

Limbah Jadi Penawar: Mengolah Sisa Biomassa Menjadi Pembersih Residu Pestisida

Asep Nugraha Ardiwinata

Pusat Riset Tanaman Perkebunan, Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Jl. Raya Jakarta - Bogor Km 46, Cibinong Kabupaten Bogor, 16915

Email: asena020361@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan pestisida sintetis secara masif di Indonesia telah menimbulkan ancaman serius terhadap keseimbangan ekosistem dan keamanan pangan akibat akumulasi residu kimia. Teknologi biochar berbasis limbah biomassa lokal (sekam padi, tongkol jagung, sawit, dan tempurung kelapa) hadir sebagai solusi remediasi strategis melalui pendekatan ekonomi sirkular. Melalui proses pirolisis, biomassa diubah menjadi berporositas tinggi yang efektif mengadsorpsi residu pestisida golongan organofosfat, karbamat, dan organoklorin melalui interaksi hidrofobik serta pertukaran ion. Selain mengikat polutan, biochar meningkatkan kualitas fisik dan kimia tanah, seperti Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan retensi air yang mendukung aktivitas mikroba pendegradasi alami. Sebagai teknologi "hijau", biochar unggul karena bahan baku melimpah, biaya rendah, dan kontribusinya pada sekuestrasi karbon. Implementasi luas memerlukan dukungan kebijakan dan standardisasi produksi untuk mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan di Indonesia.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara agraris dengan intensitas penggunaan pestisida sangat tinggi guna menjaga stabilitas produksi pangan nasional. Tanaman hortikultura seperti cabai dan bawang merah, frekuensi penyemprotan mencapai 5–8 kali per musim tanam, bahkan pada daerah tertentu di Sumatera Utara (seperti Padang Sidempuan) dilaporkan frekuensi penyemprotan mencapai 8 kali per musim (Abdi *et al.*, 2026). Ketergantungan pada input kimia ini menyisakan persoalan serius berupa akumulasi residu pestisida di lahan pertanian. Residu pestisida yang sukar terurai ini tidak hanya menurunkan kualitas kesehatan tanah, tetapi juga mengancam keamanan pangan melalui mekanisme biomagnifikasi (proses peningkatan konsentrasi residu pestisida di dalam jaringan

tubuh organisme seiring dengan pergerakannya ke tingkat yang lebih tinggi dalam rantai makanan) serta mencemari ekosistem perairan melalui aliran pelindian (*leaching*). Di tengah ancaman degradasi lingkungan tersebut, inovasi teknologi biochar muncul sebagai solusi mutakhir yang strategis, efisien, dan berkelanjutan (Ardiwinata, 2020; Husni *et al.*, 2021).

Biochar adalah material karbon padat yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa limbah pertanian, seperti sekam padi, tempurung kelapa, tongkol jagung atau tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Inovasi ini bekerja melalui mekanisme adsorpsi yang kuat berkat luas permukaan yang besar dan struktur pori yang kompleks. Biochar juga berperan sebagai spons molekuler yang mampu mengikat senyawa polutan organik secara efektif, sehingga mencegah

penyerapannya oleh tanaman dan meminimalisir mobilitas kontaminan di dalam tanah (Santi & Gunadi, 2017; Husni *et al.*, 2021).

Pemanfaatan biochar di Indonesia memiliki nilai tambah ganda. Selain kemampuannya dalam remediasi lahan tercemar, biochar juga berfungsi sebagai pembenah tanah yang meningkatkan retensi air dan nutrisi, serta mendukung mitigasi perubahan iklim melalui sekuestrasi karbon. Integrasi teknologi biochar dalam sistem pertanian presisi diharapkan mampu menjawab tantangan ketahanan pangan sekaligus pemulihan ekosistem (Santi & Gunadi, 2017). Tulisan ini mengulas mengenai potensi, mekanisme teknis, serta implementasi strategis inovasi biochar sebagai instrumen vital dalam pengelolaan residu pestisida mendukung pertanian ramah lingkungan.

