



Pedoman Implementasi

Model Bisnis Pertanian

Berkelanjutan Berbasis Teknologi

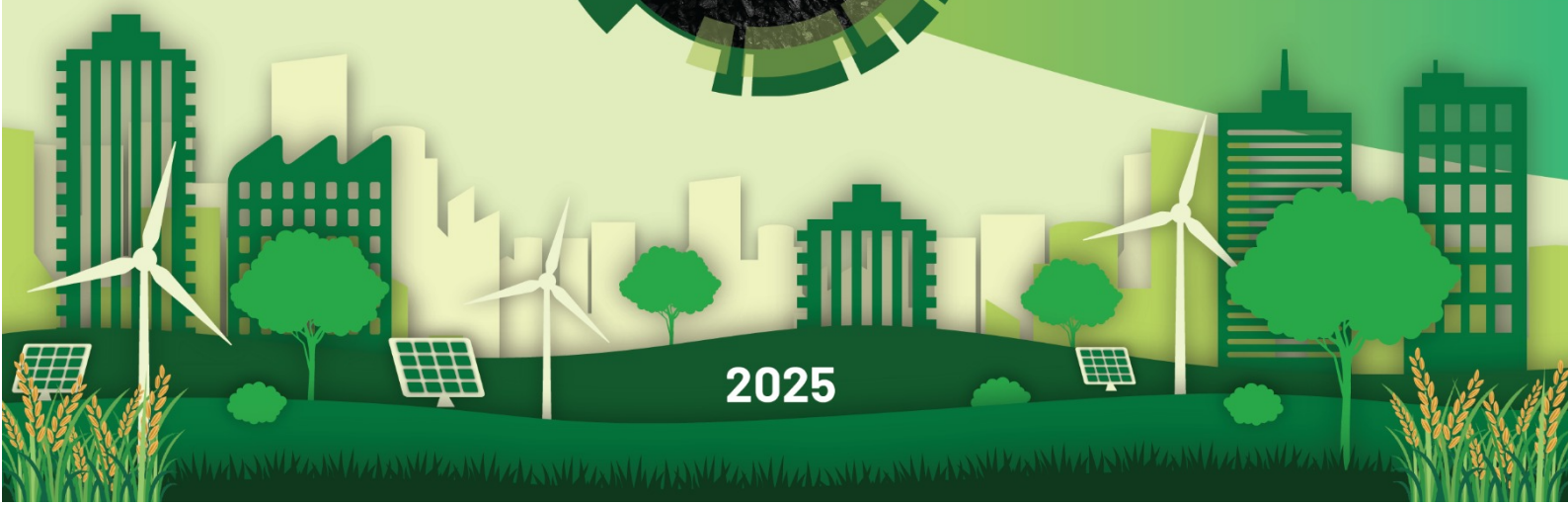
Climate Smart Agriculture

(CSA) – Biochar

untuk Peningkatan Produktivitas Tanaman Padi

Kerjasama Penelitian:

Bank Indonesia, Kementerian Koordinator Bidang Pangan,
Kementerian Pertanian, dan Universitas Diponegoro



2025

**Pedoman Implementasi Model Bisnis Pertanian Berkelanjutan
Berbasis Teknologi Climate Smart Agriculture (CSA) – Biochar
untuk Peningkatan Produktivitas Tanaman Padi**

TIM PENGARAH

Kurniawan Agung
Kus Prisetiahadi
Dedi Nursyamsi

Bank Indonesia
Kementerian Koordinator Bidang Pangan
Kementerian Pertanian

TIM PENYUNTING

Bank Indonesia

Heru Rahadyan
Ribka Hanum Haryono
Anindita Sita Dewi
Abigail Randy Krones
Fadel Ahmad Mustary
Widianingsih

Kementerian Koordinator Bidang Pangan

Yuyun Kurnia Lestari
Wahid Setiadi

Kementerian Pertanian

Sri Mulyani
Dyah Margani Utami
Susi Deliana Siregar

TIM PENULIS

Universitas Diponegoro

Prof. Dr. Ir. Florentina Kusmiyati, M.Sc.
Albertus Fajar Irawan, S.P., M.Agr., Ph.D.
Muhammad Iqbal Fauzan, S.P., M.Si.
Anasrullah, S.P., M.S.
Septrial Arafat, S.P., M.P.
Nani Kitti Sihaloho, M.P.
Fatikhah Nurul Fajri, S.P., M.P.

