desa Akar-Akar, dengan lokasi spesifik di rumah pertemuan Kelompok Tani dusun Lembah Pedek yang memungkinkan partisipasi aktif dari masyarakat sasaran.

Sasaran utama dari kegiatan ini adalah para petani yang tergabung dalam kelompok tani lokal di Desa Akar-Akar. Kelompok ini dipilih sebagai mitra strategis karena mereka merupakan pemangku kepentingan yang paling terdampak oleh isu produktivitas lahan kering dan sekaligus merupakan produsen utama limbah tongkol jagung. Sejumlah petani diundang untuk berpartisipasi aktif dalam seluruh

rangkaian kegiatan untuk memastikan efektivitas transfer pengetahuan dan keterampilan.

Metode pelaksanaan kegiatan dirancang secara sistematis dengan pendekatan partisipatif yang menggabungkan teori dan praktik untuk memastikan pemahaman yang komprehensif dan keterampilan yang aplikatif. Alur kegiatan dibagi menjadi tiga tahap utama sebagai berikut:

### **1. Tahap Sosialisasi dan Penyuluhan**

Tahap awal ini merupakan sesi edukasi yang diselenggarakan dalam format penyuluhan atau pertemuan kelompok. Materi yang disampaikan mencakup beberapa poin krusial, yaitu:

- Diskusi mengenai tantangan yang dihadapi petani terkait kondisi tanah kering dan produktivitas tanaman yang rendah.
- Pengenalan konsep *waste valorization*, yaitu mengubah limbah tongkol jagung yang selama ini dianggap tidak berguna menjadi produk pembenah tanah yang bernilai tinggi.
- Penjelasan teoritis mengenai apa itu biochar, proses pembuatannya melalui pirolisis, dan mekanisme kerjanya dalam memperbaiki kualitas tanah. Manfaat biochar dijelaskan secara rinci mencakup tiga aspek utama: perbaikan sifat fisik (struktur dan retensi air), sifat kimia (pH dan kapasitas tukar kation), dan sifat biologi (habitat mikroba).
- Untuk mempermudah pemahaman, sesi ini didukung oleh penggunaan alat bantu dan contoh fisik produk biochar yang sudah jadi.

### **2. Tahap Demonstrasi Praktik Pembuatan Biochar**

Tahap ini merupakan inti dari kegiatan, di mana peserta diajak untuk melihat dan terlibat langsung dalam proses pembuatan biochar. Metode yang didemonstrasikan adalah teknologi *single drum kiln*, sebuah teknik yang dipilih karena merupakan teknologi tepat guna. Pemilihan metode ini didasarkan pada pertimbangan bahwa teknologinya sederhana, berbiaya rendah, dapat dibuat dari bahan-bahan yang mudah ditemukan di desa (drum bekas), serta mudah dioperasikan dan direplikasi oleh petani secara mandiri tanpa memerlukan keahlian teknis khusus atau bantuan eksternal berkelanjutan.

#### **Alat dan Bahan:**

- Satu buah drum logam bekas berkapasitas 100 liter sebagai reaktor pirolisis.
- Tongkol jagung yang telah dikeringkan sebagai bahan baku utama.
- Bahan pemicu api seperti daun kering, sabut kelapa, dan serutan kayu.
- Sekop atau pengaduk logam panjang untuk meratakan pembakaran.
- Air secukupnya untuk proses pemadaman (pendinginan).
- Penutup Drum dan/atau pasir sebagai alternatif penutup untuk menciptakan kondisi anaerobik.

#### **Prosedur Pembuatan:**

1. **Persiapan:** Lokasi demonstrasi dipilih di area terbuka yang aman. Drum disiapkan dan dipastikan bersih. Tongkol jagung yang akan digunakan dipastikan dalam kondisi kering untuk memaksimalkan efisiensi proses pirolisis.
2. **Pembakaran Awal:** Sejumlah kecil bahan pemicu api dan tongkol jagung dimasukkan ke dasar drum, kemudian dibakar hingga api menyala dengan stabil.
3. **Pengisian Bertahap:** Setelah api awal terbentuk, sisa tongkol jagung dimasukkan secara bertahap ke dalam drum. Proses ini bertujuan untuk

menciptakan pembakaran dari atas ke bawah (*top-lit up-draft*), di mana lapisan atas yang terbakar akan memirolisis biomassa di bawahnya dalam kondisi oksigen yang sangat terbatas.

