

REPUBLIC INDONESIA
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA

SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC00202260977, 4 September 2022

Pencipta

Nama : **Susila Herlambang, Danang Yudhiantoro, Muammar
Gomareuzzaman, Indriana Lestari**

Alamat : UPN "Veteran" Yogyakarta, Jl. Padjajaran No.104, Condongcatur,
Kec. Depok, Kabupaten Sleman, DI YOGYAKARTA, 55283

Kewarganegaraan : Indonesia

Pemegang Hak Cipta

Nama : **LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta**

Alamat : Jl. Padjajaran No.104, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten
Sleman, DI YOGYAKARTA, 55283

Kewarganegaraan : Indonesia

Jenis Ciptaan : **Buku**

Judul Ciptaan : **Biochar Inovasi Zero-Waste Organik**

Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia : 4 September 2022, di Sleman

Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, dihitung mulai tanggal 1 Januari tahun berikutnya.

Nomor pencatatan : 000376711

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.
Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.



a.n Menteri Hukum dan Hak Asasi Manusia
Direktur Jenderal Kekayaan Intelektual
u.b.
Direktur Hak Cipta dan Desain Industri

Anggoro Dasananto
NIP.196412081991031002

Disclaimer:

Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.

BIOCHAR

INOVASI ZERO-WASTE ORGANIK

Penulis :

Susila Herlambang

Danang Yudhiantoro

Muammar Gomareuzzaman

Indriana Lestari



UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA
2022

BUKU

BIOCHAR

INOVASI *ZERO-WASTE* ORGANIK

Penulis:

Susila Herlambang
Danang Yudhiantoro
Muammar Gomareuzzaman
Indriana Lestari

Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Yogyakarta

BIOCHAR:

INOVASI ZERO-WASTE ORGANIK

Penulis: Susila Herlambang
Danang Yudhiantoro
Muammar Gomareuzzaman
Indriana Lestari

Copyright © 2022, pada penulis

Hak Cipta dilindungi Undang-undang
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

ISBN : 978-623-389-131-8

Diterbitkan oleh:
Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat
UPN Veteran Yogyakarta
Jl. Pajajaran (Lingkar Utara), Condongcatur , Yogyakarta,
55283
Telp. (0274) 486188,486733, Fax. (0274) 486400
e-mail: lppm@upnyk.ac.id.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
KATA PENGANTAR	viii
BAB I.	
PENDAHULUAN	- 2 -
1.1. Latar Belakang	- 2 -
1.2. Tujuan	- 6 -
1.3. Sistematika Penulisan Buku	- 6 -
BAB II.	
BIOCHAR DARI BAHAN ORGANIK	- 8 -
2.1. Pengertian Biochar	- 10 -
2.2. Bahan Organik Untuk Biochar	- 12 -
2.3. Proses Produksi dan Modifikasi Biochar	- 19 -
2.4. Karakterisasi Biochar	- 32 -
2.5. Aplikasi	- 39 -
BAB III.	
ZERO-WASTE	- 44 -
3.1. Zero-waste	- 47 -
3.2. Inovasi <i>Zero-waste</i> Dengan Biochar	- 49 -

BAB IV.

ASPEK TEKNO-EKONOMI BIOCHAR..... - 54 -

BAB V.

STUDI KASUS - 60 -

DAFTAR PUSTAKA - 66 -

TENTANG PENULIS - 83 -

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Jenis-Jenis Residu Pertanian	- 19 -
Gambar 2. Teknik Produksi dan Aplikasi Biochar	- 21 -
Gambar 3. Penggambaran Berbagai Cara Modifikasi Biochar Untuk Meningkatkan Kualitas Tanah.....	- 26 -
Gambar 4. Teknik Modifikasi Biochar Dan Perubahan Karakteristik Biochar	- 31 -
Gambar 5. Karakterisasi Fisikokimia Biochar	- 32 -
Gambar 6. Teknik Karakterisasi Biochar.....	- 33 -
Gambar 7. Spektra FTIR Biochar Dari Jerami Padi Yang Diproduksi Pada Berbagai Temperatur Dan Waktu Pirolisis.....	- 36 -
Gambar 8. Hasil Citra SEM Produksi Biochar dari Jerami Padi Pada Temperatur Berbeda.....	- 39 -
Gambar 9. Aplikasi Biochar Pada Bidang Pertanian	- 40 -
Gambar 10. Penggunaan Biochar Dalam Pertanian Dan Hortikultura, Serta Kontribusinya Terhadap Sirkulasi Ekonomi.....	- 41 -
Gambar 11. Multifungsi Biochar Untuk Manajemen Lingkungan Dan Penghilangan Polutan.....	- 43 -
Gambar 12. Konsep Pengelolaan Zero-waste Berkelanjutan-	49 -
Gambar 13. Perbedaan Pengelolaan Karbon Pada Metode Konvensional dan Inovatif Biochar	- 51 -
Gambar 14. Biochar Carbon Sequestration	- 52 -

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai Kandungan Lignin, C/N, C/P dan C/S Biomassa	- 15 -
Tabel 2. Komposisi Lignoselulosa (wt%) Beberapa Sumber Biomassa	- 17 -
Tabel 3. Analisis manfaat biaya biochar pada tahun pertama dengan kapasitas produksi 450 kg/hari....	- 57 -

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat- Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan buku BIOCHAR: INOVASI *ZERO-WASTE* ORGANIK.

Buku ini memberikan informasi tentang salah satu bentuk pengembangan teknik baru *zero-waste* pada limbah organik yaitu biochar sebagai upaya optimalisasi daur ulang dan minimalisasi pemborosan hingga mendekati nol, serta mitigasi *Green House Gas*. Tujuannya adalah untuk melindungi lingkungan, menambah nilai manfaat limbah organik, dan meningkatkan produktivitas lingkungan budidaya tanaman, serta mengembangkan rantai pasok yang berkelanjutan.

Harapan penulis, buku ini dapat memberikan informasi penerapan *zero-waste* pada sektor pertanian dengan produk biochar. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada banyak pihak yang terlibat dan membantu dalam penyusunan dan penyelesaian buku ini. Kami juga mengucapkan terima kasih karena Kepada LPPM telah memberikan dana Hibah Penelitian Kluster, sehingga kegiatan penelitian serta penyusunan buku ini dapat terlaksana.

Demikian buku referensi ini disusun, dan penulis menyadari bahwa di dalam buku ini masih banyak memiliki kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan yang membangun dari pembaca kami harapkan sebagai upaya untuk perbaikan dan penyempurnaan buku ini kedepannya.

Yogyakarta, Juli 2022
Salam Hormat,

Penulis



BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan alasan mengapa buku ini ditulis, tujuan dari penulisan buku, dan sistematika penulisan buku yang sesuai dengan kaidah penulisan buku ajar.

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Food and Agriculture Organization (FAO), organisasi pangan dunia, melaporkan telah terjadi peningkatan produksi pertanian lebih dari tiga kali lipat selama 50 tahun terakhir sebagai akibat ekspansi tanah, air dan sumber daya alam lainnya untuk penggunaan pertanian, kontribusi teknologi dari revolusi hijau yang mempengaruhi produktivitas dan percepatan pertumbuhan penduduk. Saat ini, berbeda dari sebelumnya, pertanian menghadapi banyak tantangan dan permasalahan yang kompleks. Setiap negara harus menyediakan makanan yang cukup, aman dan bergizi untuk memenuhi permintaan yang meningkat seiring dengan naiknya jumlah populasi manusia, dan memastikan ketahanan pangan untuk semua (FAO, 2019).

Dilain sisi penggunaan pupuk kimia secara berlebihan tanpa pemberian pupuk organik alami menyebabkan penurunan kandungan bahan organik di dalam tanah pertanian merupakan masalah yang menjadi perhatian besar petani di seluruh dunia. Tentunya kondisi ini mengakibatkan turunnya kesuburan tanah yang secara langsung mengganggu produksi tanaman pertanian dan mempengaruhi sejumlah sifat tanah lainnya seperti kapasitas retensi air, agregasi, pembentukan struktur dan

kekuatan mekanis tanah atau kompaktilitas. Kelangkaan air yang tersedia untuk tanaman menimbulkan risiko bagi pertanian, terutama di daerah yang rawan kekeringan. Belum sampai di sini, sistem iklim di bumi dapat memengaruhi produktivitas lahan atau pertanian. Beberapa aktivitas manusia menghasilkan gas rumah kaca atau *greenhouse gas* (GHG) yang berlebih seperti pada pembakaran hutan, penggunaan bahan bakar fosil, dan alih fungsi lahan. Salah satu sektor kehidupan yang paling terdampak akibat perubahan iklim adalah pertanian. Fenomena yang berkaitan dengan perubahan iklim adalah penurunan kualitas dan kuantitas air, penurunan kualitas dan kuantitas hutan, kekeringan, perubahan habitat dan spesies, kekeringan, kenaikan muka air laut, serta tenggelamnya pulau di pesisir. Sayangnya, pertanian bukan hanya sekedar korban perubahan iklim, namun juga penyumbang GHG. Sektor pertanian menyumbang sebesar 20% GHG dari total emisi diseluruh dunia dengan lebih dari 44% bagian disumbang oleh pertanian di Benua Asia. Indonesia yang menyandang peringkat kelima negara penyumbang emisi di dunia, 9% GHG-nya disumbang dari sektor pertanian (Humaira, 2022; Prastiyo et al., 2020).

FAO prihatin dengan kondisi ini, terutama pada ketersediaan pangan. Penurunan kesuburan dan kualitas tanah

menyebabkan penurunan produktivitas pertanian. Penurunan produktivitas pertanian berdampak pada ketahanan pangan, salah satu pilar ketahanan nasional. Banyak upaya dilakukan untuk mengatasi ancaman terhadap ketahanan pangan, termasuk diantaranya *Climate Smart Agriculture* (CSA). Sistem pertanian cerdas iklim ini merupakan bentuk sinergi antara peningkatan produktivitas lahan dan pendapatan sektor pertanian, adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Beberapa program CSA termasuk meningkatkan produktivitas pertanian, membimbing pertanian yang tahan iklim, meningkatkan pendapatan petani, mengurangi risiko gagal panen, dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Kini CSA menjadi salah satu program unggulan Departemen Pertanian dan memiliki nilai berkelanjutan dengan memasukkan faktor sosial, lingkungan dan ekonomi. Berbagai bentuk implementasi CSA yakni pengelolaan air, pengelolaan tanah, dan pengelolaan tanaman.

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, salah satu tekanan signifikan yang dihadapi petani adalah penurunan kualitas tanah yang diperburuk dampak negatif langsung dari perubahan iklim pada produktivitas tanaman. Tanah merupakan sumber daya penting dalam produksi tanaman, karena tidak hanya bertindak sebagai media untuk pertumbuhan tanaman tetapi juga membantu dalam memasok nutrisi ke tanaman dan

menahan air dari curah hujan. Tanah berkualitas baik adalah tanah yang dapat menyimpan lebih banyak air dan nutrisi, yang merupakan dua sumber daya utama yang dibutuhkan untuk produksi yang berkelanjutan, terutama pada iklim yang berubah-ubah. Sebagian besar petani kecil atau petani subsisten berada di daerah marginal dengan kualitas tanah yang buruk. Strategi CSA yang direkomendasikan seperti *water and soil management* dapat meningkatkan kemampuan petani untuk beradaptasi dan mengurangi dampak akibat perubahan iklim.

Pada kenyataannya petani sering gagal dalam upaya memanfaatkan residu pertanian kembali ke lahan, yang merupakan komponen integral dari teknologi dikarenakan adanya persaingan dalam penggunaan residu tanaman. Biochar dapat berperan dalam intensifikasi pertanian berkelanjutan dan CSA, melalui potensinya dalam memperkuat ketahanan sistem pertanian. Biochar yang diproduksi secara berkelanjutan dan diaplikasikan ke tanah dapat secara proaktif menyerap karbon dari atmosfer sehingga laju penambahan GHG bisa dicegah. Terkait hal tersebut, produksi biochar dari residu pertanian menciptakan *zero-waste* atau nol limbah pertanian dan dari *zero-waste* inilah memberikan prinsip kepada kita untuk terus berupaya menghilangkan GHG dan mengurangi jejak karbon.

Oleh karena itu, di dalam buku ini akan diberikan informasi secara lengkap bagaimana biochar menjadi inovasi *zero-waste* dari residu pertanian yang merupakan senyawa organik, sebagai salah satu program CSA.

1.2. Tujuan

Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman menyeluruh terkait biochar dalam upaya mewujudkan nol limbah atau *zero-waste* di lingkungan pertanian.

1.3. Sistematika Penulisan Buku

Buku ini mencakup 5 bagian, bagian pertama berupa pendahuluan, berisi latar belakang, tujuan dan sistematika penulisan buku. Bagian kedua berisi teknik produksi, karakterisasi dan aplikasi biochar secara umum. Di bagian ke ketiga buku ini berisi penjelasan mengenai inti buku yaitu *zero-waste* biochar, bagaimana biochar dapat menjadi inovasi baru untuk menciptakan *zero-waste* yang didukung dengan penjelasan siklus hidup biochar, dilanjutkan pada bagian keempat berisi tentang aspek ekonomi biochar. Selanjutnya pada bab kelima yang merupakan bab terakhir buku ini, akan diberikan studi kasus dengan topik implementasi *zero-waste*

pada tanah sawah. Berikut adalah garis besar sistematika buku ini:

- BAB I Pendahuluan
- BAB II Biochar dari Bahan Organik: Pengertian, Sumber Bahan Organik, Teknik Produksi, Karakterisasi dan Aplikasi
- BAB III *Zero-waste*: Biochar Inovasi *Zero-waste* Bahan Organik
- BAB IV Aspek Tekno-Ekonomi Biochar
- BAB V Studi Kasus: Implementasi Biochar Pada Tanah Pasir Pantai



BAB II

BIOCHAR DARI BAHAN ORGANIK

**PENGERTIAN, SUMBER BAHAN ORGANIK, TEKNIK PRODUKSI,
KARAKTERISASI, DAN APLIKASI**

BAB II. BIOCHAR DARI BAHAN ORGANIK

Dunia saat ini menghadapi masalah peningkatan CO₂ atmosfer dan perubahan iklim seperti pemanasan global, kekeringan dan penurunan karbon organik tanah. Di lain sisi, permintaan akan pangan meningkat seiring dengan naiknya jumlah populasi manusia yang terus berkembang pesat di dunia. Sumber daya tanah pertanian terbatas dan kualitasnya menurun karena urbanisasi dan aktivitas manusia lainnya. Untuk menahan laju penambahan konsentrasi gas CO₂ di atmosfer perlu adanya cara untuk mengurangi karbon di atmosfer. Konversi biomasa menjadi biochar dan selanjutnya dimasukkan ke dalam tanah sebagai pemuliaan tanah bertujuan untuk meningkatkan kesuburan tanah, secara linier dapat meningkatkan produksi tanaman agar kelestarian pertanian dapat berlanjut. Bila biochar dapat diproduksi dalam jumlah yang besarnya setara dengan jumlah karbon yang masuk ke atmosfer, maka akan terjadi keseimbangan antara gas CO₂ yang masuk dan keluar atmosfer. Penyimpanan karbon sebesar 1 gigaton pertahun selama 40 tahun akan menghambat penambahan konsentrasi gas CO₂ di atmosfer, sehingga laju penambahan gas rumah kaca bisa dicegah. Praktik ini juga dapat secara permanen menyerap karbon untuk mengurangi emisi gas rumah kaca ke atmosfer (Sarwono, 2016).