Penerbit:

Bank Indonesia

Departemen Ekonomi-Kuangan Inklusif dan Hijau

Jl. M.H. Thamrin No.2, Jakarta 10350

© Bank Indonesia

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-Undang.

Tidak ada bagian dari publikasi ini yang boleh direproduksi, disimpan dalam sistem pengambilan atau ditransmisikan dalam bentuk apapun atau dengan cara apapun, elektronik, fotokopi, rekaman atau lainnya, tanpa izin tertulis sebelumnya dari pemilik hak cipta.

Permohonan izin tertulis untuk memperbanyak bagian mana pun dari publikasi ini ditujukan kepada:

Departemen Ekonomi-Kuangan Inklusif dan Hijau
Bank Indonesia

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas selesainya penyusunan buku “Pedoman Implementasi Model Bisnis Pertanian Berkelanjutan Berbasis Teknologi Climate Smart Agriculture (CSA) - Biochar untuk Peningkatan Produktivitas Tanaman Padi”. Dokumen ini merupakan perwujudan nyata sinergi dan kolaborasi penelitian antara Bank Indonesia melalui Departemen Ekonomi-Kuangan Inklusif dan Hijau (DEIH), Kementerian Koordinator Bidang Pangan, Kementerian Pertanian, dan Universitas Diponegoro.

Sektor pertanian padi memiliki peran krusial dalam menjaga ketahanan pangan nasional serta menyerap tenaga kerja di pedesaan. Namun, sektor ini kini berada pada titik yang rentan akibat perubahan iklim, di mana suhu rata-rata di Indonesia terus meningkat sebesar 0,03°C per tahun. Dampak dari kenaikan suhu ini mengancam penurunan produktivitas padi nasional hingga mencapai 25% pada periode 2020-2045. Di sisi lain, aktivitas pertanian juga berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), terutama metana (CH₄) dan dinitrogen oksida (N₂O).

Sebagai dukungan, Bank Indonesia terhadap agenda transisi ekonomi berkelanjutan, kami melakukan kajian terkait inovasi Climate Smart Agriculture (CSA) melalui pemanfaatan Biochar. Biochar adalah bahan kaya karbon hasil pirolisis limbah organik, seperti sekam padi, yang mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan ketersediaan nutrisi, serta menurunkan emisi CH₄ secara signifikan hingga 91%.

Melalui uji lapangan yang dilakukan di Kabupaten Grobogan, telah disusun model bisnis pertanian berkelanjutan yang mencakup enam pilar strategis, mulai dari kompetensi inti hingga proposisi nilai bagi petani. Model bisnis ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan hasil panen, tetapi juga mengintegrasikan prinsip ekonomi berkelanjutan yang memungkinkan petani

memperoleh manfaat ekonomi nyata sekaligus berpartisipasi dalam praktik usaha yang lebih ramah lingkungan.

Kami berharap pedoman ini dapat menjadi acuan inspiratif bagi seluruh pemangku kepentingan mulai dari petani, pemerintah daerah, hingga lembaga pembiayaan dalam membangun sistem pertanian yang tangguh dan rendah karbon. Semoga langkah kolektif ini dapat mempercepat pencapaian target Net Zero Emission Indonesia tahun 2060 dan memperkuat ketahanan pangan bangsa.

Jakarta, Januari 2026

Anastuty K.

Kepala Departemen Ekonomi-Kuangan Inklusif dan Hijau

Bank Indonesia

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku “Pedoman Implementasi Model Bisnis Pertanian Berkelanjutan Berbasis Teknologi Climate Smart Agriculture (CSA) – Biochar untuk Peningkatan Produktivitas Tanaman Padi” ini dapat disusun sebagai upaya strategis pembangunan sektor pertanian nasional yang berkelanjutan dan berketahanan iklim, dalam rangka mendukung terwujudnya swasembada pangan berkelanjutan.

Perubahan iklim global telah memberikan tantangan yang semakin kompleks bagi sektor pertanian, antara lain melalui peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrem, penurunan kualitas sumber daya lahan, serta meningkatnya emisi gas rumah kaca dari aktivitas pertanian. Kondisi tersebut menuntut adanya transformasi sistem pertanian menuju pendekatan yang lebih adaptif, efisien, dan ramah lingkungan melalui penerapan Climate Smart Agriculture (CSA), yang mampu meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan, memperkuat ketahanan sistem produksi pangan, serta menurunkan dampak lingkungan.