4. **Observasi Proses Pirolisis:** Peserta diajak mengamati perubahan yang terjadi. Asap tebal dan berwarna putih yang keluar di awal proses menandakan penguapan air dan pelepasan senyawa volatil. Seiring berjalannya waktu, asap akan berangsur-angsur menipis dan menjadi lebih jernih, sebuah indikator bahwa proses pirolisis mendekati sempurna dan yang tersisa adalah karbon yang stabil.
5. **Pemadaman:** Ini adalah tahap kritis untuk mencegah biochar berubah menjadi abu. Ketika seluruh tongkol jagung telah menghitam menjadi arang dan nyala api mulai mengecil, proses pembakaran harus segera dihentikan. Pemadaman dilakukan dengan menyiramkan air secukupnya ke dalam drum untuk mematikan bara api.
6. **Pendinginan dan Penanganan Produk:** Biochar yang telah jadi dibiarkan di dalam drum hingga benar-benar dingin untuk menghindari risiko terbakar kembali. Setelah dingin, biochar dapat dikeluarkan dan dihancurkan menjadi ukuran partikel yang lebih kecil untuk mempermudah aplikasinya di lahan pertanian.

### **3. Tahap Pembuatan Produk Pupuk Hybrid dari Biochar Limbah Tongkol Jagung**

Tahap ketiga ini merupakan inovasi utama dari kegiatan pengabdian, di mana biochar yang telah diproduksi tidak hanya digunakan sebagai pembenah tanah murni, tetapi ditingkatkan nilainya menjadi pupuk organik-anorganik majemuk yang disebut "Biochar Hybrid". Proses ini dirancang untuk dapat direplikasi oleh petani dengan bahan dan alat yang tersedia secara lokal.

#### **a) Preparasi dan Karakterisasi Fisik Bahan Baku Biochar**

Setelah proses pendinginan, biochar mentah dari drum kiln menjalani dua perlakuan fisik esensial. Pertama, biochar dihancurkan atau ditumbuk secara manual untuk memperkecil ukurannya. Kedua, biochar yang telah hancur kemudian diayak untuk mendapatkan distribusi ukuran partikel yang seragam. Tujuan ilmiah dari tahap ini adalah untuk secara drastis meningkatkan luas permukaan spesifik (*specific surface area*) biochar. Peningkatan luas permukaan ini krusial karena menyediakan lebih banyak situs aktif dan pori-pori yang dapat diakses untuk proses adsorpsi nutrisi pada tahap selanjutnya, sehingga memaksimalkan kapasitas biochar dalam mengikat dan menahan unsur hara.

#### **b) Formulasi Larutan Nutrien Berbasis Pupuk Phonska**

Tahap ini melibatkan persiapan larutan pengkaya nutrisi. Pupuk komersial Phonska, yang mengandung unsur hara makro esensial Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan Sulfur (S), dipilih karena mudah diakses oleh petani. Sejumlah pupuk Phonska ditimbang sesuai takaran dan dilarutkan sepenuhnya ke dalam volume air yang telah ditentukan untuk menciptakan larutan nutrisi yang homogen dan terkonsentrasi. Proses pelarutan ini merupakan metode standar dan efektif untuk mempersiapkan fase cair yang akan diimpregnasikan ke dalam matriks padat berpori seperti biochar.

#### **c) Proses Impregnasi Nutrien ke dalam Matriks Biochar**

Biochar yang telah diayak dan memiliki luas permukaan optimal dimasukkan ke dalam kantong plastik tebal yang kedap udara. Larutan nutrisi Phonska yang telah disiapkan kemudian ditambahkan secara bertahap ke dalam kantong berisi biochar. Selama penambahan, kantong diguncang dan campuran diaduk secara

merata untuk memastikan setiap partikel biochar terlapisi dan seluruh larutan terserap sempurna ke dalam struktur pori biochar. Proses ini, yang dikenal sebagai *charging* atau pengisian, memanfaatkan dua mekanisme utama: (1) penyerapan fisik, di mana larutan nutrisi mengisi ruang-ruang pori biochar seperti spons, dan (2) adsorpsi fisikokimia, di mana ion-ion nutrisi terlarut (misalnya,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ) mulai terikat pada permukaan biochar melalui mekanisme seperti pertukaran kation dan interaksi elektrostatis dengan gugus fungsi pada permukaan karbon.

#### **d) Tahap Pematangan**

Setelah proses impregnasi selesai dan biochar menjadi lembab serta jenuh dengan nutrisi, kantong plastik disegel rapat untuk menciptakan kondisi anaerobik (tanpa oksigen). Campuran ini kemudian diperam atau didiamkan selama periode tertentu (misalnya 7-14 hari) di tempat yang teduh dan sejuk. Tahap pematangan ini sangat penting untuk menstabilkan produk akhir. Kondisi anaerobik mencegah kehilangan nitrogen melalui proses volatilisasi amonia dan denitrifikasi oleh mikroba aerobik. Selama periode ini, ikatan antara ion nutrisi dan matriks biochar menjadi lebih kuat, memastikan bahwa produk akhir memiliki karakteristik sebagai pupuk lepas lambat (*slow-release fertilizer*) yang stabil. Produk akhir dari keseluruhan proses ini adalah BIOCHAR HYBRID, sebuah pembenah tanah sekaligus pupuk majemuk yang kaya akan unsur hara makro N, P, K, dan S.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### **1. Peningkatan Pemahaman dan Kesadaran Petani Melalui Sosialisasi Edukatif**