2.1. Pengertian Biochar

Masyarakat awam sulit membedakan antara karbon aktif, biochar dan *charcoal*. Dalam membedakannya, maka masyarakat perlu mengetahui fungsi dan proses produksinya. Secara umum fungsi karbon aktif adalah sebagai adsorben berbagai jenis senyawa organik, an-organik maupun logam berat untuk mengatasi pencemaran lingkungan. Cara memperoleh karbon aktif, karbon yang diolah dengan sedikit oksigen harus diaktifasi secara kimia maupun termal (temperatur tinggi) untuk meningkatkan mikroporositas dan luas permukaan. Dari tingkat kebutuhan energi, pembuatan karbon aktif membutuhkan lebih banyak panas dengan adanya proses tambahan, sedangkan produksi biochar membutuhkan input energi keseluruhan yang lebih rendah daripada karbon aktif, sehingga menghasilkan biaya yang rendah. Biochar dan arang (*charcoal*) dapat dibedakan berdasarkan tujuan komersialnya. Arang adalah bahan organik yang digunakan untuk bahan bakar dan produksi energi, sedangkan biochar dapat membantu mengelola lingkungan melalui penyerapan karbon yang diaplikasikan pada tanah.

Biochar adalah produk tinggi karbon yang dibuat dengan memanaskan biomassa seperti kayu, kotoran hewan, atau daun dalam wadah tertutup rapat dengan sedikit atau tanpa

oksigen pada range temperatur tertentu. Lebih tepatnya, biochar adalah bahan padat karbon berpori yang terbentuk melalui konversi termokimia bahan organik dalam lingkungan dengan kadar oksigen rendah, dengan karakteristik fisikokimia yang cocok untuk penyimpanan karbon dalam jangka panjang yang lebih aman. Seperti yang didefinisikan oleh *International Biochar Initiative* (IBI), biochar adalah bahan padat yang berasal dari dekomposisi biomassa pada lingkungan yang minim oksigen.

Penggunaan biochar setidaknya sudah ada sejak 2000 tahun yang lalu. Berdasarkan catatan sejarah biochar diaplikasikan pertama kali di Pertanian Barat pada pertengahan abad kesembilan belas, akan tetapi pemanfaatan biochar meluas lebih jauh dari waktu ke waktu. Asal-usul biochar terkait dengan komunitas Indian Amerika di Lembah Amazon. *Terra preta* yang berarti "tanah hitam orang Indian", merupakan tanah hitam yang subur, diciptakan oleh budaya asli kuno, dimana memberikan bukti nyata penggunaan biochar yang ekstensif. Tanah ini memiliki kandungan karbon hitam (C) dan unsur hara seperti unsur Kalium (K), Fosfor (P), dan Nitrogen (N) sangat tinggi. Karena karakteristik tanah yang gelap dan kaya hara, wilayah ini terus menjadi sangat produktif meskipun

mengalami *leaching* selama ratusan tahun yang disebabkan oleh hujan tropis yang lebat (Kamarudin et al., 2022).

Penting untuk diketahui bahwa biochar bukanlah pupuk, tetapi berfungsi sebagai pembenah tanah atau *soil conditioner*. Hal ini dikarenakan, meskipun beberapa pembenah tanah mengandung unsur hara, akan tetapi konsentrasinya relatif rendah, sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan tanaman seperti halnya pupuk, selain itu seringkali unsur hara yang dikandungnya dalam bentuk yang belum atau lambat tersedia untuk tanaman. Jadi, pembenah tanah adalah bahan-bahan sintetis atau alami, organik atau mineral, baik berbentuk padat maupun cair yang mampu memperbaiki struktur tanah, merubah kapasitas tanah, menahan dan melalukan air, serta dapat memperbaiki kemampuan tanah dalam memegang hara, sehingga air dan hara tidak mudah hilang, namun tanaman masih mampu memanfaatkan air dan hara tersebut, termasuk salah satu diantaranya ialah biochar (Dariah et al., 2015).

2.2. Bahan Organik Untuk Biochar

Bahan organik adalah bahan yang berasal dari makhluk hidup, umumnya residu tanaman, hewan, dan manusia yang belum, telah mengalami, atau sedang dalam proses penguraian, baik yang terdapat di dalam tanah maupun dipermukaan tanah

(Wawan, 2017). Dalam beberapa referensi disebutkan bahwa material yang berasal dari organisme hidup, meliputi tumbuh-tumbuhan, hewan dan produk sampingnya seperti sampah kebun, hasil panen dan sebagainya disebut biomassa. Dalam hubungannya dengan bidang pertanian, bahan organik sangat besar peranannya untuk meningkatkan kesuburan tanah, dan nantinya akan menentukan produktivitas tanah. Ada banyak jenis bahan organik yang dapat digunakan kembali di dalam tanah, baik sampah maupun limbah dari industri, pertanian, perkebunan, peternakan, pengolahan makanan, limbah kota dan industri-industri berbahan selulosa dan kayu seperti industri kertas. Secara umum bahan organik yang tersedia dan digunakan antara lain limbah pertanian, limbah perkotaan, limbah perkebunan, limbah organik dari pengolahan makanan, limbah organik dari industri minyak atsiri, limbah organik dari industri minyak sawit dan perkebunan lainnya, limbah organik dari industri kertas dan pabrik kayu, serta limbah makanan dari konsumen, kotoran dan kotoran hewan (pupuk kandang), sisa tanaman, pupuk hijau, sampah kota, limbah industri, kompos dan sisa tanaman atau bahan pakan. Kesemuanya mengandung senyawa karbon dan unsur hara yang sangat tinggi sehingga sangat potensial diolah menjadi biochar.

Ada berbagai persepsi yang digunakan dalam pemilihan material atau bahan organik yang tepat digunakan untuk bahan baku biochar. Sismiyaniti et al. (2018) menggunakan rasio C/N > 25 dan Lignin > 15% sebagai dasar penentuan keefektifan suatu bahan organik sebagai bahan baku, hal ini dikarenakan kadar lignin dan rasio C/N merupakan dua faktor yang berkorelasi positif terhadap kecepatan dekomposisi bahan organik, artinya semakin tinggi kadar lignin dan rasio C/N, semakin sulit bahan organik tersebut untuk terdekomposisi, sehingga metode terbaik untuk mengolah bahan organik tersebut adalah dengan mengkonversinya terlebih dahulu menjadi biochar. Selain itu umumnya bahan organik yang mengandung C/N tinggi memiliki kadar N yang rendah (<2,5%), dimana kondisi ini mengakibatkan terjadinya imobilisasi N selama proses dekomposisi berlangsung. Dengan menggunakan dua puluh empat sampel bahan organik berbeda yang dikategorikan ke dalam tiga jenis kelompok bahan organik yaitu kelompok bahan organik segar, sisa panen dan limbah industri pertanian/perkebunan, dihasilkan bahwa jerami padi, sekam padi, pelepah kelapa sawit, tongkol jagung, tandan kosong kelapa sawit perlu diolah terlebih dahulu menjadi biochar sebelum dikembalikan ke tanah, karena memiliki kandungan lignin, C/N, C/P dan C/S yang tinggi. Berdasarkan

komponen tersebut, maka sedikit contoh bahan-bahan organik yang berpotensi untuk dijadikan bahan baku biochar dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Kandungan Lignin, C/N, C/P dan C/S Biomassa

Bahan Organik	Lignin (%)	C/N	C/P	C/S	Referensi
Jerami padi	22,25	27,48	243,38	638,88	
Pelepah kelapa sawit	25,45	124,36	159,89	310,89	
Ampas kelapa sawit	23,73	992,00	28,34	141,71	
Sekam padi	32,69	58,42	119,68	106,67	(Sismiyanti et al., 2018)
Serbuk gergaji	22,65	148,50	212,14	247,50	
Tandan kosong kelapa sawit	25,60	79,27	110,98	102,78	
Tongkol jagung	33,30	36,80	30,90	218,33	
Sabut kelapa	42	122,38	-	-	(Wang & Sarkar, 2018)
Tempurung kelapa	30	196	-	-	

Daful & Chandraratne (2020) mengelompokkan bahan baku biochar ke dalam dua kelompok yaitu biomassa lignoselulosa dan non-lignoselulosa. Biomassa lignoselulosa merupakan sumber daya hayati yang melimpah dari bagian tumbuhan dan hewan termasuk residu agroindustri, residu industri kehutanan, *energy crops* (tanaman untuk menghasilkan bahan bakar penghasil energi), limbah padat perkotaan, dan lain-lain. Limbah biomassa non-lignoselulosa sangat beragam termasuk *sewage sludge* (lumpur limbah), pupuk kandang, alga, bulu hewan, dan tulang, dll. memiliki tantangan berat untuk pembuangan dan pemanfaatan bernilai tambah, karena komponennya yang kompleks dan beragam. Dibandingkan dengan biomassa lignoselulosa, biomassa non-lignoselulosa memiliki ancaman yang lebih besar bagi lingkungan ekologis karena mengandung logam berat dan *heteroatom* yang lebih tinggi seperti nitrogen, fosfor, belerang. Logam berat dalam biomassa non-lignoselulosa dapat larut dalam sistem air, yang menyebabkan pencemaran air dan akumulasi dalam rantai makanan. Komposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin dari bahan baku biomassa tersebut digambarkan pada Tabel 2. Komposisi Lignoselulosa (wt%) Beberapa Sumber Biomassa

Tabel 2. Komposisi Lignoselulosa (wt%) Beberapa Sumber Biomassa

	DPR	DPL	EFB	PP	CL	OP	HW	SW
C	40,40	34,87	38,44	45	40	54,1	45- 50	35- 40
H	33,08	19,84	24,65	41	50	49	20- 25	20- 25
L	12,49	14,03	25,08	3	8	12	20- 25	27- 30

Keterangan: *C* = cellulose; *H* = hemicellulose; *L* = lignin; *DPR* = date palm residues; *DPL* = date palm leaf; *EFB* = empty fruit bunch; *PP* = pea pod; *CL* = cauliflower leaves; *OP* = orange peel; *HW* = hard wood; *SW* = soft wood (Daful & Chandraratne, 2020)

Menurut Sohi et al. (2010), meskipun jenis bahan baku penting dalam menentukan fungsi biochar dalam tanah, tidak ada konsensus mengenai bahan baku yang optimal baik dari segi penggunaan tanah dan produksi energi, terutama karena keberadaan pabrik pirolisis biomassa skala komersial masih langka, dan jikapun ada biasanya terkait dengan pengolahan limbah tertentu saja. Selain itu, karakteristik biochar seperti kadar C dalam biochar dapat diubah dengan cara mengatur

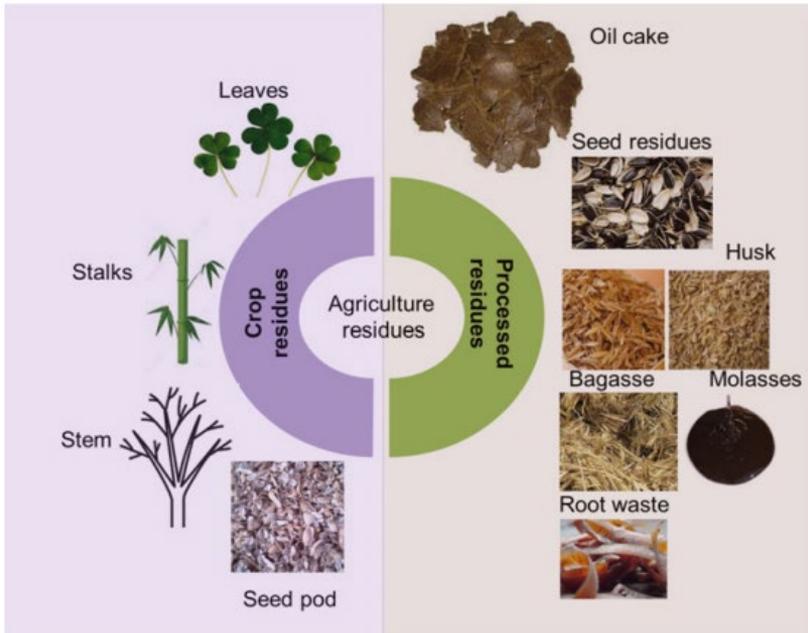
temperatur pirolisis dan teknik pirolisis yang digunakan untuk pembuatan biochar (Ippolito et al., 2020).

Berdasarkan ulasan di atas potensi ketersediaan bahan baku biochar di Indonesia sangatlah melimpah, dari limbah pertanian contohnya tempurung kelapa, sekam padi, kulit buah kakao, tempurung kelapa sawit, tongkol jagung, dan bahan lain yang sejenis, banyak tersedia. Diperoleh dari beberapa hasil penelitian bahwa:

1. Proporsi sekam padi adalah 16-28% dari jumlah gabah kering giling dengan produksi padi nasional mencapai 54,42 juta ton GKG pada tahun 2021.
2. Proporsi tempurung dari buah kelapa sebesar 15-19% dengan produksi kelapa nasional mencapai 2,85 juta ton pada 2021.
3. Proporsi tempurung kelapa sawit 6,4% dari produksi tandan buah segar (TBS).
4. Proporsi tongkol jagung 21% dari bobot tongkol kering dengan produksi jagung nasional sekitar 15,7 juta ton pada tahun 2021.

Dari sudut pandang lingkungan, produksi biochar sangatlah penting untuk pengelolaan limbah pertanian. Banyak petani

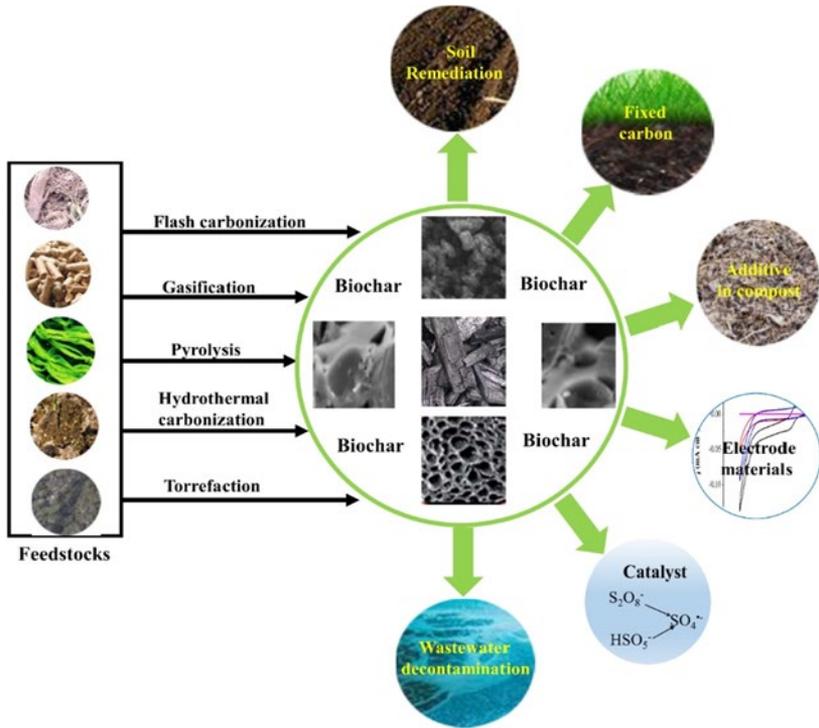
yang belum memanfaatkan limbah hasil pertanian (Gambar 1 dengan baik (Desnataliansyah, 2021).