PEMBAHASAN

Urgensi Penanganan Residu Pestisida di Lahan Pertanian Indonesia

Penggunaan pestisida di Indonesia telah menjadi pedang bermata dua. Di satu sisi, pestisida berperan krusial dalam menekan serangan Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) demi mencapai target swasembada pangan, di sisi lain penggunaan yang seringkali melebihi dosis anjuran dan frekuensi yang terlalu tinggi menyebabkan akumulasi residu yang persisten di dalam tanah (Ardiwinata & Nursyamsi, 2012; Ardiwinata, 2020).

Residu pestisida, terutama dari golongan organoklorin atau *Persistent Organic Pollutants* (POPs) digunakan di Indonesia sejak tahun 1960-an, memiliki sifat toksik dan sulit terurai secara alami. Dampaknya tidak hanya terbatas pada degradasi struktur tanah, tetapi juga mencemari air tanah dan terserap ke dalam jaringan tanaman. Residu organoklorin masih ditemukan hingga kini, baik di tanah, air dan tanaman (termasuk komoditas pertanian). Penanganan residu organoklorin masih perlu mendapat perhatian lebih dari pemerintah, di mana lahan pertanian seringkali berdekatan dengan pemukiman, sehingga risiko paparan toksik ini menjadi ancaman kesehatan yang nyata. Oleh karena itu, diperlukan inovasi teknologi yang mampu memitigasi dampak tersebut tanpa merusak produktivitas lahan (Ardiwinata *et al.*, 2018).

Karakteristik Inovasi Biochar sebagai Material Adsorben

Biochar merupakan material padat kaya karbon yang dihasilkan melalui dekomposisi termal biomassa dalam kondisi oksigen terbatas (pirolisis). Berbeda dengan arang biasa,

biochar memiliki karakteristik fisik-kimia yang unik. Proses pirolisis menciptakan jejaring pori mikro, meso, dan makro yang sangat kompleks. Hal ini memberikan luas permukaan internal yang sangat besar yang bertindak sebagai situs pengikatan bagi molekul pestisida. Biochar mengandung gugus fungsi seperti hidroksil, karboksil, dan fenolik. Gugus-gugus ini memungkinkan terjadinya interaksi kimia (kemisorpsi) antara biochar dengan polutan organik melalui ikatan hidrogen atau gaya *Van der Waals* (gaya tarik-menarik antar molekul yang bersifat lemah dan terjadi akibat adanya fluktuasi muatan listrik dalam atom atau molekul). Permukaan biochar umumnya bermuatan negatif, mampu menarik dan menahan kation yang membantu memperbaiki kesuburan tanah sekaligus mengikat residu pestisida yang memiliki muatan tertentu (Santi & Gunadi, 2017).

Mekanisme Remediasi Residu Pestisida oleh Biochar

Efektivitas biochar dalam mengelola residu pestisida didasarkan pada mekanisme imobilisasi. Ketika biochar diaplikasikan ke tanah, ia bekerja melalui beberapa tahapan: 1) Molekul pestisida (umumnya diameter 0,5-1,5 nm) yang terlarut dalam air tanah akan terperangkap di dalam pori-pori biochar, pada umumnya di dalam mikropori dengan diameter < 2 nm. Sekali terikat, bioavailabilitas pestisida tersebut menurun drastis, sehingga tidak lagi mudah diserap oleh akar tanaman atau tercuci ke air tanah; 2) Biochar menyediakan mikrohabitat yang ideal bagi mikroorganisme tanah. Pori-porinya melindungi bakteri pendegradasi polutan dari predator dan perubahan lingkungan yang ekstrem. Dengan populasi mikroba yang lebih sehat, proses pemecahan senyawa pestisida menjadi senyawa

yang lebih sederhana dan tidak beracun dapat berlangsung lebih cepat; 3) Mengikat senyawa aktif pestisida, biochar secara efektif menurunkan konsentrasi residu pestisida di lingkungan tanah antara lain klorpirifos (*organofosfat*) dan lindan (*organoklorin*) (Gambar1), sehingga memulihkan keseimbangan ekosistem tanah (Ardiwinata & Harsanti, 2014).