Tahap awal kegiatan, yang berfokus pada sosialisasi dan penyuluhan, berhasil mencapai tujuan utamanya dalam mengubah persepsi dan meningkatkan basis pengetahuan para petani di Desa Akar-Akar. Sebelum intervensi, teridentifikasi secara jelas bahwa pandangan umum masyarakat terhadap tongkol jagung adalah sebagai limbah pertanian yang tidak memiliki nilai guna signifikan, sebagaimana yang disajikan pada Gambar 1. Praktik yang lazim dilakukan adalah pembuangan dengan cara pembakaran di tempat atau penumpukan hingga terdekomposisi secara alami, yang keduanya merupakan praktik yang kurang optimal dari segi ekonomi maupun lingkungan.

Gambar 1. Sosialisasi secara umum pembuatan Biochar



Selama sesi sosialisasi, terjadi perubahan paradigma yang nyata dan terukur secara kualitatif. Para petani menunjukkan tingkat antusiasme dan partisipasi yang tinggi. Mereka secara aktif terlibat dalam diskusi, mengaitkan materi yang disampaikan dengan tantangan nyata yang mereka hadapi sehari-hari, terutama terkait kondisi lahan kering yang sulit menahan air dan produktivitas tanaman yang rendah. Interaksi ini tidak bersifat pasif; para petani mengajukan pertanyaan-pertanyaan kritis yang mengindikasikan proses internalisasi konsep yang sedang berlangsung. Pertanyaan-pertanyaan tersebut berkisar dari definisi fundamental biochar, mekanisme kerjanya dalam "mengikat" air dan pupuk di dalam tanah,

hingga potensi dampaknya dalam jangka panjang. Hasil kualitatif yang paling signifikan dari tahap ini adalah pergeseran cara pandang kolektif: dari melihat tongkol jagung sebagai "sampah" menjadi sebuah "sumber daya" lokal yang berharga dan belum dimanfaatkan.

Keberhasilan tahap sosialisasi ini dapat dianalisis dari dua perspektif utama: relevansi kontekstual solusi yang ditawarkan dan kekuatan pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai (*valorization*) sebagai pendorong adopsi. Permasalahan utama yang dihadapi petani Desa Akar-Akar, sebagaimana diidentifikasi dalam pendahuluan, adalah produktivitas lahan kering yang rendah. Secara ilmiah, lahan kering atau marginal dicirikan oleh beberapa kendala biofisik yang saling terkait, yaitu kandungan bahan organik tanah yang rendah, struktur tanah yang tidak stabil (*agregat lemah*), porositas yang buruk, dan akibatnya, kapasitas menahan air (*water holding capacity* - WHC) serta kapasitas tukar kation (KTK) yang sangat terbatas (Nurida, 2014). Kondisi ini menyebabkan tanah tidak mampu menyimpan air hujan secara efektif dan rentan kehilangan unsur hara melalui proses pencucian (*leaching*), yang secara langsung divalidasi oleh keluhan para petani.

Dalam konteks inilah, pengenalan konsep biochar menjadi sangat relevan dan kuat. Penjelasan ilmiah mengenai mekanisme kerja biochar memberikan jawaban langsung terhadap masalah yang paling dirasakan oleh para petani. Struktur biochar yang sangat berpori, terbentuk selama proses pirolisis, berfungsi layaknya spons mikroskopis di dalam matriks tanah. Porositas yang tinggi ini secara dramatis meningkatkan luas permukaan spesifik tanah, yang berdampak langsung pada dua parameter kunci. Pertama, terjadi peningkatan signifikan pada kapasitas menahan air tanah. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa aplikasi biochar dapat meningkatkan WHC tanah sebesar 10% hingga 30% (Adekiya et al., 2020), bahkan lebih tinggi pada tanah bertekstur kasar seperti tanah berpasir (Atkinson et al., 2010). Bagi petani di lahan kering yang sangat bergantung pada curah hujan, kemampuan tanah untuk menyimpan air lebih lama di zona perakaran merupakan faktor krusial untuk mitigasi stres kekeringan pada tanaman dan menjamin kelangsungan hidup tanaman selama periode kering.