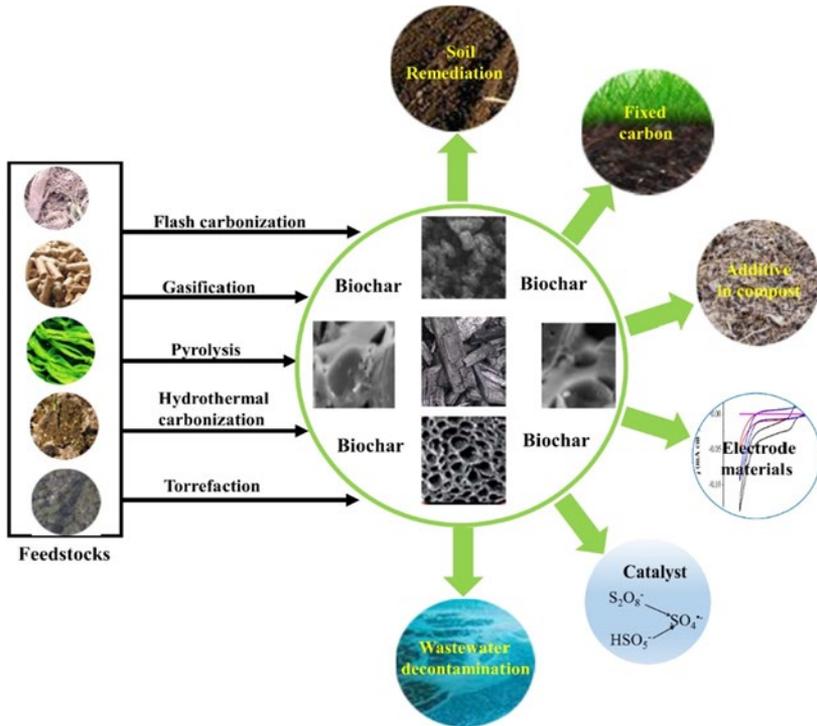
Gambar 1. Jenis-Jenis Residu Pertanian
(Rai et al., 2020)

2.3. Proses Produksi dan Modifikasi Biochar

Beragam metode digunakan untuk memproduksi biochar dari berbagai sumber biomassa, antara lain pirolisis, karbonisasi hidrotermal, gasifikasi, dan torrefaksi (



Gambar 2).



Gambar 2. Teknik Produksi dan Aplikasi Biochar (Wang & Wang, 2019)

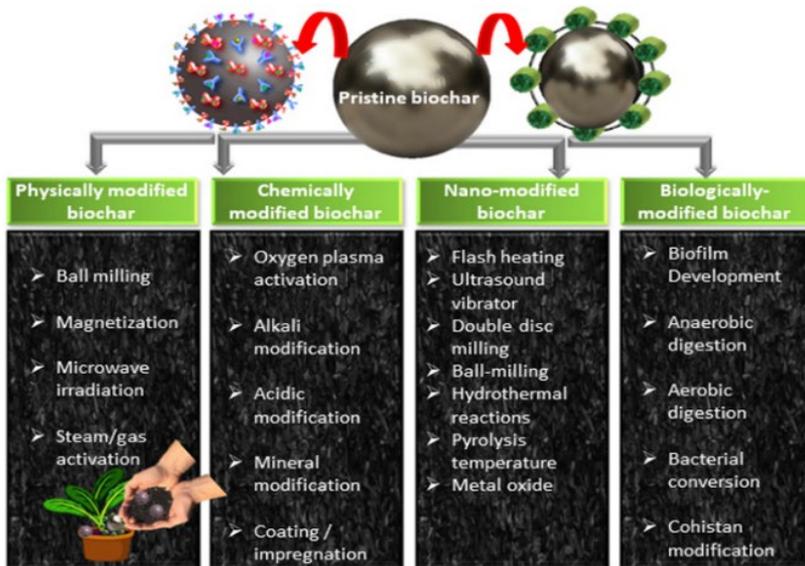
Diantara metode tersebut pirolisis adalah metode yang paling banyak digunakan karena relatif sederhana dan pengoperasian bervariasi pada berbagai skala. Biochar yang dihasilkan dapat diaplikasikan sebagai pembenah tanah atau *soil amendmen and remediation*, pengolahan air limbah, pengolahan gas buang, dan mitigasi perubahan iklim. **Pirolisis** berlangsung dalam kondisi bebas oksigen pada temperatur berkisar antara 300 hingga 1000 °C. Selama proses pirolisis, produk padat, cair dan gas

terbentuk. Produk padatan disebut biochar, produk cairan disebut bio-oil, dan produk gas disebut syngas yang biasanya mengandung karbon dioksida, hidrogen dan oksida nitrat. Pirolisis umumnya dibagi menjadi pirolisis cepat dan pirolisis lambat. Dibandingkan dengan pirolisis cepat, pirolisis lambat memiliki hasil biochar yang tinggi. Preparasi biochar dengan pirolisis lebih mudah dan murah, serta berkontribusi pada kelestarian lingkungan. **Gasifikasi** berlangsung melalui agen gasifikasi (udara, oksigen, uap dll.) untuk mengoksidasi sebagian bahan baku. Dibandingkan dengan proses pirolisis, gasifikasi membutuhkan temperatur tinggi (biasanya lebih tinggi dari 700 °C) dan sejumlah kecil oksigen dan uap. Mirip dengan proses pirolisis, selama proses gasifikasi, produk padat, cair dan gas terbentuk. Namun, hasil biochar melalui proses gasifikasi biasanya lebih rendah daripada melalui proses pirolisis karena produk yang ditargetkan dalam proses gasifikasi adalah produk gas. Pada **karbonisasi hidrotermal**, bahan baku dicampur dengan air (sebagai katalis) di dalam reaktor. Kemudian temperatur dan tekanan dinaikkan. Temperatur karbonisasi hidrotermal di bawah 300 °C. Biochar yang dihasilkan memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses pirolisis dan gasifikasi. **Flash carbonization** berarti bahwa bahan baku diubah menjadi

produk padat dan gas pada tekanan 1 - 2 Mpa dengan temperatur berkisar antara 300 hingga 600 °C, dan waktu tinggal sekitar 30 menit. *Torrefaction* dilakukan di bawah kondisi inert, dan bahan baku diubah menjadi produk padat hidrofobik, bersamaan dengan penghilangan kelembaban dan oksigen dalam bahan baku. Temperatur yang digunakan dalam proses ini berkisar antara 200 hingga 300 °C. Produk padat yang dihasilkan melalui proses *torrefaction* biasanya memiliki rasio oksigen terhadap karbon yang rendah. Penjelasan mengenai teknik sintesis secara lebih jauh telah kami bahas pada buku kami sebelumnya yakni biochar sebagai amandemen tanah dan mitigasi lingkungan.

Akhir-akhir ini banyak penelitian dilakukan dan dikembangkan yang bertujuan menyelidiki efek modifikasi produksi biochar untuk mendapatkan sifat tertentu dan di dalam buku ini khusus membahas modifikasi biochar untuk meningkatkan efisiensinya dalam rangka meningkatkan kualitas dan kinerja tanah untuk pertumbuhan dan produktivitas tanaman yang lebih baik dengan memainkan peran kunci sebagai media untuk menyediakan tempat perlekatan bagi ekosistem mikroba dan secara efektif meningkatkan sifat fisikokimia tanah dengan mengatur pH tanah, konduktivitas elektron (EC), kapasitas tukar kation (KTK), bahan organik,

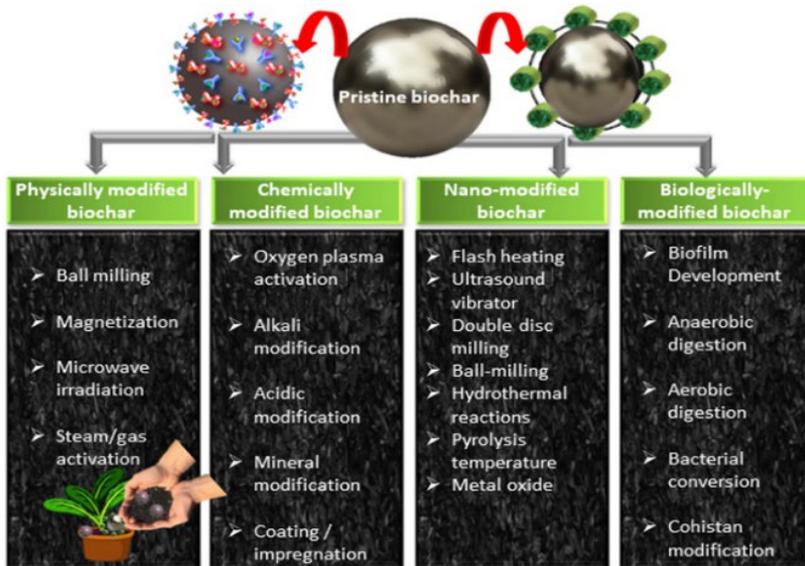
dan konduktansi hidrolis, porositas dan agregat tanah. Namun, sifat kimia dan fisik biochar termodifikasi sangat bergantung pada jenis pereaksi modifikasi, metode modifikasi, temperatur pirolisis, proses pirolisis, dan jenis bahan baku. Secara umum, sifat biochar ditentukan oleh struktur fisiknya dalam hal ini luas permukaan dan porositas. Perkembangan terbaru dalam memodifikasi BC dilakukan dengan menambahkan nanopartikel, gugus fungsi organik, reduktor, mineral, bio-material dan aktivasi dengan larutan alkali dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi atau penyerapan, secara singkat ditampilkan pada



Gambar 3. Hafeez et al. (2022) membagi modifikasi biochar ke dalam empat teknik, yaitu:

1. Modifikasi biochar secara fisika
2. Modifikasi biochar secara kimia
3. Modifikasi biochar secara biologi
4. Modifikasi biochar dengan nanoteknologi

Modifikasi biochar dengan menggunakan metode fisika merupakan pendekatan yang ramah lingkungan dan hemat biaya jika dibandingkan dengan modifikasi kimia. Modifikasi cara ini untuk meningkatkan sifat fisika-kimia biochar, termasuk permeabilitas dan porositas dengan langkah-langkah yang dapat dikontrol. Teknik yang digunakan untuk memodifikasi fisik biochar antara lain magnetisasi, *ball milling*, iradiasi gelombang mikro dan aktivasi uap/gas yang meningkatkan karakteristik biochar untuk meningkatkan kualitas tanah. Misalnya, dalam penggilingan bola (*ball milling*) biochar murni digiling menjadi bubuk kecil atau partikel nano. Dengan pengecilan ukuran biochar maka luas permukaannya meningkat, sehingga kapasitas adsorpsi juga meningkat (Hafeez et al., 2022).



Gambar 3. Penggambaran Berbagai Cara Modifikasi Biochar Untuk Meningkatkan Kualitas Tanah. (Hafeez et al., 2022)

Teknik *ball milling* dapat diklasifikasikan menjadi penggilingan bola kimia dan penggilingan bola fisik. Penggilingan bola kimia selain memodifikasi ukuran dan luar permukaan partikel, juga memodifikasi struktur mikropori dan gugus fungsi biochar menggunakan bahan kimia tertentu, sedangkan penggilingan bola fisik hanya memodifikasi luas permukaan dan ukuran partikel biochar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelimpahan relatif bakteri dan jamur seperti *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Chlorofexi*, *Mortierella*,

dan *Chaetomium* meningkat dengan penambahan *ball milling*-biochar berbahan baku jerami gandum dipirolisis 500 °C, yang mendorong degradasi *tetracycline* dan menciptakan kondisi lingkungan tanah yang lebih sehat untuk tanaman atau mikroba. Luas permukaan spesifik yang lebih besar, interaksi $-\pi$, interaksi hidrofobik, dan ikatan hidrogen merupakan penyebab adsorpsi dan degradasi *tetracycline* yang lebih baik oleh biochar *ball milling*. Penelitian ini menunjukkan bahwa *ball milling*-biochar selain mampu mengurangi emisi CO₂, NO₂, juga mampu mengelola kontaminan organik di tanah (Sun et al., 2022). Biochar magnetik yang disintesis dari penggilingan bola kimia (menggunakan prekursor magnetik: Fe₂O₃, FeSO₄.7H₂O, atau FeCl₃.6H₂O) dapat dengan mudah dipulihkan dengan bantuan medan magnet eksternal (Yi et al., 2020). Aktivitas katalitik dan muatan permukaan biochar meningkat dengan proses magnetisasi, yang dengan demikian menghasilkan remediasi lingkungan yang lebih baik. Teknik iradiasi gelombang mikro (*microwave irradiation*), dimana biochar dipanaskan hingga 200-300 °C dengan pemanasan gelombang mikro mencapai 2.500 MHz dan daya 400 – 600 watt dalam waktu singkat. Biochar yang dimodifikasi gelombang mikro menunjukkan luas permukaan dan kapasitas penyerapan yang lebih tinggi untuk banyak polutan dengan

gugus fungsi hidroliknya. Integrasi aktivasi uap (*steam*) dengan iradiasi gelombang mikro secara signifikan meningkatkan sifat fisikokimia biochar, termasuk kapasitas menahan air dan KTK. Aktivasi uap menginduksi porositas dan meningkatkan luas permukaan biochar dengan menghilangkan residu yang terperangkap di dalam struktur berpori biochar dengan pembakaran parsial (Lee et al., 2020). Dapat disimpulkan bahwa modifikasi fisik biochar melalui ball milling meningkatkan luas permukaan, kapasitas adsorpsi dan struktur mikropori biochar, sedangkan modifikasi iradiasi gelombang mikro meningkatkan luas permukaan dan kapasitas penyerapan untuk banyak polutan, dan aktivasi uap penting untuk meningkatkan porositas biochar, luas permukaan, sifat fisiokimia dan kapasitas adsorpsi untuk gas yang berbeda dibandingkan dengan biochar murni (Hafeez et al., 2022).

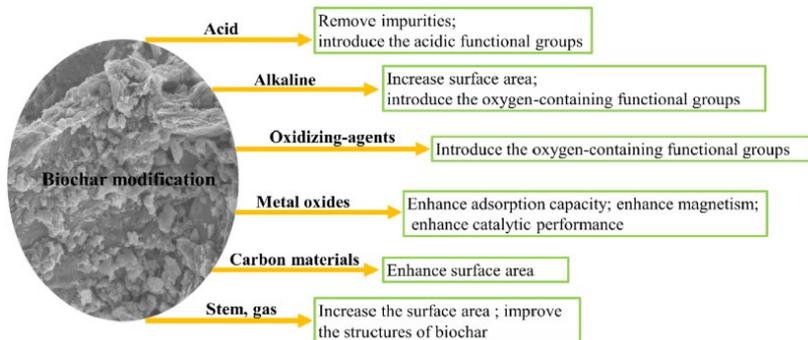
Modifikasi biochar menggunakan metode kimia dilakukan dengan mereaksikan biochar dengan pupuk mineral atau bahan kimia tertentu untuk meningkatkan efisiensi kinerja biochar pada aplikasi tertentu dengan cara meningkatkan sifat fisikokimianya. Beberapa teknik modifikasi secara kimia diantaranya *oxygen plasma activation*, impregnasi (*coating*), *mineral coating*, dan modifikasi dengan asam/basa. Biochar

yang dimodifikasi dengan asam (biasanya menggunakan H_2SO_4 , HCl , HNO_3 , H_3PO_4) mengandung banyak oksigen yang terkandung di dalam gugus fungsi, namun ketika biochar yang dimodifikasi dengan basa (misal $NaOH$, KOH) mengandung lebih banyak karbon. Sebagai tambahan, jika biochar dimodifikasi dengan agen pengoksidasi (seperti $KMnO_4$ dan $Fe(III)$) secara signifikan meningkatkan ukuran pori dan luas permukaan spesifik biochar. Pada *oxygen plasma activation* aliran gas oksigen yang melalui ruang plasma bertekanan tertentu mengubah plasma menjadi ion oksigen, atom tereksitasi, elektron dan banyak spesies oksigen reaktif bereaksi dengan gugus fungsi biochar sehingga menghasilkan biochar yang lebih aktif (Gupta et al., 2015). Modifikasi kimia selanjutnya adalah mengimpregnasi atau melapisi (*coating*) biochar dengan logam nanopartikel tertentu sehingga membentuk nanokomposit. Teknik ini akan menghasilkan peningkatan jumlah gugus fungsi, luas permukaan, porositas dan KTK. Teknik impregnasi dapat dicapai melalui pretreatment (perlakuan awal) bahan baku biomassa menggunakan garam logam, menyangga biochar dengan nanopartikel atau membentuk komposit dengan nanopartikel oksida logam (Islam et al., 2021). Biochar yang dimodifikasi dengan nanopartikel memiliki karakteristik yang unik seperti,

luas permukaan yang tinggi, beragam gugus fungsi yang menjadikan biocar memiliki afinitas yang tinggi untuk berbagai polutan (Tan et al., 2016). Kekurangan nanopartikel adalah ketidakstabilannya, namun dapat diatasi dengan mengimobilisasi nanopartikel ke dalam matrik biochar. Kesimpulannya bahwa komposit biochar-nanopartikel dapat menciptakan porositas yang tinggi, luas permukaan yang tinggi dan beragam gugus fungsi, stabilitas panas yang baik dan sangat cocok diaplikasikan pada penghilangan kontaminan polutan (Islam et al., 2021).