Dalam kerangka tersebut, pemanfaatan biochar menjadi salah satu inovasi teknologi yang memiliki peran strategis dalam mendukung implementasi CSA. Biochar berfungsi dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, meningkatkan kapasitas simpan air dan hara, meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, serta berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan penyimpanan karbon jangka panjang di dalam tanah. Selain aspek teknis dan lingkungan, biochar juga memiliki potensi ekonomi yang signifikan sebagai bagian dari pengembangan rantai nilai pertanian berkelanjutan.

Buku model bisnis ini disusun untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai pengembangan biochar sebagai solusi teknologi CSA yang layak secara teknis, ekonomis, dan kelembagaan. Penyusunan buku ini melibatkan

multipihak diantaranya Kementerian Pertanian sebagai pengampu kebijakan sektor pertanian, Bank Indonesia dalam mendukung penguatan ekosistem ekonomi dan pembiayaan berkelanjutan, serta akademik dan riset dari Universitas Diponegoro dalam penyediaan kajian ilmiah, inovasi teknologi, juga didukung oleh Dinas Pertanian, dan keterlibatan petani melalui kelompok tani di tingkat lapangan.

Akhir kata, kami berharap Buku Model Bisnis ini dapat menjadi acuan dan rujukan bagi para pemangku kepentingan dalam perencanaan, pelaksanaan, dan pengembangan usaha biochar berbasis pertanian berkelanjutan, sehingga dapat memberikan kontribusi nyata dalam mewujudkan swasembada pangan Indonesia yang tangguh dan berkelanjutan.

Jakarta, Januari 2026

Drh. I. Gst. Made Ngr. Kuswandana M.M.

Kepala Pusat Penyuluhan Pertanian

Kementerian Pertanian

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya dokumen Pedoman Implementasi Model Bisnis Pertanian Berkelanjutan Berbasis Teknologi Climate Smart Agriculture (CSA) - Biochar ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Pedoman ini disusun sebagai respons atas tantangan strategis pada sektor pertanian, yaitu tuntutan pemenuhan kebutuhan pangan yang terus meningkat, baik untuk konsumsi masyarakat maupun kebutuhan bahan baku industri, di tengah tekanan perubahan iklim dan degradasi sumber daya lahan.

Perubahan iklim telah berdampak nyata pada sektor pertanian nasional melalui peningkatan suhu, ketidakpastian curah hujan, dan iklim ekstrem yang mengganggu produktivitas, stabilitas usaha tani dan ketahanan pangan. Di sisi lain, praktik pertanian konvensional masih menjadi sumber emisi gas rumah kaca, terutama metana (CH_4) dari lahan sawah dan dinitrogen oksida (N_2O) dari pemupukan nitrogen, sehingga diperlukan transformasi menuju sistem pertanian yang lebih produktif, adaptif terhadap perubahan iklim, dan rendah emisi.

Climate Smart Agriculture (CSA) merupakan kerangka strategis yang mengintegrasikan peningkatan produktivitas pertanian berkelanjutan, ketahanan terhadap perubahan iklim, dan mitigasi emisi gas rumah kaca. Biochar berperan sebagai pembenah tanah yang meningkatkan kapasitas menahan air, efisiensi hara, serta kesuburan tanah, sekaligus menurunkan emisi metana dan menyimpan karbon jangka panjang di dalam tanah. Penerapan biochar juga berkontribusi pada perbaikan kualitas ekosistem tanah dan stabilitas produksi pertanian, khususnya pada lahan pertanian yang rentan terhadap dampak perubahan iklim.

Biochar diproduksi melalui pengelolaan sekam padi dan dimanfaatkan oleh petani, dengan dukungan kebijakan dan fasilitasi dari pemerintah serta

pendanaan dari donor dan mitra pembangunan. Penyimpanan karbon dan penurunan emisi yang dihasilkan membuka peluang pengembangan skema carbon trading sebagai sumber nilai tambah ekonomi bagi petani dan pelaku usaha. Integrasi antara petani, pemerintah daerah dan pusat, donor, serta mekanisme perdagangan karbon membentuk ekosistem ekonomi sirkular yang saling memperkuat, mendukung pertanian berkelanjutan, dan mendorong pengembangan bisnis hijau yang inklusif dan berdaya saing.

Pendekatan CSA-Biochar tidak hanya relevan untuk peningkatan produktivitas dan ketahanan usaha tani, tetapi juga memiliki nilai strategis dalam mendukung pencapaian target Net Zero Emission (NZE) 2060 serta pengembangan ekonomi hijau nasional melalui pengurangan emisi dan peningkatan penyimpanan karbon.