Kedua, aplikasi biochar terbukti mampu memperbaiki sifat fisik tanah lainnya. Biochar yang ringan dan stabil dapat menurunkan kepadatan lindak (*bulk density*) tanah, membuatnya menjadi lebih gembur (Adekiya et al., 2020). Tanah yang lebih gembur memfasilitasi infiltrasi air yang lebih baik, mengurangi aliran permukaan (*run off*), serta memudahkan penetrasi dan perkembangan sistem perakaran tanaman. Momen ketika para petani memahami bahwa struktur fisik biochar secara mekanis dapat mengatasi masalah "tanah yang tidak bisa memegang air" merupakan titik balik kognitif. Pengetahuan ilmiah ini tidak lagi bersifat abstrak, melainkan menjadi sebuah kerangka logis yang memvalidasi pengalaman empiris mereka dan, yang terpenting, menawarkan solusi yang nyata dan dapat dipahami. Keberhasilan sosialisasi tidak hanya terletak pada transfer informasi, tetapi pada kemampuannya membangun jembatan antara masalah yang dirasakan (*felt need*) dengan solusi yang berbasis ilmu pengetahuan.

Aspek kedua yang tidak kalah penting adalah konsep valorisasi limbah. Transformasi tongkol jagung dari limbah menjadi aset menciptakan sebuah model ekonomi sirkular yang sangat menarik di tingkat desa. Proses ini mengubah item yang bernilai nol atau bahkan negatif (karena memerlukan tenaga untuk pembuangan) menjadi input produksi yang berharga. Hal ini secara inheren menanamkan insentif ekonomi yang kuat untuk adopsi teknologi. Petani tidak



hanya didorong oleh manfaat agronomi jangka panjang, tetapi juga oleh keuntungan efisiensi sumber daya jangka pendek. Sistem ini menciptakan siklus tertutup yang berkelanjutan: limbah dari tanaman jagung diolah menjadi pembenah tanah untuk meningkatkan produktivitas tanaman jagung di musim berikutnya (Mateus dkk., 2017). Model ini secara fundamental meningkatkan ketahanan dan kemandirian sistem pertanian lokal dengan mengurangi ketergantungan pada input eksternal yang seringkali mahal, seperti pupuk anorganik dan pembenah tanah komersial.

## **2. Akuisisi Keterampilan Praktis Melalui Demonstrasi Teknologi Tepat Guna**

Tahap demonstrasi praktik merupakan inti dari proses transfer teknologi dalam kegiatan pengabdian ini. Penggunaan metode *single drum kiln* terbukti sangat efektif dan diterima dengan baik oleh para peserta. Proses ini berhasil mengubah konsep teoritis yang telah dibahas menjadi sebuah pengalaman belajar yang konkret dan partisipatif. Para petani tidak hanya bertindak sebagai pengamat, tetapi juga terlibat aktif dalam setiap langkah krusial pembuatan biochar, sebagaimana yang disajikan pada Gambar 2. Mereka menunjukkan kemampuan yang cepat dalam memahami dan mempraktikkan prosedur, mulai dari persiapan bahan baku, teknik penyulutan api dari atas (*top-lit up-draft*) untuk menciptakan kondisi minim oksigen, pengamatan visual terhadap perubahan warna dan volume asap sebagai indikator kemajuan proses pirolisis, hingga tahap pendinginan (*quenching*) yang sangat penting untuk mencegah biochar terbakar menjadi abu.

Gambar 2. Praktik Pembuatan Biochar



Puncak dari sesi demonstrasi adalah dihasilkannya satu batch biochar dari tongkol jagung, sebagaimana di ditampilkan pada Gambar 3. Produk akhir ini menjadi bukti fisik yang sangat kuat atas keberhasilan proses dan kelayakan teknologi yang diperkenalkan. Biochar yang dihasilkan memiliki karakteristik yang sesuai dengan literatur, yaitu berwarna hitam pekat, ringan, rapuh, dan memiliki struktur yang terlihat berpori, seperti. Kesempatan bagi para petani untuk melihat, menyentuh, dan merasakan langsung produk hasil olahan mereka sendiri secara signifikan memperkuat keyakinan dan pemahaman mereka terhadap teknologi biochar.

Gambar 3. Pengangkatan Hasil Pembakaran





Pemilihan metode *single drum kiln* merupakan keputusan strategis yang menjadi kunci keberhasilan dan potensi keberlanjutan program ini. Metode ini adalah perwujudan dari prinsip "teknologi tepat guna" (*appropriate technology*). Keunggulannya terletak pada kesederhanaan, biaya rendah, dan kemudahan replikasi. Reaktor pirolisis dapat dibuat dari drum logam bekas yang mudah ditemukan di lingkungan pedesaan, dan prosesnya tidak memerlukan keahlian teknis yang rumit atau peralatan canggih. Tingkat aksesibilitas yang tinggi ini menghilangkan hambatan adopsi yang seringkali muncul pada teknologi pertanian modern, memungkinkan para petani untuk mereplikasi proses ini secara mandiri dan kolektif tanpa ketergantungan berkelanjutan pada pihak eksternal.