Modifikasi biochar dengan cara biologi dapat dicapai melalui perlakuan awal bahan baku biomassa dengan bakteri atau pengolahan anaerobik, dan mengembangkan biofilm pada permukaan eksternal atau internal biochar. Pengolahan limbah biomassa melalui bakteri anaerobik atau aerobik menghasilkan nilai ekonomi dengan memproduksi biofuel dan pupuk hayati (*biofertilizers*). Biochar yang dihasilkan dari residu pengolahan pirolisis (setelah pengolahan anaerobik) telah terbukti sangat efisien untuk menghilangkan logam berat dan pewarna kationik karena luas permukaannya yang lebih tinggi, kapasitas pertukaran anion yang tinggi, dan hidrofobisitas (Wang et al., 2017). Mikroorganisme dapat meningkatkan kinerja biochar

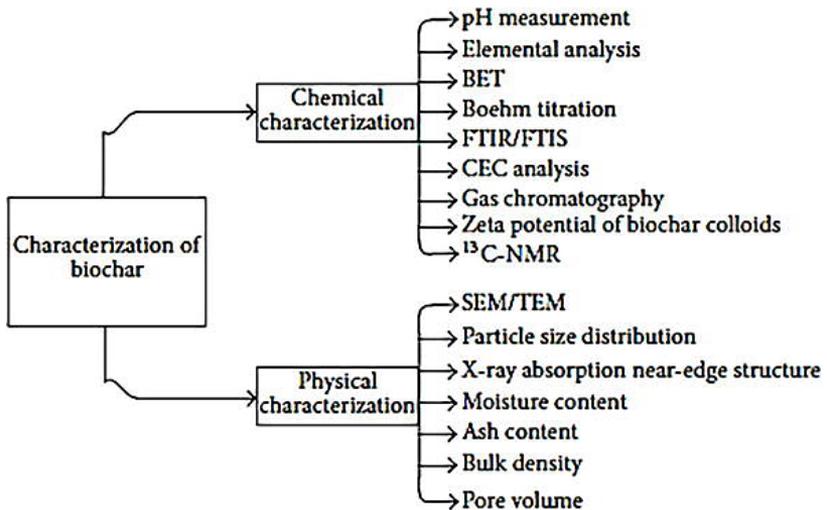
dalam penyisihan polutan dengan mengembangkan biofilm. Biochar yang dimodifikasi secara biologis melalui biofilm cukup menjanjikan untuk menghilangkan polutan obat-obatan dan polutan lainnya melalui proses imobilisasi dan biotransformasi (Li et al., 2020). Jadi biochar yang dimodifikasi secara biologis dapat meningkatkan hidrofobisitas, KTK, luas permukaan, gugus fungsi yang mengandung oksigen, komponen mineral, alkalinitas dan menurunkan rasio C/N biochar. Jenis biochar ini sesuai digunakan untuk mengatasi pencemaran logam berat dan polutan lain dari tanah (Hafeez et al., 2022). Beberapa modifikasi biochar dan pengaruhnya pada karakteristik biochar terangkum pada Gambar 4.



Gambar 4. Teknik Modifikasi Biochar Dan Perubahan Karakteristik Biochar (Wang & Wang, 2019)

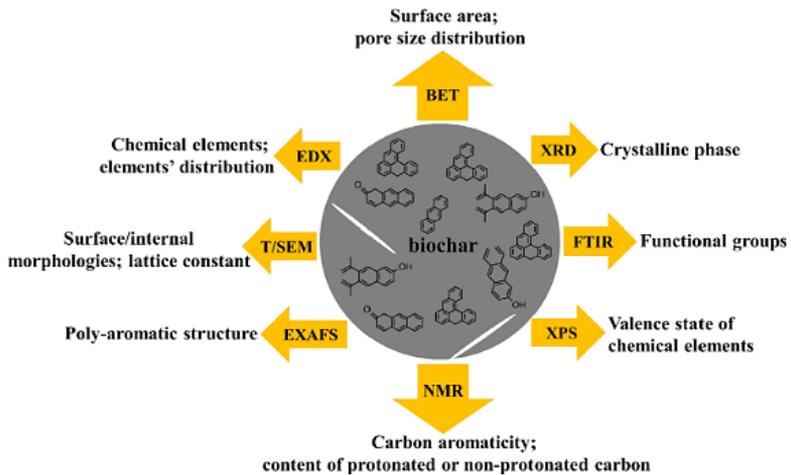
2.4. Karakterisasi Biochar

Karakter atau sifat biochar yang dihasilkan tergantung pada komposisi, jenis biomassa dan kondisi saat dikarbonisasi. Karakterisasi fisikokimia diperlukan untuk mengidentifikasi sifat dasar biochar dan memprediksi berbagai aplikasi yang dapat diterapkan. Sifat utama biochar terletak pada luas permukaan, morfologi, muatan permukaan, gugus fungsi dan komposisi kimia. Gambar 5 di bawah ini menampilkan sifat fisikokimia biochar.



Gambar 5. Karakterisasi Fisikokimia Biochar
(Armah et al., 2022)

Dari sudut pandang tinjauan umum, teknik analisis yang umum diterapkan pada biochar diantaranya *nitrogen adsorption isotherms using BET*, *X-ray diffraction (XRD)*, *Fourier transform infrared spectrometry (FTIR)*, *X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)*, *scanning electron microscopy (SEM)*, *transmission electron microscopy (TEM)*, *X-ray spectroscopy (EDS)*, *scanning transmission electron microscopy (STEM)*, *X-ray adsorption spectroscopy (EXAFS)* dan *solid state nuclear magnetic resonance (NMR)*. Secara singkat teknik karakterisasi biochar disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Teknik Karakterisasi Biochar (Wang & Wang, 2019)

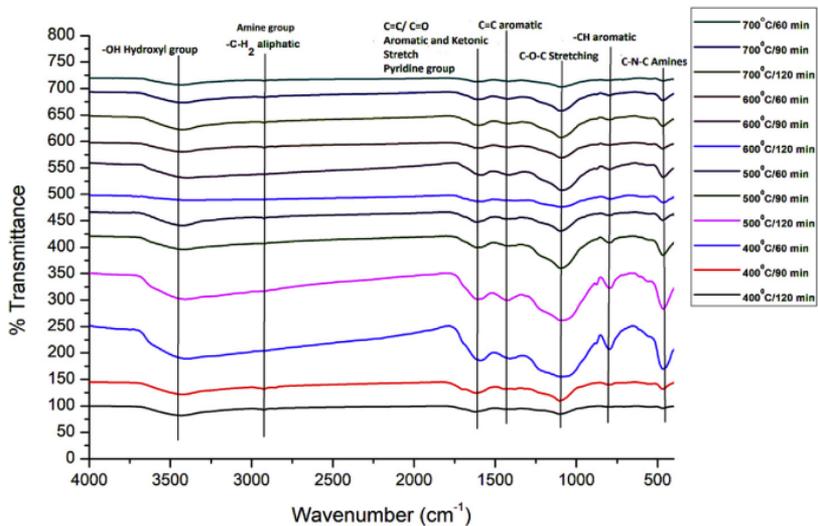
Tujuan utama analisis karakter atau sifat biochar adalah untuk membedakan biochar dari bahan organik dan bentuk lain dari karbon hitam yang dihasilkan. Biochar yang dihasilkan dari berbagai biomassa yang memiliki sifat fisika dan kimia yang berbeda akan menghasilkan biochar dengan sifat yang berbeda. Sifat masing-masing biomassa ini penting selama proses konversi termal, oleh karena itu diperlukan juga analisis proksimat (kadar abu dan kadar air), nilai kalori, fraksi karbon tetap, komponen yang mudah menguap, fraksi lignin, selulosa, dan hemiselulosa, zat anorganik, kepadatan atau densitas, ukuran partikel dan kadar air.

Komposisi kimia bahan baku biomassa perlu dianalisis untuk memperoleh karakteristik dasar fisikokimia biochar. Produksi biochar umumnya dinilai berdasarkan perubahan konsentrasi unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), sulfur (S) dan nitrogen (N), serta rasio kedua unsur terkait. Karbon tetap (*fixed carbon*) adalah residu padat yang tersisa setelah ukuran partikel dikarbonisasi dan penghilangan zat yang mudah menguap. Rasio H/C dan O/C digunakan untuk menentukan derajat aromatisitas dan maturasi, sedangkan rasio unsur O/C, O/H dan C/H digunakan untuk memberikan ukuran keandalan dari tingkat pirolisis dan tingkat penyesuaian oksidatif dari

biochar. H/C yang rendah menunjukkan kandungan aromatik dan C yang tinggi dari biochar yang dihasilkan. Terlepas dari temperatur pirolisis, luas permukaan area BET meningkat dengan peningkatan pembakaran karbon, hal ini menunjukkan bahwa pembakaran karbon memiliki peran penting dalam meningkatkan volume pori dan luas permukaan, sementara itu ukuran pori rata-rata meningkat dengan semakin lamanya waktu tinggal dan temperatur pirolisis.

FTIR digunakan untuk menganalisis komposisi kimia dan gugus fungsi yang terikat pada permukaan biochar. Salah satu penggunaan analisis ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh temperatur pirolisis dan waktu tinggal pirolisis terhadap gugus fungsi yang terbentuk pada pembuatan biochar dari jerami padi oleh Chandra & Bhattacharya (2019). Pada penelitian tersebut, temperatur pirolisis divariasikan 400 °C, 500 °C, 600 °C, dan 700 °C, serta masing-masing temperatur dipirolisis dengan tiga waktu tinggal pemanasan berbeda, yaitu 60, 90, dan 120 menit. Hasil analisa menunjukkan bahwa, secara keseluruhan peningkatan suhu dari 400 hingga 700 °C menyebabkan hilangnya gugus fungsi asam, hilangnya gugus eter, penguapan konstituan anorganik, peningkatan karbon aromatik (C=C) dan turunannya akibat dari

pirolisis selulosa. Namun, jika dilihat pada setiap kenaikan suhu, saat peningkatan suhu lebih lanjut dari 600 ke 700 °C terjadi pengurangan unsur basa, yakni gugus hidroksi (-OH). Gugus fungsi asam dan unsur basa ini akan berpengaruh terhadap pH biochar. Hasil FTIR penelitian tersebut disajikan pada Gambar 7. Dengan demikian, spektrum FTIR menunjukkan bahwa kenaikan suhu pirolisis mengurangi gugus fungsi teroksigenasi pada biochar dari jerami padi. Namun, waktu tinggal pirolisis memiliki efek yang tidak signifikan pada fungsionalisasi biochar dari jerami padi tersebut.

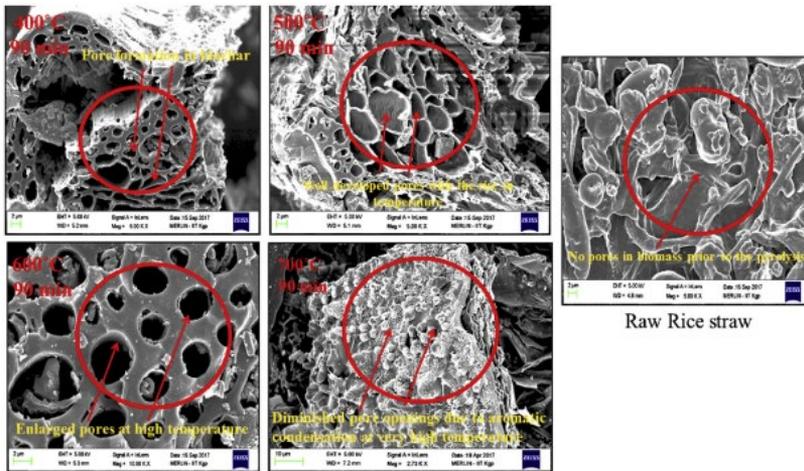


Gambar 7. Spektra FTIR Biochar Dari Jerami Padi Yang Diproduksi Pada Berbagai Temperatur Dan Waktu Pirolisis (Chandra & Bhattacharya, 2019)

Luas permukaan biochar berhubungan dengan kemampuannya dalam menyerap polutan. Pada umumnya luas permukaan biochar meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pirolisis, karena lebih banyak zat volatil yang menguap dan hilangnya senyawa organik, sehingga lebih banyak pori-pori yang terbuka. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Salam et al. (2022) luas permukaan BET biochar yang diamati berkisar antara $6,96 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ pada biochar dari residu *reapeseed* saat dipirolisis pada temperatur $300 \text{ }^\circ\text{C}$ dan meningkat menjadi $18,35 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ saat temperatur pirolisis dinaikkan menjadi $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Hal yang sama terjadi dengan biochar dari jerami padi, dimana saat pirolisis dilakukan pada temperatur $300 \text{ }^\circ\text{C}$ luas permukaan BET sekitar $8,13 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ dan meningkat menjadi $32,51 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ pada temperatur pirolisis $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Peningkatan luas permukaan biochar mungkin juga merupakan hasil dari peningkatan struktur mikropori dan penghilangan gugus fungsi yang mengandung H dan O saat pirolisis pada temperatur tinggi.

Analisis SEM digunakan untuk mengamati morfologi biochar. Hasil citra SEM menunjukkan bahwa biochar yang dihasilkan pada temperatur pirolisis yang berbeda memiliki tampilan struktur sarang lebah yang jelas dan dapat dibedakan,

karena struktur tubular asli yang ada dalam bahan sel tumbuhan, namun pada temperatur tinggi tertentu ukuran pori makro sedikit berkurang akibat terjadinya pengendapan struktur aromatik yang terkondensasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Pori-pori yang berkembang dengan baik memiliki dampak langsung pada luas permukaan yang tinggi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biochar yang diproduksi pada temperatur yang lebih rendah cocok digunakan untuk mengatur nutrisi pupuk dan menyerap polutan dari tanah. Temperatur yang lebih tinggi menyebabkan bahan analog dengan karbon aktif dan remediasi lingkungan. Secara umum, dapat dikatakan bahwa, pada limbah biomassa yang mengandung lignin dan kandungan zat volatil yang tinggi, maka pembentukan pori dalam biochar akan terpengaruh secara langsung dengan temperatur proses (Armah et al., 2022).