Akhir kata, pedoman ini diharapkan dapat berkontribusi nyata dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Kami menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan pedoman ini.

Jakarta, Januari 2026

Kus Prisetiahadi, Ph.D

Asisten Deputi Peningkatan Daya Saing Produk Tanaman Pangan

Kementerian Koordinator Bidang Pangan

Daftar Isi

BAB 1: PENDAHULUAN.....	1
1.1. Tantangan Ganda Sektor Pertanian Global	1
1.2. Paradoks Pertanian dan Krisis Iklim.....	1
1.3. Konteks Indonesia: Lumbung Pangan di Bawah Tekanan	3
1.4. Paradigma Baru: <i>Climate Smart Agriculture</i> (CSA) sebagai Solusi Sistemik	4
1.5. Biochar: Inovasi Teknologi Kunci dalam Kerangka CSA.....	6
1.6. Tujuan dan Ruang Lingkup	7
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Definisi, Produksi, dan Karakteristik Kunci Biochar	9
2.2. Problem Mendasar: Degradasi Lahan Sawah (Studi Kasus Grobogan)	12
2.2.1. Paparan Data Kesuburan Awal (<i>Baseline</i>)	12
2.2.2. Interpretasi Diagnosis: Tanah “Sakit” dan “Lapar Hara”	14
2.3. Mekanisme Biochar sebagai Amelioran Tanah (Solusi Hipotesis).....	15
2.3.1. Perbaikan Sifat Fisik Tanah	15
2.3.2. Perbaikan Sifat Kimia Tanah.....	15
2.3.3. Perbaikan Sifat Biologi Tanah	16
2.4. Tantangan Lingkungan: Emisi GRK dari Lahan Sawah.....	16
2.4.1. Produksi Metana (CH ₄)	16
2.4.2. Produksi Dinitrogen Oksida (N ₂ O)	17
2.5. Kerangka Konseptual: Hipotesis Peran Ganda Biochar	17
BAB 3. METODOLOGI IMPLEMENTASI DI LAPANGAN.....	19
3.1. Lokasi, Waktu, dan Desain Penelitian.....	19
3.2. Prosedur Aplikasi dan Budidaya.....	20
3.3. Metode Pengukuran Variabel (Pengumpulan Data)	22
3.3.1. Analisis Tanah (Pilar Adaptasi)	23
3.3.2. Pengamatan Agronomi (Pilar Produktivitas)	23
3.3.3. Pengukuran Emisi Gas Rumah Kaca (Pilar Mitigasi)	24
3.4. Analisis Data	25
BAB 4. HASIL DAN ANALISIS	27
4.1. Perbaikan Kualitas Tanah (Bukti Pilar Adaptasi)	27
4.2. Respons Pertumbuhan Vegetatif Tanaman	29

4.3. Dampak pada Komponen Hasil Panen	31
4.4. Peningkatan Produktivitas Akhir (Bukti Pilar Produktivitas)	32
BAB 5. HASIL DAN ANALISIS	35
5.1. Dinamika Fluks Gas Rumah Kaca (GRK)	35
5.2. Analisis Emisi Kumulatif per Musim Tanam	37
5.3. Dampak terhadap Potensi Pemanasan Global (GWP)	38
5.4. Efisiensi Karbon: Yield-Scaled GWP (GWP _y)	40
BAB 6. ANALISIS KELAYAKAN EKONOMI DAN MODEL BISNIS HIJAU	42
6.1. Metodologi dan Skenario Analisis Usaha Tani	42
6.2. Analisis Kelayakan Finansial (Musim Tanam Pertama)	44
6.3. Interpretasi Kelayakan dan Proyeksi Jangka Panjang	48
6.4. Model Bisnis Hijau: Ekonomi Sirkular dan Pasar Karbon	50
BAB 7. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI STRATEGIS	53
7.1. Kesimpulan Strategis	53
7.2. Implikasi dan Rekomendasi	56
LAMPIRAN 1 PANDUAN TEKNIS UNTUK PETANI & KELOMPOK TANI (POKTAN)	59
LAMPIRAN 2 PANDUAN STRATEGIS UNTUK PEMANGKU KEPENTINGAN (<i>STAKEHOLDER</i>)	67

BAB 1: PENDAHULUAN

1.1. Tantangan Ganda Sektor Pertanian Global

Dunia menghadapi sebuah dilema fundamental yang sering disebut sebagai tantangan ganda (*the dual challenge*). Di satu sisi, sektor pertanian dituntut untuk memenuhi kebutuhan pangan bagi populasi global yang terus bertambah dan diproyeksikan mencapai hampir 10 miliar jiwa pada tahun 2050. Di sisi lain, aktivitas pertanian itu sendiri merupakan salah satu kontributor signifikan terhadap perubahan iklim, sebuah krisis eksistensial yang justru mengancam kemampuan sistem pangan untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Kombinasi kedua tantangan ini menempatkan sektor pertanian pada posisi strategis sekaligus rentan, sehingga diperlukan pendekatan baru yang mampu meningkatkan produksi tanpa memperburuk tekanan terhadap lingkungan.