Pembahasan mengenai manfaat biochar yang dihasilkan dapat diperluas melampaui perbaikan sifat fisik tanah. Proses pirolisis tidak hanya menciptakan struktur berpori, tetapi juga mengubah komposisi kimia dan menciptakan properti yang sangat bermanfaat bagi ekosistem tanah. Pertama, dari aspek kimia, biochar umumnya memiliki sifat basa ( $\text{pH} > 7.0$ ), sehingga aplikasinya sangat efektif untuk menetralkan kemasaman tanah, sebuah masalah yang lazim dijumpai pada lahan terdegradasi (Lehmann dkk., 2009). Peningkatan pH tanah ke level netral akan meningkatkan ketersediaan sebagian besar unsur hara esensial bagi tanaman. Lebih lanjut, permukaan biochar yang luas dan bermuatan negatif menghasilkan Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang tinggi (Sukartono dan Utomo, 2012). KTK yang tinggi memungkinkan partikel biochar berfungsi seperti magnet bagi kation hara positif seperti Kalium ( $\text{K}^+$ ), Kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), dan Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Dengan menahan unsur-unsur hara ini pada permukaannya, biochar secara efektif mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian oleh air hujan, sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan dan menjaga kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Kedua, dari aspek biologi, struktur pori biochar yang kompleks dan stabil menyediakan habitat atau "rumah" yang ideal bagi komunitas mikroorganisme tanah yang menguntungkan, seperti bakteri penambat nitrogen, jamur pelarut fosfat, dan mikoriza (Gani, 2009; Steiner, 2007). Pori-pori ini berfungsi sebagai *refugia*, melindungi mikroba dari tekanan lingkungan seperti kekeringan dan dari predator seperti protozoa. Dengan menyediakan lingkungan yang stabil, biochar mendorong peningkatan populasi dan aktivitas mikroba tanah (Pokharel et al., 2020). Komunitas mikroba yang sehat dan aktif ini merupakan motor penggerak siklus hara, dekomposisi bahan organik, dan pembentukan agregat tanah yang stabil, yang semuanya berkontribusi pada peningkatan kesehatan dan kesuburan tanah secara holistik.

Sebagai tambahan, kegiatan ini secara tidak langsung memperkenalkan para petani pada konsep sequestrasi karbon. Karbon dalam biomassa tongkol jagung bersifat labil dan akan kembali ke atmosfer sebagai  $\text{CO}_2$  melalui dekomposisi. Proses pirolisis mengubah karbon ini menjadi bentuk aromatik yang sangat stabil dan tahan terhadap dekomposisi (*recalcitrant*), yang dapat bertahan di dalam tanah selama ratusan hingga ribuan tahun (Herlambang et al., 2020). Dengan demikian, setiap kali petani mengubah limbah jagung menjadi biochar dan mengaplikasikannya ke lahan, mereka secara aktif menarik karbon dari atmosfer dan menyimpannya secara permanen di dalam tanah, memberikan kontribusi positif terhadap mitigasi perubahan iklim. Untuk merangkum manfaat multidimensi ini, disajikan tabel berikut.

Tabel 1. Mekanisme Multidimensi Perbaikan Kualitas Tanah Kering oleh Biochar Tongkol Jagung

Aspek Perbaikan	Mekanisme Ilmiah	Dampak Langsung pada Lahan Kering Desa Akar-Akar
Fisik	Peningkatan porositas total dan luas permukaan spesifik; struktur pori yang persisten.	Meningkatkan kapasitas menahan air (WHC), mengurangi stres kekeringan pada tanaman. Menurunkan kepadatan lindak tanah, memudahkan penetrasi akar.
Kimia	Sifat basa (pH tinggi); permukaan bermuatan negatif menghasilkan Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang tinggi.	Menetralkan kemasaman tanah, meningkatkan ketersediaan unsur hara. Mencegah kehilangan hara penting ( $K^+$ , $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ ) akibat pencucian, meningkatkan efisiensi pemupukan.
Biologi	Struktur pori yang stabil menyediakan habitat ( <i>refugia</i> ) bagi mikroorganisme tanah yang menguntungkan.	Melindungi mikroba dari predator dan kekeringan, meningkatkan populasi dan aktivitas mikroba. Mempercepat siklus hara dan dekomposisi bahan organik, meningkatkan kesehatan tanah secara keseluruhan.
Karbon	Konversi biomassa labil menjadi karbon aromatik yang sangat stabil ( <i>recalcitrant</i> ) melalui proses pirolisis.	Sekuestrasi karbon jangka panjang di dalam tanah, berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim. Meningkatkan kandungan karbon organik tanah secara permanen.

### 3. Transformasi Limbah Tongkol Jagung menjadi Biochar Hybrid Bernilai Tambah

Hasil utama dari kegiatan pengabdian ini adalah keberhasilan transfer teknologi pembuatan "Biochar Hybrid" kepada kelompok tani Lembah Pedek. Para petani tidak hanya berhasil mempraktikkan cara mengubah limbah tongkol jagung menjadi biochar dasar, tetapi juga menguasai proses lanjutan untuk memperkayanya dengan nutrisi makro esensial (N, P, K, dan S). Keberhasilan ini menandai sebuah lompatan signifikan dari sekadar manajemen limbah menjadi rekayasa produk pertanian bernilai tambah.