Gambar 8. Hasil Citra SEM Produksi Biochar dari Jerami Padi Pada Temperatur Berbeda (Chandra & Bhattacharya, 2019)

2.5. Aplikasi

Penggunaan biochar semakin meningkat karena potensinya dalam mengurangi dampak negatif bahan organik dalam hal ini biomassa terhadap lingkungan. Sebagaimana telah dibahas pada sub-bab sebelumnya bahwa sifat fisikokimia biocharlah yang mengatur aplikasi bahan ini. Tergantung dari jenis bahan baku, teknologi produksi dan kondisi proses, maka kualitas, hasil dan toksisitas biochar yang dihasilkan berbeda. Aplikasi biochar pada bidang pertanian dan hortikultura seperti: pengkondisian tanah, meningkatkan serapan unsur hara, mengurangi pencucian hara, menambah daya tampung air,

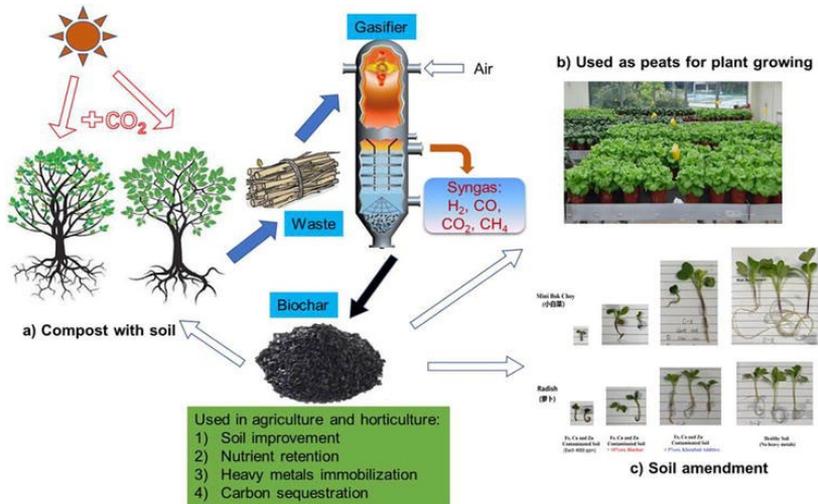
mengurangi cucian hara dan degradasi kesehatan tanah, meningkatkan KTK, meningkatkan biomassa dan kelimpahan mikro organisme, menetralkan pH tanah, kompos aditif, penyerapan karbon, dan lain-lain dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Aplikasi Biochar Pada Bidang Pertanian (Das et al., 2020)

Pada aplikasi ini biochar mendukung peningkatan produktivitas tanaman, ketersediaan air tanah, pengomposan biochar, dan efisiensi penggunaan nutrisi. Gambar 10 menunjukkan aplikasi biochar dan bagaimana biochar berkontribusi pada sirkulasi

ekonomi melalui penggunaannya dalam pertanian dan hortikultura. Selain itu, biochar juga menunjukkan potensi yang besar untuk berkontribusi pada keberlanjutan ekonomi sistem produksi bioenergi dari selulosa.

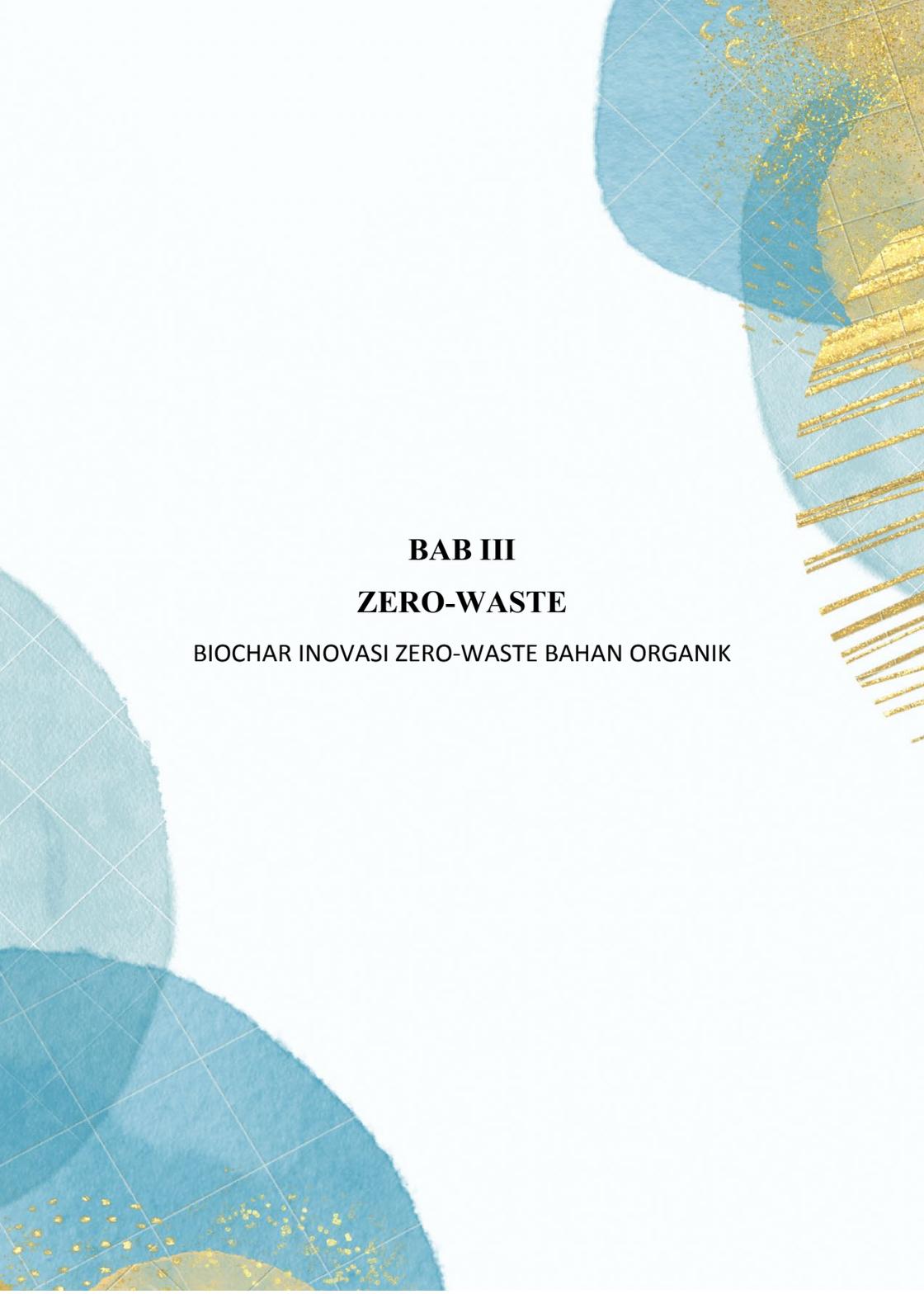


Gambar 10. Penggunaan Biochar Dalam Pertanian Dan Hortikultura, Serta Kontribusinya Terhadap Sirkulasi Ekonomi (Hu et al., 2021)

Aplikasi biochar sebagai amandemen tanah yang digunakan untuk manajemen lingkungan yang berkelanjutan atau *sustainable environmental* merupakan katalis dalam menghadapi antusiasme global terkait upaya mengatasi permasalahan di sektor ekologi dan agronomi. Biochar bersifat rekalsitran karena mengandung karbon aromatik, sehingga sulit didekomposisi oleh mikroba dibandingkan dengan bahan organik yang tidak diproses. Dengan sifatnya yang mampu bertahan di dalam tanah hingga ribuan tahun maka keberadaan biochar dapat membantu meningkatkan stok karbon tanah. Saat ini aplikasi biochar yang sangat potensial adalah sebagai alat untuk meremediasi tanah tercemar logam berat. Disamping itu dengan luas permukaan yang lebih besar dan struktur yang berpori, keberadaan biochar di dalam tanah mampu mengurangi pencucian hara mineral, meningkatkan ketersediaan hara tanaman, mengurangi toksisitas logam aluminium dan besi, meningkatkan kualitas air limpasan, mengurangi bioavailabilitas (ketersediaan hayati) logam berat, dan menurunkan emisi gas rumah kaca (GHG) seperti nitrogen oksida, karbon monoksida, karbon dioksida, dan metana. Aplikasi lainnya termasuk pengolahan dan penggunaan kembali air limbah, *controlled-release fertilizers*, dan berbagai aplikasi ini secara ringkas disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Multifungsi Biochar Untuk Manajemen Lingkungan Dan Penghilangan Polutan (Das et al., 2020)



BAB III
ZERO-WASTE

BIOCHAR INOVASI ZERO-WASTE BAHAN ORGANIK

BAB III. ZERO-WASTE

Indonesia adalah negara agraris. Hasil pertanian menjadi sumber kehidupan sebagian besar penduduknya, sehingga sektor pertanian menjadi sektor yang berpengaruh dalam kesejahteraan masyarakat di Indonesia. Sektor pertanian ini termasuk pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan dan perikanan. Sayangnya sektor pertanian ini juga menghasilkan emisi GHG. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2021) sebesar 6% emisi GHG nasional disumbang oleh sektor pertanian. Penanam padi, penggunaan pupuk, pengelolaan tanah, pengelolaan kotoran hewan, dan hasil fermentasi eterik proses pencernaan hewan, serta proses pembakaran dan fermentasi residu tanaman pertanian merupakan kegiatan yang menghasilkan GHG. Peningkatan GHG merupakan sumber utama penyebab perubahan iklim dan pemanasan global atau peristiwa meningkatnya temperatur bumi. Sektor pertanian khususnya pertanian untuk pangan, rentan terhadap perubahan iklim. Hal ini dikarenakan pertanian untuk pangan adalah tanaman musiman, sehingga sensitif dengan adanya kekurangan dan kelebihan air. Sifat sensitif ini berhubungan dengan metode tata kelola lahan dan sifat tanah, pola penanaman, pemanfaatan teknologi kelola tanah, pengairan, dan jenis tanaman yang digunakan.

Limbah pertanian adalah bahan yang diperoleh dari sisa produksi tanaman atau dari pertumbuhan tanaman. Hampir seluruh limbah pertanian merupakan bahan organik. Jumlah limbah pertanian di Indonesia sangat melimpah, contohnya limbah jerami padi mencapai sekitar 816 juta ton, sekam padi sekitar 10,8 juta ton di tahun 2021, sabut kelapa berkisar 0,85 juta ton, tempurung kelapa sekitar 0,34 juta ton di tahun 2021 dan masih banyak lainnya. Namun, hanya sekitar sepuluh persen limbah pertanian yang dimanfaatkan kembali dan sisanya sering menjadi masalah dalam usaha pertanian itu sendiri maupun pada kehidupan sehari-hari, misalnya memicu datangnya hama dan penyakit tanaman. Penanganan limbah biomassa secara konvensional seperti membakar biomassa menimbulkan GHG, dan tidak efektif. Pemanfaatan limbah biomassa seperti daun sebagai penutup lahan, sering kali tidak sesuai karena sulit diatur ketebalannya dan kelembabannya (Desnataiansyah, 2022). Kedua metode pengolahan konvensional tersebut tidak signifikan mengurangi jumlah limbah biomassa, oleh sebab itu perlu dicari alternatif lain yang secara efektif memberikan nilai tambah biomassa sekaligus memberikan solusi terhadap perubahan iklim dunia.

Permasalahan di atas dapat diatasi dengan menerapkan ide-ide dan filosofi inovatif seperti *zero-waste* dan ekonomi sirkular, dimana setiap manusia harus menjaga sumber daya agar dapat dipakai selama mungkin, menggali nilai maksimum, memulihkan dan meregenerasi produk dan bahan di setiap akhir umur layanannya. Biochar merupakan solusi efektif dan efisien untuk mengatasi permasalahan tersebut, selain itu produksi biochar merupakan wujud dari *zero-waste* bahan biomassa atau organik, karena memberikan prinsip untuk terus berupaya menghilangkan GHG dan mengurangi jejak karbon.

3.1. Zero-waste

Istilah *zero-waste* pertama kali diterapkan untuk memulihkan bahan kimia di tahun 1973 oleh Dr. Paul Palmer. Saat ini pendekatan *zero-waste* menjadi salah satu konsep dalam pengelolaan sampah. Jadi, apa itu *zero-waste*? *Zero-waste* didefinisikan sebagai sebuah sistem untuk merancang dan mengelola semua sumber daya konservasi melalui produksi yang bertanggung jawab, konsumsi, penggunaan kembali, dan pemulihan semua produk, pengemasan, dan bahan, tanpa membakarnya, dan tanpa membuangnya ke tanah, air, atau udara yang mengancam lingkungan atau kesehatan manusia.

Zero-waste berfokus pada pencegahan limbah melalui desain berkelanjutan dan praktek konsumsi.

Sebagai paradigma keberlanjutan yang baru, *zero-waste* menantang paradigma umum tentang limbah sebagai produk sampingan yang tidak bernilai dan tidak dapat dihindari yang diciptakan pada akhir fase hidup produk. Sebaliknya, *zero-waste* meyakinkan semua orang bahwa limbah adalah “sumber daya yang salah alokasi” atau “sumber daya dalam transisi”; diproduksi selama fase antara kegiatan produksi dan konsumsi. Limbah harus disirkulasikan kembali ke proses produksi dan konsumsi. Oleh karena itu, *zero-waste* berarti **tidak ada “sampah”** yang terbuang di bawah sistem ekonomi sirkular.

Zero-waste tidak berarti bahwa kita tidak akan menciptakan “limbah” apa pun dalam transisi ekstraksi sumber daya, produksi, dan konsumsi. Sebaliknya, *zero waste* berarti tidak ada "sampah" yang akan terbuang di bawah sistem ekonomi sirkular. *Zero-waste* adalah visi, target, dan aspirasi untuk maju menuju pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Prinsip dasar dari *zero-waste* adalah mempertahankan nilai produk daripada menghabiskan nilai sumber daya. Terlepas dari potensinya, tujuan *zero-waste* adalah merancang dan mengelola pembuatan dan konsumsi produk dengan cara meminimalkan

limbah dan memulihkan sumber daya sebanyak mungkin sambil menjaga zat beracun keluar dari lingkungan, dan hal ini tidak dapat dicapai tanpa pengelolaan global yang bertanggung jawab dan peran aktif masyarakat. *Zero-waste* membutuhkan kesadaran lingkungan dan komitmen jangka panjang, partisipasi aktif dari semua pemangku kepentingan terkait termasuk produsen, konsumen, dan pemerintah (Zaman, 2022). Penggambaran konsep *zero-waste* disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Konsep Pengelolaan *Zero-waste* Berkelanjutan (Awasthi et al., 2021)

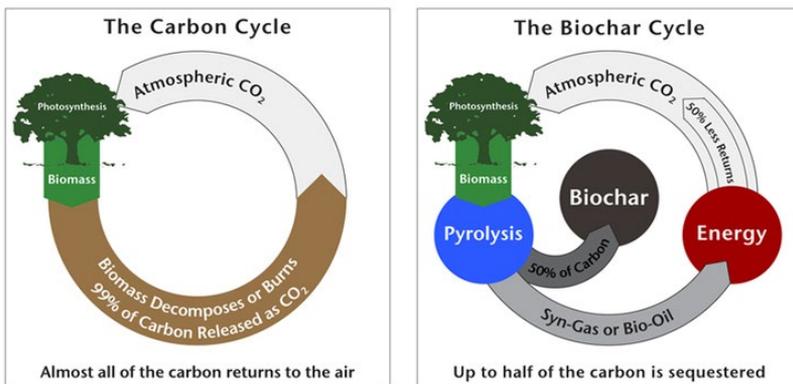
3.2. Inovasi *Zero-waste* Dengan Biochar

Kelemahan peningkatan stok karbon berbasis bahan organik di dalam tanah menggunakan metode konvensional, seperti penggunaan pupuk kandang, kompos, konversi

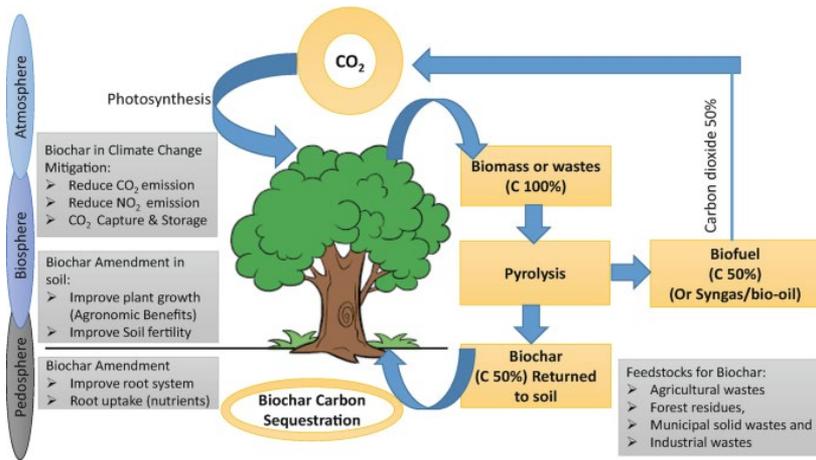
monokultur ke polikultur, penutup tanaman, mulsa dan lain sebagainya adalah tingkat karbon turun lagi dengan cepat, setelah pengelolaan tidak lagi dipertahankan. Hanya sepertiga dari residu yang tersisa di tanah setelah 1 tahun dan hanya 10 hingga 20% yang tersisa setelah 2 tahun. Selain itu, metode konvensional ini dapat meningkatkan emisi nitro oksida dan metana secara substansial (NO_x dan CH_4 , keduanya merupakan GHG yang kuat). Berbeda dengan biochar menerapkan prinsip untuk terus berupaya menghilangkan GHG dan mengurangi jejak karbon dengan menggunakan integrasi proses. Biochar mampu menyimpan carbon dari CO_2 diatmosfer dalam jangka waktu yang panjang, hingga ratusan bahkan ribuan tahun, karena biochar sulit terdegradasi. Perbedaan metode konvensional dan inovatif biochar untuk mengelola stok karbon disajikan pada Gambar 13.