Pemanfaatan Limbah Biomassa Lokal di Indonesia

Salah satu kekuatan inovasi biochar di Indonesia adalah ketersediaan bahan baku yang melimpah dan murah. Indonesia menghasilkan jutaan ton limbah pertanian setiap tahunnya yang belum dimanfaatkan secara optimal. Berdasarkan data BPS, Kementerian Pertanian, dan hasil kajian teknis tahun 2024–2025, menunjukkan estimasi jumlah limbah biomassa sesuai Tabel 1.

Inovasi ini mengubah paradigma "limbah menjadi berkah", dengan mengolah limbah tersebut menjadi biochar melalui reaktor pirolisis sederhana yang bisa dioperasikan di tingkat desa sehingga petani dapat membersihkan lahan dari residu dan mengurangi pembelian pupuk kimia.

Dampak Agroklimat dan Keberlanjutan Jangka Panjang

Aplikasi biochar tidak hanya bersifat solusi jangka pendek untuk residu pestisida, tetapi juga menawarkan manfaat jangka panjang bagi keberlanjutan pertanian di Indonesia. Biochar sangat stabil dan dapat bertahan di dalam tanah hingga ribuan tahun, sehingga berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim dengan cara menyimpan karbon di dalam tanah. Dengan adanya biochar, penggunaan pupuk anorganik dapat dikurangi karena pupuk tidak mudah tercuci oleh air hujan, melainkan tersimpan di pori-

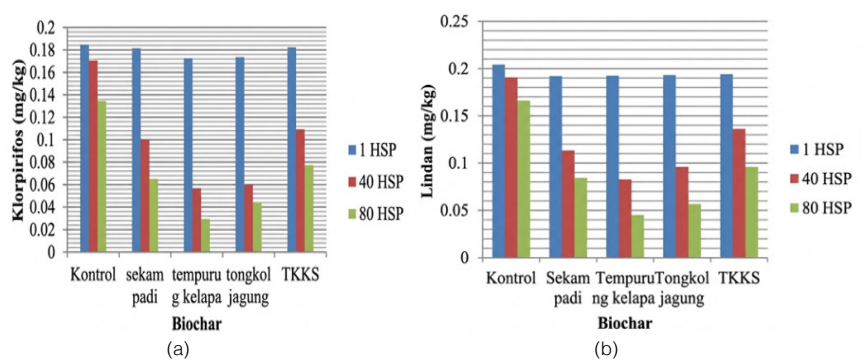
pori biochar untuk dilepaskan secara perlahan sesuai kebutuhan tanaman (Abrol *et al.*, 2021)

Tantangan dan Strategi Implementasi di Indonesia

Penerapan biochar di Indonesia masih menghadapi beberapa tantangan yakni: 1) Masalah edukasi dimana petani menganggap biochar sama dengan abu pembakaran biasa, padahal karakteristiknya sangat berbeda, 2) Standardisasi kualitas biochar, mengingat terdapat perbedaan bahan baku dan suhu pirolisis yang akan menghasilkan kualitas arang yang berbeda. Oleh karena itu, strategi yang perlu dilakukan meliputi: 1) Pengembangan unit pirolisis skala kecil yang efisien dan rendah emisi bagi kelompok tani; 2) Integrasi aplikasi biochar ke dalam program bantuan sarana produksi pertanian sebagai upaya pemulihan lahan terdegradasi; dan; 3) Pemetaan dosis aplikasi biochar yang spesifik untuk berbagai jenis tanah di Indonesia dan jenis pestisida yang dominan digunakan.

Biochar merupakan jembatan antara produktivitas pertanian dan kelestarian lingkungan, dan juga menawarkan mekanisme filtrasi alami yang efektif, murah, dan berkelanjutan. Dengan memanfaatkan limbah biomassa yang berlimpah, Indonesia memiliki peluang yang sangat besar untuk memulihkan kesehatan tanah melalui praktik pertanian yang ramah lingkungan (Kementan, 2025). Beberapa inovasi teknologi dari biochar seperti *Filter Inlet Outlet* (FIO) (Gambar 2) dan pupuk urea berlapis biochar (Gambar 3).