Gambar 4. Sosialisasi Langsung dari Dosen



Gambar 5. Sosialisasi Langsung dari Dosen



Awalnya, fokus kegiatan adalah memperkenalkan biochar murni sebagai pembenah tanah (*soil conditioner*). Fungsi utama biochar murni adalah memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah dalam jangka panjang, seperti meningkatkan kapasitas menahan air dan menyediakan habitat bagi mikroba (Gani, 2009; Arif et al., 2021). Namun, dengan diperkenalkannya tahap ketiga, yaitu pembuatan Biochar Hybrid, fungsi produk secara fundamental berubah, sebagaimana yang ditampilkan Gambar 6 dan 7. Produk yang dihasilkan bukan lagi sekadar pembenah tanah pasif, melainkan telah menjadi pupuk lepas lambat (*Slow-Release Fertilizer - SRF*) aktif (Wang et al., 2022). Transformasi ini menunjukkan evolusi tujuan kegiatan, dari yang semula hanya menyediakan "rumah" yang lebih baik bagi nutrisi dan mikroba di dalam tanah, menjadi menyediakan "rumah" yang sudah dilengkapi dengan "persediaan makanan" (nutrisi) yang siap pakai. Inovasi ini memberikan solusi yang lebih komprehensif dan berdampak lebih cepat terhadap masalah kesuburan tanah yang dihadapi petani (Evizal dan Prasmatiwi, 2021).

Gambar 6. Proses penggabungan Biochar dengan

Gambar 7. Proses pembuatan pupuk Hybrid



Keberhasilan formulasi Biochar Hybrid tidak hanya bersandar pada pencampuran fisik, melainkan pada serangkaian proses fisikokimia kompleks yang memanfaatkan karakteristik unik dari matriks biochar. Proses penghancuran dan pengayakan pada tahap preparasi secara signifikan meningkatkan luas permukaan spesifik dan mengekspos jejaring mikropori internal pada biochar tongkol jagung (Wyn et al., 2020). Struktur inilah yang menjadi faktor keberhasilan kapasitas penyerapan yang tinggi.

Saat larutan nutrisi diimpregnasikan, terjadi beberapa mekanisme retensi secara simultan. Pertama, penyerapan fisik di mana larutan mengisi ruang pori. Kedua, dan yang lebih penting, adalah mekanisme adsorpsi kimiawi. Permukaan biochar secara alami memiliki muatan negatif dan kaya akan gugus fungsi oksigen, yang menghasilkan Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang tinggi (Nurida, 2014). Hal ini memungkinkan biochar untuk menarik dan mengikat kation-kation nutrisi bermuatan positif seperti amonium ( $NH_4^+$ ) dan kalium ( $K^+$ ) melalui interaksi elektrostatis dan pertukaran ion (Ghodake et al. 2021; Mautuka et al., 2022). Sementara itu, anion seperti fosfat ( $PO_4^{3-}$ ) dapat diikat melalui mekanisme yang lebih kompleks, termasuk pembentukan jembatan kation dengan ion  $Ca^{2+}$  atau  $Mg^{2+}$  yang ada pada permukaan biochar, atau melalui presipitasi sebagai garam mineral di dalam pori-pori (Ahmad et al., 2018).

Tahap pematangan anaerobik selanjutnya berfungsi untuk menstabilkan ikatan-ikatan ini dan meminimalkan kerugian nutrisi, terutama nitrogen (Pokharel et al., 2020). Dengan demikian, produk akhir bukanlah sekadar campuran basah antara arang dan pupuk, melainkan sebuah material komposit organo-mineral yang terintegrasi. Dalam komposit ini, matriks biochar organik berfungsi sebagai pembawa (*carrier*) sekaligus pengendali pelepasan nutrisi anorganik.

Biochar Hybrid yang dihasilkan menawarkan serangkaian keuntungan agronomis yang sinergis, menjadikannya solusi ideal untuk tantangan spesifik di lahan kering Desa Akar-Akar. Pertama, produk ini berfungsi sebagai pupuk lepas lambat (SRF) yang efisien. Nutrisi yang teradsorpsi pada matriks biochar tidak mudah tercuci oleh air hujan atau irigasi, suatu masalah yang umum terjadi pada tanah berpasir dengan kandungan bahan organik rendah (Karim et al., 2021). Pelepasan nutrisi terjadi secara bertahap, seiring dengan proses desorpsi dan aktivitas mikroba di zona perakaran, sehingga lebih sinkron dengan kebutuhan serapan tanaman sepanjang siklus pertumbuhannya. Mekanisme ini secara drastis meningkatkan Efisiensi Penggunaan Hara (*Nutrient Use Efficiency* - NUE), yang berarti lebih sedikit pupuk yang terbuang dan dampak lingkungan yang lebih rendah (Cao et al., 2021; Vejan et al., 2021). Biochar Hybrid secara efektif berfungsi sebagai "bank" nutrisi di dalam tanah (Wang et al., 2022).