Integrasi proses teknologi biochar dijelaskan sebagai berikut: limbah organik sisa aktivitas pertanian, perhutanan, industri, maupun kegiatan manusia diproses secara termal tanpa ataupun dengan minim oksigen (pirolisis) menghasilkan produk padatan (biochar) sebesar 50%, dan sisanya produk cair (bio-oil) dan gas (syngas) sebesar 50%. Biochar atau arang hayati tersebut memiliki kestabilan tinggi hingga ribuan tahun,

selanjutnya diaplikasikan kembali ke tanah sebagai pembenah tanah, juga sebagai penyimpan karbon dan dapat meningkatkan produktifitas pertanian. Produk samping (bio oil dan syngas) dapat digunakan sebagai sumber energi dan melepas NO_x , CO_2 ke atmosfer. Melalui kegiatan fotosintesis dan asimilasi tanaman, CO_2 dan NO_x (dari berbagai sumber kegiatan) di atmosfer dikonsumsi oleh tanaman, dan setelah tanaman dipanen, residu organik diolah kembali menjadi biochar. Keseluruhan proses integrasi ini disebut *biochar carbon sequestration* (Gambar 14). Melalui sistem ini jumlah GHG di atmosfer dapat dikurangi, dan juga mengurangi pelepasan GHG ke atmosfer.



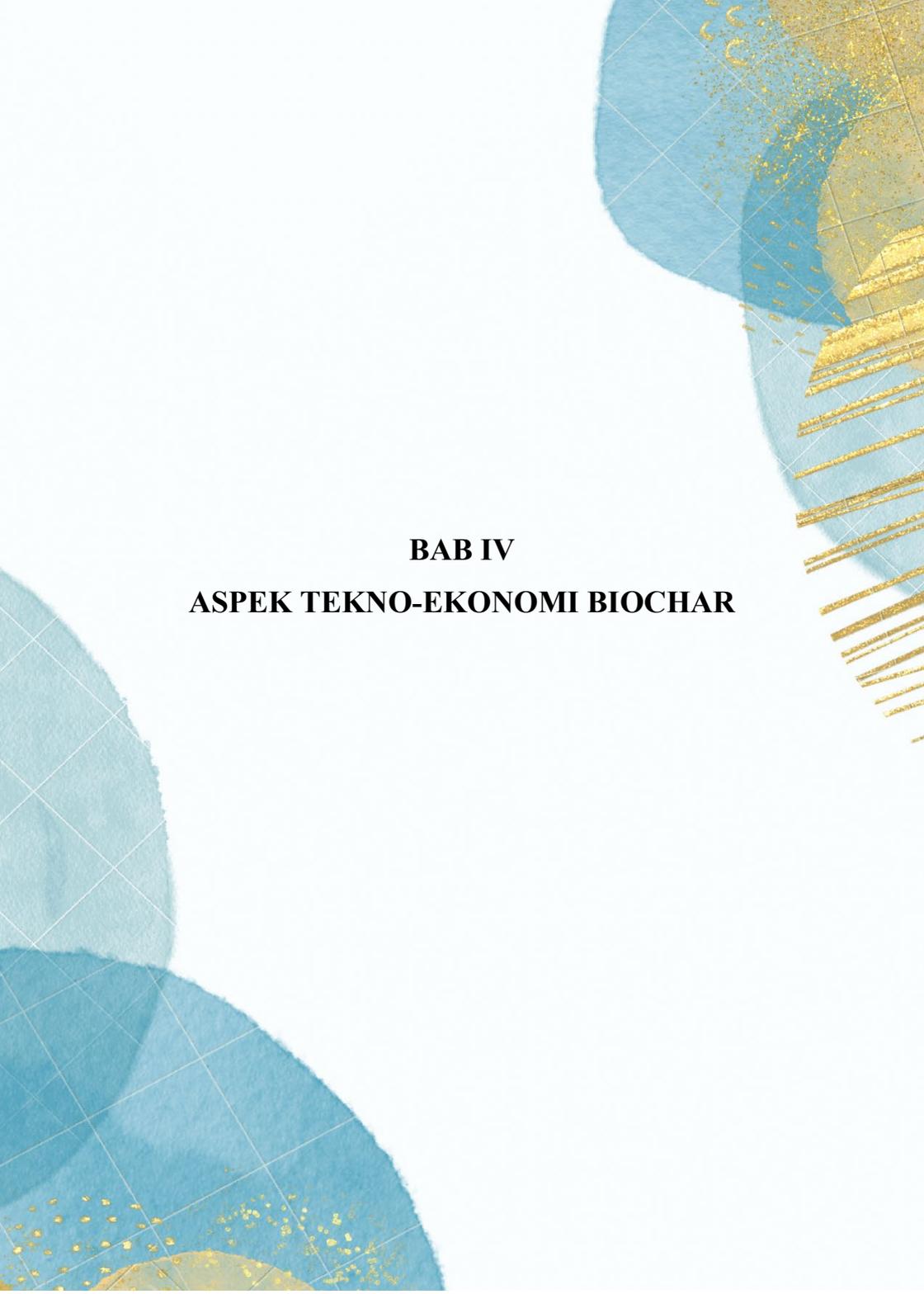
Gambar 13. Perbedaan Pengelolaan Karbon Pada Metode Konvensional dan Inovatif Biochar (Biochar, 2011)



Gambar 14. Biochar Carbon Sequestration
(Sri Shalini et al., 2022)

Dapat disimpulkan bahwa biochar merupakan teknik dan proses inovatif pada sistem zero-waste, yang mampu mereduksi GHG pada masa kini, sekaligus mengurangi GHG yang sudah terakumulasi sejak dulu, biochar juga merupakan solusi sekaligus inovasi pengolahan residu pertanian yang sebagian besar belum dimanfaatkan. Dan tak kalah penting biochar mendukung upaya membangun ketahanan pangan Indonesia yang terimplementasi pada kegiatan CSA berupa pengelolaan air, pengelolaan tanah, dan pengelolaan residu tanaman.

Terlepas dari efek positif atau manfaat dari biochar sebagai produk inovatif yang sudah dibahas sebelumnya seperti, sebagai amandemen tanah, mitigasi GHG, material adsorben, prekursor katalis, bahan bakar alternatif, ternyata beberapa penelitian menggambarkan dampak atau efek negatif biochar, misalnya menyebabkan pencucian nitrat dalam kondisi tanah tertentu. Untuk memfasilitasi kedua perbedaan ini dan sekaligus mengungkap karakteristik umum dari sistem produksi biochar maka digunakan LCA, diharapkan kedepannya dapat dilakukan Penilaian Daur Hidup atau *Life Cycle Assessment* (LCA) biochar yang secara umum merupakan pendekatan untuk mengukur dampak lingkungan yang diakibatkan oleh produk atau aktivitas mulai dari pengambilan bahan mentah/baku, diikuti proses produksi dan penggunaan, dan berakhir pada pengelolaan sampah/ limbah.



BAB IV
ASPEK TEKNO-EKONOMI BIOCHAR

BAB IV. ASPEK TEKNO-EKONOMI BIOCHAR

Bioekonomi yang diaplikasikan biomassa pertanian dan perkebunan dapat mengurangi pembakaran terbuka, memfasilitasi pemulihan nutrisi yang meningkatkan kesehatan tanah, dan mendorong pertumbuhan ekonomi. Meskipun demikian, produksi biochar belum menjadi usaha bisnis yang sangat menguntungkan, sebagian karena tingginya biaya tetap dan variabel. Permintaan pasar yang rendah tidak mencukupi untuk pemulihan biaya, sehingga menciptakan ketidakmampuan mendapatkan nilai manfaat lingkungan. Biochar telah diadopsi di daerah pedesaan Asia dan Eropa tetapi sebagian besar rumah tangga menggunakan biochar sebagai pengganti arang. Seringkali, manfaat penggunaan biochar pada aplikasi energi melebihi penggunaan amandemen tanah karena jangka waktu untuk pengembalian modal sebagai pengganti arang lebih cepat dibandingkan sebagai amandemen tanah. Sebagian besar petani di seluruh dunia tidak menyadari atau skeptis tentang manfaat ekonomi (keuntungan/laba) dari biochar, meskipun ada beberapa permintaan komersial.

Untuk menunjukkan nilai ekonomi biochar, kami menggunakan hasil analisis tekno-ekonomi yang dilakukan oleh Widiastuti (2016). Residu pertanian di Desa Rawasari

Distrik Malind yaitu sekam padi yang diproduksi menjadi biochar menggunakan alat pirolisis sederhana berupa kiln drum. Alat dioperasikan selama 317 hari dengan kapasitas 450 kg/hari biochar. Dalam analisisnya digunakan rasio manfaat dan biaya (BCR) dan pendekatan produktivitas untuk mengetahui rasio manfaat terhadap biaya pembuatan biochar dari limbah sekam padi. Rasio manfaat dan biaya menitikberatkan pada efisiensi faktor produksi tanpa mempertimbangkan distribusi, stabilisasi ekonomi dan sebagainya. BCR umumnya digunakan untuk mengukur keberhasilan sebuah proyek, dilihat dari biaya dan manfaat baik yang bersifat *tangible* maupun *intangible*. Dalam sebuah proyek pertanian, analisis ini dapat memberikan gambaran apakah sebuah usaha dengan berbagai perlakuan mampu memberikan keuntungan atau tidak. Oleh karena manfaat pada umumnya diukur dengan cara mengalikan jumlah barang yang dihasilkan dengan perkiraan harga barang. Biaya yang diperhitungkan adalah semua biaya yang langsung digunakan usaha tersebut berdasarkan harga pembeliannya. Oleh sebab itu pengukuran biaya manfaat secara riil dapat menghasilkan pengukuran keberhasilan sebuah usaha/proyek.

Analisis manfaat dan biaya merupakan rasio antara Manfaat yang diperoleh sehubungan dengan suatu usaha

(Rupiah/Rp) dibandingkan dengan Biaya yang dikeluarkan sehubungan dengan suatu usaha, terdiri dari biaya tetap dan tidak tetap (Rupiah/Rp).

$$BCR = \frac{\text{Total Manfaat}}{\text{Total Biaya}}$$

Untuk menentukan kriteria kelayakan analisis manfaat dan biaya digunakan standar:

- $BCR > 1$ maka usaha layak dilaksanakan.
- $BCR = 1$ dari segi aspek finansial dan ekonomis, maka usaha/bisnis tidak perlu dipertimbangkan untuk dilaksanakan, tetapi dari segi sosial, usaha/bisnis dapat dipertimbangkan untuk dilaksanakan.
- $BCR < 1$ maka usaha tidak layak dilaksanakan.

Total biaya produksi disajikan secara terinci pada Tabel 3. Biaya-biaya tersebut disusun berdasarkan hasil survei lapangan pada daerah dan tahun terkait, dan nilainya dapat berbeda-beda untuk setiap daerah.

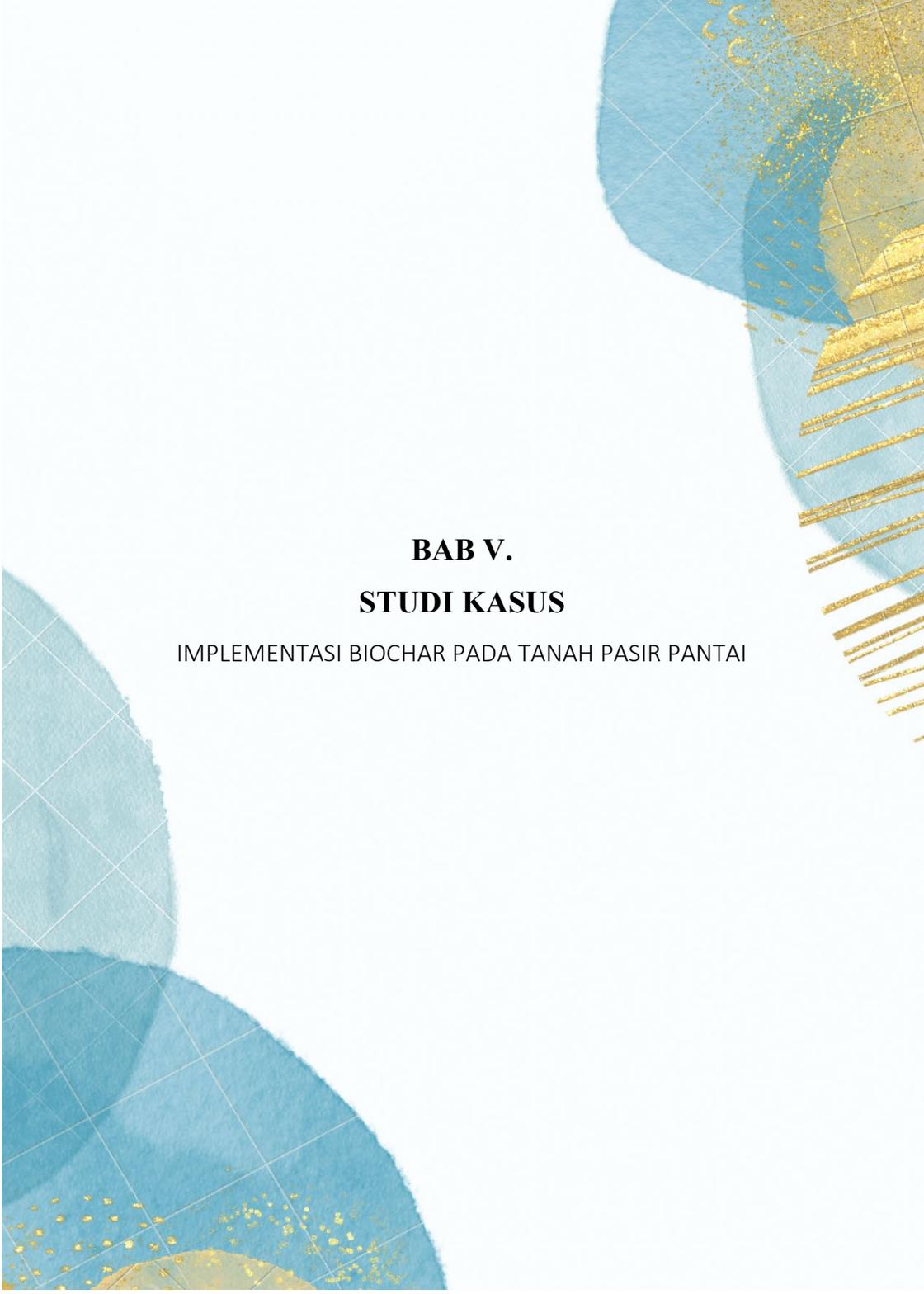
Tabel 3. Analisis manfaat biaya biochar pada tahun pertama dengan kapasitas produksi 450 kg/hari