Dalam SNI 06-3730-1995, IBI (2023), dan Kepmentan No. 261/2019, biochar berkualitas harus memiliki kandungan air yang rendah agar daya serapnya tidak terganggu oleh kelembapan. Kadar abu



Gambar 1. Penurunan Konsentrasi Klorpirifos (a) dan Lindan (b) di Dalam Tanah Setelah Perlakuan Biochar 1-80 Hari Setelah Perlakuan (HSP) (Ardiwinata & Harsanti, 2014)

Tabel 1. Data Potensi Limbah Biomassa di Indonesia

Visual	Jenis Biomassa	Potensi Karakteristik Arang Aktif (Biochar)	Estimasi Jumlah (ton/tahun)	Keterangan & Rasio Limbah
	Sekam Padi	Kaya akan silika, sangat baik untuk meningkatkan daya tahan tanaman	10.63 Juta	Berdasarkan produksi padi 2024 (53,14 juta ton). Rasio sekam sekitar 20% dari GKG.
	Tempurung Kelapa	Memiliki porositas sangat tinggi, unggul dalam kapasitas adsorpsi	300 ribu – 1 Juta	Dari produksi kelapa ~3 juta ton. Potensi bervariasi tergantung pemanfaatan industri.
	Tongkol Jagung	Mudah didapat di sentra jagung, efektif untuk memperbaiki struktur tanah fisik	5,7-6 Juta	Estimasi dari produksi jagung nasional yang mencapai ~15-20 juta ton pipil kering.
	Tandan Kosong Kelapa Sawit	Potensi volume sangat besar, mengandung hara kalium yang tinggi.	56-64 Juta	Dari produksi TBS ~256 juta ton. Rasio TKKS berkisar 22-25% per ton TBS.

Sumber: INFO SAWIT (2025); Susana & Aryadi (2025); BPS (2025); Kementan (2025)

harus ditekan seminimal mungkin (maksimal 10%), yang mana kadar abu yang tinggi menunjukkan banyaknya mineral atau kotoran yang tersisa dari proses pembakaran sehingga dapat menutupi pori-pori arang. Selain itu, kadar karbon aktif minimal sebesar 65% hingga 80% (tergantung jenisnya). Semakin tinggi angka ini, semakin sedikit zat pengotor yang ada di dalamnya. Kualitas arang aktif juga ditentukan oleh seberapa kuat ia mampu menarik zat lain. SNI mengukurnya melalui dua indikator utama, yaitu daya serap terhadap Iodium yang

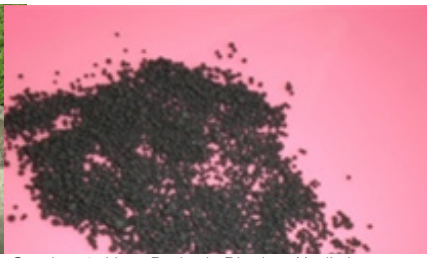
menunjukkan kemampuan arang menyerap molekul berukuran kecil (Standar minimal di angka 750 mg/g), dan daya serap terhadap Biru Metilen yang menunjukkan kemampuan menyerap molekul yang lebih besar (Standar minimal untuk butiran 60 ml/g).

KESIMPULAN

Pemanfaatan limbah pertanian seperti sekam padi, tempurung kelapa, tongkol jagung, dan TKKS merupakan solusi ganda yang mengubah residu organik menjadi



Gambar 2. FIO yang Sudah Terpasang di Saluran Irigasi (Mamat & Sukarman, 2020)



Gambar 3. Urea Berlapis Biochar (Ardiwinata et al., 2017)

material bernilai tinggi. Ketersediaan bahan baku yang kontinu menjamin keberlanjutan produksi biochar sebagai agen remediasi tanah yang ekonomis dan ramah lingkungan. Secara teknis, efektivitas biochar dalam mengelola residu pestisida, terletak pada luas permukaan spesifik dan struktur pori mikronya. Melalui mekanisme adsorpsi fisik dan kimia, biochar secara aktif mengikat molekul polutan di dalam tanah, sehingga menurunkan bioavailabilitas residu kimia dan mencegah pencemaran lebih lanjut ke dalam jaringan tanaman maupun sumber air tanah.