Kedua, Biochar Hybrid tetap mempertahankan fungsi utama biochar murni, yaitu sebagai pembenah tanah. Strukturnya yang sangat berpori secara signifikan meningkatkan kapasitas menahan air (*Water Holding Capacity* - WHC) tanah (Amoakwah et al., 2021). Di lahan kering yang rentan kekeringan, kemampuan ini sangat krusial. Terjadi efek sinergis di mana biochar tidak hanya menahan air lebih lama di zona akar, tetapi air yang ditahan tersebut juga kaya akan nutrisi yang dilepaskan secara perlahan, menciptakan zona mikro yang subur dan lembab di sekitar akar tanaman bahkan selama periode kering (Abel et al., 2022).

Ketiga, aplikasi Biochar Hybrid juga memperbaiki sifat kimia dan biologi tanah. Sifatnya yang cenderung basa membantu menetralkan kemasaman tanah, sementara KTK yang tinggi meningkatkan kemampuan tanah secara keseluruhan untuk menahan nutrisi (Lehmann dkk 2009). Struktur porinya yang stabil menjadi habitat permanen bagi mikroorganisme tanah yang menguntungkan, seperti bakteri penambat nitrogen dan jamur mikoriza (Glaser et al., 2002). Kehadiran nutrisi yang dilepaskan secara perlahan semakin mendukung perkembangan populasi mikroba ini, yang pada gilirannya akan meningkatkan siklus hara dan kesehatan tanah secara keseluruhan.

Pengenalan teknologi Biochar Hybrid disambut dengan antusiasme tinggi oleh para petani peserta. Mereka melihat teknologi ini sebagai solusi praktis dan terjangkau untuk dua masalah utama yang mereka hadapi: pengelolaan limbah tongkol jagung yang melimpah dan tingginya biaya pupuk kimia untuk menyuburkan lahan kering mereka. Kemampuan untuk memproduksi sendiri pupuk berkualitas tinggi dari sumber daya lokal memberikan rasa kemandirian dan kontrol yang lebih besar atas usaha tani mereka.

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Berdasarkan rangkaian kegiatan pengabdian yang telah dilaksanakan, dapat ditarik beberapa kesimpulan. Pertama, program KKN melalui metode sosialisasi dan demonstrasi praktik telah berhasil meningkatkan pengetahuan, kesadaran, dan keterampilan awal masyarakat petani di Desa Akar-Akar mengenai potensi dan cara pembuatan biochar dari limbah tongkol jagung. Kedua, biochar terbukti dapat

dipahami oleh masyarakat sebagai sebuah teknologi tepat guna yang berbiaya rendah, ramah lingkungan, dan solutif untuk perbaikan kualitas tanah kering dengan cara meningkatkan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Ketiga, kegiatan ini telah berhasil meletakkan fondasi pengetahuan yang esensial bagi masyarakat untuk dapat mengadopsi inovasi ini secara mandiri, sehingga membuka peluang untuk transformasi limbah pertanian dari masalah menjadi sumber daya berharga yang mendukung pertanian berkelanjutan dan meningkatkan ketahanan pangan di tingkat lokal.

Untuk menjamin keberlanjutan dan memperluas dampak positif dari kegiatan ini, disarankan agar tim KKN pada periode berikutnya dapat melanjutkan dan mengembangkan program ini. Fokus kegiatan selanjutnya dapat diarahkan pada pendampingan teknis saat aplikasi biochar di lahan, melakukan pengukuran dampak secara kuantitatif (misalnya, analisis sampel tanah sebelum dan sesudah aplikasi), serta membantu pengembangan aspek ekonomi, seperti standardisasi produk, pengemasan, dan potensi pemasaran biochar sebagai pembenah tanah organik komersial.

#### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Mataram melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) yang telah memberikan dukungan dan fasilitas sehingga kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Kepala Desa Akar-Akar beserta jajarannya atas izin dan dukungan yang diberikan selama kegiatan berlangsung. Apresiasi tertinggi kami berikan kepada seluruh masyarakat Desa Akar – Akar atas partisipasi aktif, antusiasme, dan kerja sama yang luar biasa, yang menjadi kunci keberhasilan program ini. Terakhir, terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu kelancaran kegiatan ini yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., & Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202–203, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003>
- Adekiya, A. O., Agbede, T. M., Olayanju, A., Ejue, W. S., Adekanye, T. A., Adenusi, T. T., & Ayeni, J. F. (2020). Effect of Biochar on Soil Properties, Soil Loss, and Cocoyam Yield on a Tropical Sandy Loam Alfisol. *Scientific World Journal*, 2020, 9391630. <https://doi.org/10.1155/2020/9391630>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Allahverdi, T., Mohanty, A. K., Roy, P., & Misra, M. (2021). A Review on Current Status of Biochar Uses in Agriculture. *Molecules*, 26(18), 5584. <https://doi.org/10.3390/molecules26185584>
- Amirahmadi, E., Hojjati, S. M., Kammann, C., Ghorbani, M., & Biparva, P. (2020). The Potential Effectiveness of Biochar Application to Reduce Soil Cd Bioavailability and Encourage Oak Seedling Growth. *Applied Sciences*, 10(10), 3410. <https://doi.org/10.3390/app10103410>
- Amoakwah, E., Arthur, E., Frimpong, K. A., & Islam, R. (2021). Biochar Amendment Influences Tropical Soil Carbon and Nitrogen Lability. *Journal of Soil Science*

- and Plant Nutrition*, 21(4), 2849–2863. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00628-4>
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hipps, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
- Cao, D., Lan, Y., Chen, W., Yang, X., Wang, D., & Ge, S. (2021). Successive Applications of Fertilizers Blended with Biochar in the Soil Improve the Availability of Phosphorus and Productivity of Maize (*Zea mays* L.). *European Journal of Agronomy*, 130, 126344. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126344>
- Evizal, R., & Prasmatiwi, F. E. (2023). Biochar: Pemanfaatan dan Aplikasi Praktis. *Jurnal Agrotropika*, 22(1), 1–12.
- Gani, A. (2009). Potensi biochar sebagai pembenah tanah. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 3(1), 45–53.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in the Tropics with Charcoal—A Review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Herlambang, S., Santoso, P. B., Sutiono, H. T., & Nugraheni, S. R. (2020). The application of biochar and organic matter for proper cultivation on paddy soil. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 7(3), 2133–2137. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2020.073.2133>
- Lehmann, J. (2007). Bio-Energy in the Black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381–387. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)52.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)52.0.CO;2)
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2009). *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan.
- Mateus, R., Mau, L., & Kantur, D. (2017). Utilization of Corn Stover and Pruned *Gliricidia Sepium* Biochars as Soil Conditioner to Improve Carbon Sequestration, Soil Nutrients and Maize Production at Dry Land Farming in Timor, Indonesia. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 10(4), 1–8.
- Mautuka, R., Mlalazi, B., & Chiduza, C. (2022). Biochar as a Soil Amendment for Improved Crop Production: A Review. *Agronomy*, 12(5), 1036. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051036>
- Murtaza, G., Ahmed, Z., Eldin, S. M., Ali, B., Bawazeer, S., Usman, M., Iqbal, R., Neupane, D., Ullah, A., Khan, A., Hassan, M. U., Ali, I., & Tariq, A. (2023). Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1059449. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1059449>
- Nurida, N. L. (2014). Potensi Pemanfaatan Biochar untuk Rehabilitasi Lahan Kering di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 8(2), 73–82.
- Nurida, N. L., Dariah, A., & Rachman, A. (2013). Peningkatan Kualitas Tanah dengan Pembenah Tanah Biochar Limbah Pertanian. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 37(2), 97–106.
- Pokharel, P., Ma, Z., & Chang, S. X. (2020). Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis. *Biochar*, 2(1), 65–79. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00039-1>
- Rodriguez-Vila, A., Atuah, L., Abubakari, A. H., Atorqui, D. W., Abdul-Karim, A., Coole, S., Hammond, J., Robinson, S., & Sizmur, T. (2022). Effect of Biochar on Micronutrient Availability and Uptake Into Leafy Greens in Two Urban

- Tropical Soils With Contrasting Soil pH. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 821397. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.821397>
- Satriawan, B. D., & Handayanto, E. (2015). Effects of biochar and crop residues application on chemical properties of a degraded soil of South Malang, and P uptake by maize. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 2(2), 271–280. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2014.022.271>
- Tenenbaum, D. J. (2009). Biochar: Carbon Mitigation from the Ground Up. *Environmental Health Perspectives*, 117(2), A70–A73. <https://doi.org/10.1289/ehp.117-a70>
- Vanek, S. J., & Lehmann, J. (2022). Biochar in the circular bionutrient economy. *PNAS Nexus*, 1(1), pgac006. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac006>
- Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., & Ahmad, N. (2021). Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *Journal of Controlled Release*, 339, 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.10.003>
- Wang, J., Pan, X., Liu, Y., Zhang, X., & Xiong, Z. (2012). Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. *Plant and Soil*, 360(1-2), 287–298. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1250-3>
- Zou, Z., Fan, L., Li, X., Dong, C., Zhang, L., Zhang, L., Fu, J., Han, W., & Yan, P. (2021). Response of Plant Root Growth to Biochar Amendment: A Meta-Analysis. *Agronomy*, 11(12), 2442. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122442>