Total produksi/tahun (kg)	Jumlah (Rp)
Total produksi/tahun (kg/tahun)	142,650.00
Harga jual (<i>Selling price</i>) (Rp/kg)	1,000.00
Total manfaat (<i>Total benefit</i>)	142,650,000.00
Biaya tetap (<i>Fixed cost</i>)	

Sewa bangunan	1,500,000.00
Alat pembakaran (<i>Kiln drum</i>) 3 unit	750,000.00
Selang air 10 meter	50,000.00
<i>Sealted for packaging</i> 1 unit	250,000.00
Alat jahit karung (<i>Sewing tools</i>) 1 unit	800,000.00
Sekop 5 buah	375,000.00
Mesin pompa 1 unit	500,000.00
Total biaya tetap (<i>Total fixed cost</i>)	4,225,000.00
Biaya tidak tetap (<i>Variable cost</i>)	
Bahan baku: sekam padi 1.500 kg x @150/kg	71,325,000.00
Pematik : 1 unit x @1.000/unit	317,000.00
Plastik & karung: 5 lembar x @500/lembar	792,500.00
Listrik, pajak, transportasi Rp21.500/hari	6,815,500.00
Tenaga kerja (Labour):1 orang x 70.000/hari	22,190,000.00
Total biaya tidak tetap (<i>Total variable cost</i>)	101,440,000.00
Total biaya (<i>Total cost</i>)	105,665,000.00
Manfaat bersih = total manfaat - total biaya	36,985,000.00
biaya-manfaat (<i>Benefit-cost ratio</i>)	1.35

Berdasarkan hasil perhitungan maka dapat disimpulkan Nilai BCR usaha pembuatan biochar tersebut sebesar 1,35 yang berarti usaha pembuatan biochar layak dilakukan karena dapat diperoleh keuntungan 1,35 kali dari biaya yang dikeluarkan.

Melalui estimasi pangsa pasar ini, maka usaha pembuatan biochar sangat menjanjikan dan mampu memberikan keuntungan yang cukup besar. Analisis ini sekaligus menyadarkan petani dari skeptisme terhadap nilai ekonomi biochar.



BAB V.
STUDI KASUS

IMPLEMENTASI BIOCHAR PADA TANAH PASIR PANTAI

BAB V. IMPLEMENTASI BIOCHAR PADA TANAH PASIR PANTAI

Studi kasus yang pertama berdasarkan penelitian yang kami lakukan di tahun 2019, berdasarkan kondisi Negara Indonesia yang merupakan negara kepulauan dengan perbandingan luas lautan dengan daratannya adalah 7:3, sehingga kesediaan tanah pasir pantai di Indonesia sangat banyak, Meskipun demikian, tanah pasir pantai memiliki kekurangan seperti tekstur pasir, bersifat porous, bahan organik dan KTK rendah yang menghalangi para petani untuk melakukan budidaya tanaman di tanah pasir pantai. Untuk mengatasi kendala tersebut dan membuka potensi petani di daerah pantai, maka ditambahkan pembenah tanah berupa biochar dari tempurung kelapa dan pupuk kandang dari kotoran sapi. Sebagaimana kita ketahui bahan baku tempurung kelapa di Yogyakarta sangat melimpah, berdasarkan data BPS (2020) produksi kelapa mencapai 48.100 ton, yang artinya jumlah residu berupa cangkang mencapai sekitar 9.600 ton, sehingga konversi tempurung kelapa menjadi biochar dapat meningkatkan nilai ekonomi residu perkebunan kelapa di Yogyakarta.

Kedua pemilihan bahan tersebut didasarkan karena keunggulan masing-masing bahan yaitu: pupuk kandang

mengandung unsur hara makro dan mikro yang dibutuhkan tanaman, selain itu mengandung serat yang sangat tinggi dan memperkaya bahan organik di dalam tanah; biochar tempurung kelapa memiliki luas permukaan yang lebih besar, linier terhadap jumlah pori-pori yang lebih banyak, sehingga akan menahan unsur hara. Alasan mengapa mengkombinasikan kedua bahan, sebagaimana telah dijelaskan pada sub-bab kedua bahwasanya biochar adalah pembenah tanah dan bukanlah pupuk sehingga minim unsur hara, sehingga unsur hara disediakan dengan menambahkan pupuk kandang dari kotoran sapi, dan dikarenakan penggunaan pupuk kandang pada tanah pasir bersifat jangka pendek, karena mudah terdekomposisi, maka kombinasi biochar adalah solusi yang efektif dalam meretensi hara untuk tujuan efisiensi pemupukan.

Tanah pasir pantai yang digunakan adalah pasir Pantai Samas, Kabupaten Bantul, Yogyakarta. Adapun biochar tempurung kelapa diproduksi dengan menggunakan teknik pirolisis bersuhu tinggi (600 °C). Untuk mengetahui pengaruh penggunaan kombinasi biochar tempurung kelapa dan pupuk kandang dari kotoran sapi, maka tanah pasir mula-mula dan kombinasi biochar tempurung kelapa+pupuk kandang sapi perlu dianalisis terlebih dahulu karakter fisikokimianya. Untuk

tanah pasir Pantai Samas diperoleh pH agak masam sebesar 5,85; C-organik 0,62% mengindikasikan bahwa tanah miskin C-organik yang artinya pemberian unsur hara berbentuk pupuk ke dalam tanah pasir tersebut rawan pelindian, karena kemampuan penyangga tanah sangat rendah. Nilai N-total 0,04% termasuk sangat rendah, diduga N hilang melalui proses evaporasi dan *leaching* (pelindian). Nilai KPK juga sangat rendah 2,04 cmol(+) kg^{-1} yang disebabkan kandungan humus dan lempunya sangat sedikit.

Hasil analisis fisikokimia biochar tempurung kelapa memiliki pH pada kisaran basa yaitu 10,1 dan pH pupuk kandang sapi memiliki pH netral 7,3. pH biochar yang bersifat basa akan membantu menetralisasi pH tanah pasir yang asam. Kandungan C-organik dan N-total biochar tempurung kelapa berturut-turut 33,72 % dan 0,41 % sedangkan Pupuk kandang dari kotoran sapi 17,89 % dan 0,81 %. C-organik yang terdapat dalam pupuk kandang dari kotoran sapi disebabkan oleh dekomposisi kotoran sapi, sedangkan sumbangan N-total dari proses mineralisasi bahan organik. Biochar tempurung kelapa memiliki KPK 21,90 cmol(+) kg^{-1} dan pupuk kandang dari kotoran sapi memiliki KPK 10,83 cmol(+) kg^{-1} . Dikarenakan biochar tempurung kelapa memiliki permukaan yang

bermuatan (-) yang akan berikatan dengan kation-kation dan dengan luas permukaan yang lebih luas yang dapat meningkatkan luas jerapan kation.

Media tanam disiapkan dengan mencampurkan tanah pasir pantai dengan biochar tempurung kelapa dan pupuk kandang sampai homogen. Ada 2 tanaman sawi dalam 1 pot, tetapi pada 5 hari setelah tanam dilakukan penjarangan menjadi 1 tanaman per pot. Penyiraman dilakukan pagi atau sore hari, tergantung kapasitas lahan. Sawi dipanen 30 hari setelah tanam, dan tanah dianalisis setelah panen. Parameter yang diamati pada tanaman adalah tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, berat basah, dan berat kering. Selanjutnya hasil penelitian dianalisis dengan ANOVA 5%. Jika perlakuan berpengaruh nyata maka akan diuji lebih lanjut dengan uji Duncan Multiple Range Test (DMRT) 5%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara umum penambahan biochar dan pupuk kandang:

1. Mampu menaikkan pH tanah pasir pantai yang dihasilkan dari pelepasan ion basa (-OH) dan gugus karboksil (-COOH) baik dari abu maupun humus hasil dekomposisi kotoran sapi.

2. Mampu meningkatkan kandungan C-organik di dalam tanah pasir. Biochar memiliki karbon yang stabil dari senyawa aromatik yang terbentuk selama proses pirolisis pada temperatur tinggi, sedangkan karbon pada pupuk kandang merupakan hasil dekomposisi dari bahan-bahan organik yang terkandung di dalam kotoran sapi.
3. Mampu mengurangi kerugian N akibat leaching atau pelindiang, karena sifat biochar yang memiliki porositas yang tinggi sehingga menjadi habitat yang baik bagi pertumbuhan mikroba, serta permukaan oksida biochar mampu mengadsorp ion NH_4^+ dan ion NO_3^- .
4. Mampu meningkatkan nilai rerata KPK tanah pasir pantai. Dan hasil secara khusus menunjukkan bahwa dosis biochar tempurung kelapa 20 ton/ha dan pupuk kandang sapi 20 ton/ha merupakan dosis terbaik dalam memperbaiki sifat kimia tanah yaitu pH dari 5,85 menjadi 6,90, C-organik dari 0,62% menjadi 1,23%, N-total dari 0,04% menjadi 0,34%, KPK dari 2,04 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ menjadi 4,86 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ dan produksi tanaman sawi yaitu berat segar tanaman sawi 60,83 gram. Selain itu dalam penelitian ini tidak terdapat interaksi antara dosis biochar tempurung kelapa dan dosis pupuk kandang sapi terhadap sifat kimia tanah dan produksi tanaman sawi pada tanah pasir pantai (Rahayu et al., 2020).

DAFTAR PUSTAKA

- Armah, E. K., Chetty, M., Adedeji, J. A., Estrice, D. E., Mutsvene, B., Singh, N., & Tshemese, Z. (2022). *Biochar: Production, Application and the Future* (M. Chetty (Ed.); p. Ch. 24). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105070>
- Awasthi, A. K., Cheela, V. R. S., D'Adamo, I., Iacovidou, E., Islam, M. R., Johnson, M., Miller, T. R., Parajuly, K., Parchomenko, A., Radhakrishan, L., Zhao, M., Zhang, C., & Li, J. (2021). Zero waste approach towards a sustainable waste management. *Resources, Environment and Sustainability*, 3(December 2020), 100014. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100014>
- Biochar*. (2011). Biochar Solutions Inc. <http://www.biocharsolutions.com/overview.html>
- BPS. (2020). *Produksi Kelapa Nasional*. <https://www.bps.go.id/indicator/54/132/1/produksi-tanaman-perkebunan.html>
- Chandra, S., & Bhattacharya, J. (2019). Influence of temperature and duration of pyrolysis on the property heterogeneity of rice straw biochar and optimization of pyrolysis conditions for its application in soils. *Journal of*

Cleaner Production, 215, 1123–1139.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.079>

Daful, A. G., & R Chandraratne, M. (2020). Biochar Production From Biomass Waste-Derived Material. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11249-4>

Dariah, A., Sutono, S., & Nurida, N. L. (2015). Pembenhah Tanah untuk Meningkatkan Produktivitas Lahan Pertanian. *Jurnal Sumberdaya Lahan Vol. 9 No. 2, Desember 2015; 67-84 Dibuka, 9 No.2*(Desember 2015), 67–84.

Das, S. K., Ghosh, G. K., & Avasthe, R. (2020). Biochar application for environmental management and toxic pollutant remediation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01078-1>

Desnataliansyah. (2021). *Pemanfaatan Biochar Dalam Pertanian, dari Limbah menjadi Berkah*. Fakultas Pertanian UNILA. <https://fp.unila.ac.id/pemanfaatan-biochar-dalam-pertanian-dari-limbah-menjadi-berkah/>

Desnataliansyah. (2022). *Penanganan dan Pemanfaatan Limbah Biomassa Pertanian*. Fakultas Pertanian UNILA. <https://fp.unila.ac.id/penanganan-dan-pemanfaatan-limbah-biomassa-pertanian/>

- FAO. (2019). Background Notes on Sustainable, Productive and Resilient Agro-Food Systems: Value chains, human capital, and the 2030 Agenda. In *A Report to the G20 Agriculture Deputies July 2019* (Issue July).
- Gupta, R. K., Dubey, M., Kharel, P., Gu, Z., & Fan, Q. H. (2015). Biochar activated by oxygen plasma for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 274, 1300–1305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.169>
- Hafeez, A., Pan, T., Tian, J., & Cai, K. (2022). Modified Biochars and Their Effects on Soil Quality: A Review. *Environments* - MDPI, 9(5). <https://doi.org/10.3390/environments9050060>
- Hu, Q., Jung, J., Chen, D., Leong, K., Song, S., Li, F., Mohan, B. C., Yao, Z., Prabhakar, A. K., Lin, X. H., Lim, E. Y., Zhang, L., Souradeep, G., Ok, Y. S., Kua, H. W., Li, S. F. Y., Tan, H. T. W., Dai, Y., Tong, Y. W., ... Wang, C. H. (2021). Biochar industry to circular economy. *Science of the Total Environment*, 757, 143820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>
- Humaira, S. Z. (2022). *Climate Smart Agriculture: Sistem Ketahanan Pertanian Cerdas Yang Ramah Iklim*. DIGITANI. <https://digitani.ipb.ac.id/climate-smart->

agriculture-sistem-ketahanan-pertanian-cerdas-yang-ramah-iklim/

- 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. *Biochar*, 2(4), 421–438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Islam, T., Li, Y., & Cheng, H. (2021). Biochars and engineered biochars for water and soil remediation: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su13179932>
- Kamarudin, N. S., Dahalan, F. A., Hasan, M., An, O. S., Parmin, N. A., Ibrahim, N., Hamdzah, M., Zain, N. A. M., Muda, K., & Wikurendra, E. A. (2022). Biochar: A review of its history, characteristics, factors that influence its yield, methods of production, application in wastewater treatment and recent development. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(6), 7914–7926. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.79147926>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Laporan Inventarisasi GRK 2020 dan Monitoring,

Pelaporan, Verifikasi (MPV). In *Dirjen PPI*.