Pemanfaatan biochar berbasis limbah biomassa lokal yang dikembangkan perlu disesuaikan dengan lokasi, tipe tanah (latosol, aluvial, gambut), dan dosis yang tepat, serta diintegrasikan dengan pupuk guna meningkatkan efisiensi hara. Biochar dipakai sebagai media filtrasi alami seperti FIO guna menekan residu pestisida dengan didukung pengembangan unit produksi skala kecil berbasis limbah biomassa lokal. Adopsi biochar di lahan dapat menjadi langkah strategis dalam memenuhi Batas Maksimum Residu (BMR) sesuai yang diatur oleh regulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, S., Adelina, R., Burhanuddin, B., Nasution, Y., & Yanti, D.P. (2026). Analisis intensitas penyemprotan opt pada tanaman cabai merah di padangsidimpuan. *EKSAKTA: Jurnal Penelitian dan Pembelajaran MIPA*, 11(1), 127–137
- Abrol, V., Sharma, P., Anand, S., R. Chary., Prasad, T. N. V. K. V., Samnotra, R.K. & Khenrab, S. (2021). Biochar: a tool for sustainable agriculture and climate change mitigation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(8), 713-727.
- Ardiwinata, A.N., & D. Nursyamsi. (2012). Residu pestisida di sentra produksi padi di Jawa Tengah. *Jurnal Pangan*. 21(1), 39-58.
- Ardiwinata, A.N., & Harsanti, E.S., (2014). Remediation of insecticide residue in soil using activated carbon. *Lingkungan Tropis*, 8(2), 69-79.
- Ardiwinata, A.N., Sulaeman, N.E., Priyatna, S., Wahyuni, E., & Harsanti. (2017). *Urea Berlapis Arang Aktif* (Indonesia Patent No. IDP000046301). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
- Ardiwinata, A. N., Ginoga, L. N., Sulaeman, E., & Harsanti, E. S. (2018). Pesticide residue monitoring on agriculture in Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(2), 133-144.
- Ardiwinata, A.N. (2020). Pemanfaatan arang aktif dalam pengendalian residu pestisida di tanah. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 14(1), 49-62.
- BPS. 2025. *Luas Panen dan Produksi Jagung di Indonesia 2024*. Badan Pusat Statistik.
- Husni, M.H., Masulili B., & Sitorus. (2021). Pemanfaatan biochar tandan
- kosong kelapa sawit terhadap sifat kimia tanah dan residu pestisida. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, 26(1), 125-132.
- IBI. (2023). *Standardized Product Definition and Product Organization Standards for Biochar Used in Soil*. International Biochar Initiative
- INFO SAWIT. (2025). *Indonesia punya potensi besar ubah limbah sawit jadi energi bersih*. <https://gwww.infosawit.com> (diakses 22 April 2026)
- Kementerian Pertanian. (2025). *Outlook kelapa 2025*. Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian.
- Keputusan Menteri Pertanian (Kepmentan) No. 261/Kpts/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal (PTM) Pupuk Organik, Pembenah Tanah, dan Pupuk Hayati*. Kementerian Pertanian.
- Mamat H.S. & Sukarman. (2020). Manfaat inovasi teknologi sumberdaya lahan pertanian dalam mendukung pembangunan pertanian. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 14(2), 116-133.
- Santi, L. P., & Goenadi, D. H. (2017). Pemanfaatan biochar asal sekam padi dan tempurung kelapa sebagai pembawa mikroba penambat nitrogen. *Jurnal Menara Perkebunan*, 85(2), 94-104.
- SNI 06-3730-1995. *Arang aktif Teknis. ICS 75. 160. 10*. Badan Standardisasi Nasional.
- Susana, I. G. B., Adhi, I. G. A. K. C., & Aryadi, W. (2025). Kajian energi terbarukan dan peningkatan ekonomi dari pemanfaatan limbah sekam padi melalui co-firing biomassa. *Energy, Materials and Product Design*, 4(2), 293-300.