Lee, J., Cho, W.-C., Poo, K.-M., Choi, S., Kim, T.-N., Son, E.-B., Choi, Y.-J., Kim, Y. M., & Chae, K.-J. (2020). Refractory oil wastewater treatment by dissolved air flotation, electrochemical advanced oxidation process, and magnetic biochar integrated system. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101358. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101358>

Li, S., Chan, C. Y., Sharbatmaleki, M., Trejo, H., & Delagah, S. (2020). Engineered Biochar Production and Its Potential Benefits in a Closed-Loop Water-Reuse Agriculture System. In *Water* (Vol. 12, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/w12102847>

Prastiyo, S. E., Irham, Hardyastuti, S., & Jamhari. (2020). How agriculture, manufacture, and urbanization induced carbon emission? The case of Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 42092–42103. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10148-w>

Rahayu, R., Saidi, D., & Herlambang, S. (2020). Pengaruh Biochar Tempurung Kelapa Dan Pupuk Kandang Sapi Terhadap Sifat Kimia Tanah Dan Produksi Tanaman Sawi Pada Tanah Pasir Pantai. *JURNAL TANAH DAN AIR (Soil*

and Water Journal), 16(2), 69.
<https://doi.org/10.31315/jta.v16i2.3985>

Rai, S., Gandhi, M., Vidyapith, K., Solanki, M. K., Kumar, A., Anal, D., & Sagar, A. (2020). Waste to Energy: Prospects and Applications. *Waste to Energy: Prospects and Applications, February*. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4347-4>

Salam, A., Bashir, S., Khan, I., & Hu, H. (2022). Biochar production and characterization as a measure for effective rapeseed residue and rice straw management: an integrated spectroscopic examination. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(7), 2687–2696.
<https://doi.org/10.1007/s13399-020-00820-z>

Sarwono, R. (2016). Biochar Sebagai Penyimpan Karbon, Perbaiki Sifat Tanah, dan Mencegah Pemanasan Global : Tinjauan. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, 18(01), 79–90.
<https://doi.org/10.14203/jkti.v18i01.44>

Sismiyanti, S., Hermansah, H., & Yulnafatmawita, Y. (2018). Klasifikasi Beberapa Sumber Bahan Organik Dan Optimalisasi Pemanfaatannya Sebagai Biochar. *Jurnal Solum*, 15(1), 8. <https://doi.org/10.25077/jsolum.15.1.8-16.2018>

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)

- Sri Shalini, S., Palanivelu, K., & Ramachandran, A. (2022). *Application of Biochar from Waste for Carbon Dioxide Sequestration and Sustainable Agriculture BT - Strategies and Tools for Pollutant Mitigation: Research Trends in Developing Nations* (J. Aravind, M. Kamaraj, & S. Karthikeyan (Eds.); pp. 113–126). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98241-6_6
- Sun, Y., Lyu, H., Cheng, Z., Wang, Y., & Tang, J. (2022). Insight into the mechanisms of ball-milled biochar addition on soil tetracycline degradation enhancement: Physicochemical properties and microbial community structure. *Chemosphere*, 291, 132691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132691>
- Tan, X., Liu, Y., Gu, Y., Xu, Y., Zeng, G., Hu, X., Liu, S., Wang, X., Liu, S., & Li, J. (2016). Biochar-based nanocomposites for the decontamination of wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 212, 318–333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.093>

- Wang, B., Gao, B., & Fang, J. (2017). Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(22), 2158–2207. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1418580>
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- Wang, Q., & Sarkar, J. (2018). Pyrolysis behaviors of waste coconut shell and husk biomasses. *International Journal of Energy Production and Management*, 3(1), 34–43. <https://doi.org/10.2495/EQ-V3-N1-34-43>
- Wawan. (2017). Pengelolaan Bahan Organik. In *Buku Ajar*.
- Widiastuti, M. M. D. (2016). Meningkatkan pendapatan petani di Kabupaten Merauke (Analysis Benefit Cost Ratio of Biochar in Agriculture Land to Increase Income Household in Merauke Regency). *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan*, 13(2), 135–143.
- Yi, Y., Huang, Z., Lu, B., Xian, J., Tsang, E. P., Cheng, W., Fang, J., & Fang, Z. (2020). Magnetic biochar for environmental remediation: A review. *Bioresource Technology*, 298, 122468. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122468>

1016/j.biortech.2019.122468

Zaman, A. (2022). *Zero-Waste: A New Sustainability Paradigm for Addressing the Global Waste Problem BT - The Vision Zero Handbook: Theory, Technology and Management for a Zero Casualty Policy* (K. Edvardsson Björnberg, M.-Å. Belin, S. O. Hansson, & C. Tingvall (Eds.); pp. 1–24). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-23176-7_46-1

Armah, E. K., Chetty, M., Adedeji, J. A., Estrice, D. E., Mutsvene, B., Singh, N., & Tshemese, Z. (2022). *Biochar: Production, Application and the Future* (M. Chetty (Ed.); p.Ch.24). IntechOpen.<https://doi.org/10.5772/intechopen.105070>

Awasthi, A. K., Cheela, V. R. S., D'Adamo, I., Iacovidou, E., Islam, M. R., Johnson, M., Miller, T. R., Parajuly, K., Parchomenko, A., Radhakrishan, L., Zhao, M., Zhang, C., & Li, J. (2021). Zero waste approach towards a sustainable waste management. *Resources, Environment and Sustainability*, 3(December 2020), 100014.
<https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100014>

Biochar. (2011). Biochar Solutions Inc.
<http://www.biocharsolutions.com/overview.html>

BPS. (2020). *Produksi Kelapa Nasional*.

<https://www.bps.go.id/indicator/54/132/1/produksi-tanaman-perkebunan.html>

- Chandra, S., & Bhattacharya, J. (2019). Influence of temperature and duration of pyrolysis on the property heterogeneity of rice straw biochar and optimization of pyrolysis conditions for its application in soils. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1123–1139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.079>
- Daful, A. G., & R Chandraratne, M. (2020). Biochar Production From Biomass Waste-Derived Material. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11249-4>
- Dariah, A., Sutono, S., & Nurida, N. L. (2015). Pembenh Tanah untuk Meningkatkan Produktivitas Lahan Pertanian. *Jurnal Sumberdaya Lahan Vol. 9 No. 2, Desember 2015; 67-84 Dibuka, 9 No.2*(Desember 2015), 67–84.
- Das, S. K., Ghosh, G. K., & Avasthe, R. (2020). Biochar application for environmental management and toxic pollutant remediation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01078-1>
- Desnatialiansyah. (2021). *Pemanfaatan Biochar Dalam Pertanian, dari Limbah menjadi Berkah*. Fakultas

- Pertanian UNILA. <https://fp.unila.ac.id/pemanfaatan-biochar-dalam-pertanian-dari-limbah-menjadi-berkah/>
- Desnataliansyah. (2022). *Penanganan dan Pemanfaatan Limbah Biomassa Pertanian*. Fakultas Pertanian UNILA. <https://fp.unila.ac.id/penanganan-dan-pemanfaatan-limbah-biomassa-pertanian/>
- FAO. (2019). Background Notes on Sustainable, Productive and Resilient Agro-Food Systems: Value chains, human capital, and the 2030 Agenda. In *A Report to the G20 Agriculture Deputies July 2019* (Issue July).
- Gupta, R. K., Dubey, M., Kharel, P., Gu, Z., & Fan, Q. H. (2015). Biochar activated by oxygen plasma for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 274, 1300–1305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.169>
- Hafeez, A., Pan, T., Tian, J., & Cai, K. (2022). Modified Biochars and Their Effects on Soil Quality: A Review. *Environments* - *MDPI*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/environments9050060>
- Hu, Q., Jung, J., Chen, D., Leong, K., Song, S., Li, F., Mohan, B. C., Yao, Z., Prabhakar, A. K., Lin, X. H., Lim, E. Y., Zhang, L., Souradeep, G., Ok, Y. S., Kua, H. W., Li, S. F. Y., Tan, H. T. W., Dai, Y., Tong, Y. W., ... Wang, C. H.

(2021). Biochar industry to circular economy. *Science of the Total Environment*, 757, 143820.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>

Humaira, S. Z. (2022). *Climate Smart Agriculture: Sistem Ketahanan Pertanian Cerdas Yang Ramah Iklim*. DIGITANI. <https://digitani.ipb.ac.id/climate-smart-agriculture-sistem-ketahanan-pertanian-cerdas-yang-ramah-iklim/>

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. *Biochar*, 2(4), 421–438.
<https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>

Islam, T., Li, Y., & Cheng, H. (2021). Biochars and engineered biochars for water and soil remediation: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17), 1–25.
<https://doi.org/10.3390/su13179932>

Kamarudin, N. S., Dahalan, F. A., Hasan, M., An, O. S., Parmin, N. A., Ibrahim, N., Hamdzah, M., Zain, N. A. M., Muda, K., & Wikurendra, E. A. (2022). Biochar: A review of its history, characteristics, factors that influence its yield,

methods of production, application in wastewater treatment and recent development. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(6), 7914–7926. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.79147926>

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Laporan Inventarisasi GRK 2020 dan Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV). In *Dirjen PPI*.

Lee, J., Cho, W.-C., Poo, K.-M., Choi, S., Kim, T.-N., Son, E.-B., Choi, Y.-J., Kim, Y. M., & Chae, K.-J. (2020). Refractory oil wastewater treatment by dissolved air flotation, electrochemical advanced oxidation process, and magnetic biochar integrated system. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101358. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101358>

Li, S., Chan, C. Y., Sharbatmaleki, M., Trejo, H., & Delagah, S. (2020). Engineered Biochar Production and Its Potential Benefits in a Closed-Loop Water-Reuse Agriculture System. In *Water* (Vol. 12, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/w12102847>

Prastiyo, S. E., Irham, Hardyastuti, S., & Jamhari. (2020). How agriculture, manufacture, and urbanization induced carbon emission? The case of Indonesia. *Environmental Science*

and Pollution Research, 27(33), 42092–42103.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-10148-w>

Rahayu, R., Saidi, D., & Herlambang, S. (2020). Pengaruh Biochar Tempurung Kelapa Dan Pupuk Kandang Sapi Terhadap Sifat Kimia Tanah Dan Produksi Tanaman Sawi Pada Tanah Pasir Pantai. *JURNAL TANAH DAN AIR (Soil and Water Journal)*, 16(2), 69.
<https://doi.org/10.31315/jta.v16i2.3985>

Rai, S., Gandhi, M., Vidyapith, K., Solanki, M. K., Kumar, A., Anal, D., & Sagar, A. (2020). Waste to Energy: Prospects and Applications. *Waste to Energy: Prospects and Applications, February*. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4347-4>

Salam, A., Bashir, S., Khan, I., & Hu, H. (2022). Biochar production and characterization as a measure for effective rapeseed residue and rice straw management: an integrated spectroscopic examination. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(7), 2687–2696.
<https://doi.org/10.1007/s13399-020-00820-z>

Sarwono, R. (2016). Biochar Sebagai Penyimpan Karbon, Perbaikan Sifat Tanah, dan Mencegah Pemanasan Global : Tinjauan. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, 18(01), 79–90.
<https://doi.org/10.14203/jkti.v18i01.44>

- Sismiyanti, S., Hermansah, H., & Yulnafatmawita, Y. (2018). Klasifikasi Beberapa Sumber Bahan Organik Dan Optimalisasi Pemanfaatannya Sebagai Biochar. *Jurnal Solum*, 15(1), 8. <https://doi.org/10.25077/jsolum.15.1.8-16.2018>
- 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)
- Sri Shalini, S., Palanivelu, K., & Ramachandran, A. (2022). *Application of Biochar from Waste for Carbon Dioxide Sequestration and Sustainable Agriculture BT - Strategies and Tools for Pollutant Mitigation: Research Trends in Developing Nations* (J. Aravind, M. Kamaraj, & S. Karthikeyan (Eds.); pp. 113–126). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98241-6_6
- Sun, Y., Lyu, H., Cheng, Z., Wang, Y., & Tang, J. (2022). Insight into the mechanisms of ball-milled biochar addition on soil tetracycline degradation enhancement: Physicochemical properties and microbial community structure. *Chemosphere*, 291, 132691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132691>

- Tan, X., Liu, Y., Gu, Y., Xu, Y., Zeng, G., Hu, X., Liu, S., Wang, X., Liu, S., & Li, J. (2016). Biochar-based nanocomposites for the decontamination of wastewater: A review. *Bioresource Technology*, *212*, 318–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.093>
- Wang, B., Gao, B., & Fang, J. (2017). Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *47*(22), 2158–2207. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1418580>
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, *227*, 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- Wang, Q., & Sarkar, J. (2018). Pyrolysis behaviors of waste coconut shell and husk biomasses. *International Journal of Energy Production and Management*, *3*(1), 34–43. <https://doi.org/10.2495/EQ-V3-N1-34-43>
- Wawan. (2017). Pengelolaan Bahan Organik. In *Buku Ajar*.
- Widiastuti, M. M. D. (2016). Meningkatkan pendapatan petani di Kabupaten Merauke (Analysis Benefit Cost Ratio of Biochar in Agriculture Land to Increase Income

Household in Merauke Regency). *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan*, 13(2), 135–143.

Yi, Y., Huang, Z., Lu, B., Xian, J., Tsang, E. P., Cheng, W., Fang, J., & Fang, Z. (2020). Magnetic biochar for environmental remediation: A review. *Bioresource Technology*, 298, 122468. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122468>

Zaman, A. (2022). *Zero-Waste: A New Sustainability Paradigm for Addressing the Global Waste Problem BT - The Vision Zero Handbook: Theory, Technology and Management for a Zero Casualty Policy* (K. Edvardsson Björnberg, M.-Å. Belin, S. O. Hansson, & C. Tingvall (Eds.); pp. 1–24). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23176-7_46-1

TENTANG PENULIS



Susila Herlambang menyelesaikan Pendidikan S1 Ilmu Tanah di Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta pada tahun 1989. Kemudian beliau studi S2 di IPB Bogor selama 2 tahun dapat diselesaikan dengan memperoleh gelar master pada tahun 1999 pada bidang Ilmu Tanah. Sedangkan gelar doktor dapat diselesaikan dalam waktu 3 tahun pada tahun 2014 pada bidang Ilmu tanah di UGM Yogyakarta. Beliau menjadi dosen di UPN “Veteran” Yogyakarta sejak tahun 1992 dan memiliki banyak karya seperti jurnal ilmiah terindek scopus, journal nasional bereputasi, prosiding, paten alat pembuatan biochar, dan buku yang sudah dipublikasikan baik di tingkat nasional serta karya-karya lain di internasional. Sertifikasi kompetensi dalam bidang organik juga diperoleh pada tahun 2019. Beliau aktive dalam organisasi profesi keilmuan dan mempunyai slogan manjada wajadha barang siapa yang sungguh-sungguh maka akan memperoleh hasil kesungguhannya.



Muammar Gomareuzzaman menyelesaikan Pendidikan S1 Geografi Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada tahun 2009 dan menyelesaikan S2 Perencanaan Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai di universitas yang sama pada tahun 2013. Bergabung menjadi Dosen Jurusan Teknik Lingkungan UPN "Veteran" Yogyakarta Tahun 2014. Beberapa kegiatan yang pernah diikutinya adalah seminar nasional dan internasional, HKI, menulis jurnal dan buku untuk menunjang proses mengajarnya.

Danang Yudhiantoro. Dosen Manajemen UPN "Veteran" Yogyakarta sejak 1998, menyelesaikan S2 di Magister Sains Manajemen UGM Yogyakarta. Saat ini sebagai Kepala UPT.



Pengembangan Karir dan Kewirausahaan UPN "Veteran" Yogyakarta. Aktif Sebagai Praktisi Bisnis dan Konsultan Manajemen serta Aktif melakukan Penelitian dan Pengabdian Masyarakat baik Internal maupun Eksternal. Selain itu Aktif mengikuti kegiatan organisasi maupun

Asosiasi Manajemen serta kewirausahaan baik dalam maupun luar negeri.



Indriana Lestari menyelesaikan Pendidikan S1 Teknik Kimia di Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta pada tahun 2007 dan menyelesaikan S2 Teknik Kimia di Universitas Indonesia pada tahun 2016. Bergabung menjadi Dosen Jurusan Teknik Kimia UPN ”Veteran” Yogyakarta Tahun 2019. Beberapa

kegiatan yang pernah diikutinya adalah seminar nasional, HKI, menulis jurnal dan buku untuk menunjang proses mengajarnya.