1.2. Paradoks Pertanian dan Krisis Iklim

Sektor pertanian merupakan fondasi utama peradaban manusia. Namun dalam praktiknya, sistem pangan global—yang mencakup penggunaan lahan, produksi pertanian, hingga rantai pasok pascapanen—bertanggung jawab

atas sekitar 34% total emisi Gas Rumah Kaca (GRK) antropogenik. Kontribusi ini menjadikan sektor pertanian sebagai salah satu penyumbang terbesar jejak karbon global, bahkan melampaui sektor transportasi.

Emisi pertanian berasal dari berbagai sumber. Emisi Metana (CH_4), gas dengan potensi pemanasan global 28 kali lipat CO_2 (dalam horizon 100 tahun), terutama dihasilkan dari fermentasi enterik ternak ruminansia dan proses anaerobik pada lahan sawah tergenang. Lahan sawah, yang menjadi sumber pangan bagi miliaran manusia, secara alami melepaskan metana akibat dekomposisi bahan organik dalam kondisi minim oksigen. Selain itu, emisi Dinitrogen Oksida (N_2O)—gas dengan potensi pemanasan global hampir 300 kali lipat CO_2 —banyak berasal dari penggunaan pupuk nitrogen sintetis. Pemupukan yang tidak efisien menyebabkan sebagian nitrogen tidak terserap tanaman dan terlepas ke atmosfer dalam bentuk N_2O . Dengan demikian, aktivitas untuk memproduksi pangan justru mempercepat kerusakan sistem iklim yang menopang hidup manusia.

Ironisnya, sektor pertanian juga merupakan sektor yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim. Di Indonesia, data menunjukkan peningkatan suhu rata-rata sebesar $0,03^\circ\text{C}$ per tahun pada periode 1981–2023. Peningkatan ini bukan sekadar angka, melainkan membawa dampak nyata di lapangan. Pola curah hujan menjadi tidak menentu, musim tanam bergeser, dan intensitas kejadian iklim ekstrem seperti kekeringan serta banjir

meningkat. Bagi petani, kondisi ini berarti risiko gagal panen, meningkatnya serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), dan ketidakpastian pendapatan. Stabilitas produksi pangan sebagai fondasi ketahanan nasional kini berada dalam ancaman serius.

Krisis iklim ini juga berkaitan dengan krisis ekonomi global. Indeks Harga Pangan Dunia (FAO, 2024) menunjukkan volatilitas yang tinggi akibat kombinasi guncangan iklim, kenaikan harga energi, serta ketidakstabilan geopolitik yang mengganggu rantai pasok. Petani kecil di negara berkembang menjadi pihak paling rentan mengingat kenaikan harga input produksi seringkali tidak sebanding dengan kenaikan harga jual komoditas. Tantangan utamanya bukan sekadar memproduksi pangan lebih banyak, tetapi memproduksinya secara efisien, tangguh, dan dengan biaya yang lebih terkendali.

1.3. Konteks Indonesia: Lumbung Pangan di Bawah Tekanan

Sebagai negara agraris dengan wilayah kepulauan terbesar di dunia, Indonesia menempatkan ketahanan pangan sebagai pilar utama keamanan nasional. Sektor pertanian tidak hanya menjadi penyerap tenaga kerja dalam jumlah besar, tetapi juga menopang stabilitas sosial ekonomi. Beras sebagai komoditas pangan pokok memiliki peran strategis yang tidak tergantikan.

Di antara sentra produksi pangan nasional, Provinsi Jawa Tengah merupakan salah satu penghasil padi terbesar. Kabupaten Grobogan, sebagai salah satu lumbung padi utamanya, memiliki kontribusi penting terhadap pasokan nasional. Produksi padi Grobogan mencapai 678.350 ton pada 2023 dan meningkat menjadi 735.187 ton pada 2024.

Namun, di balik capaian tersebut, Grobogan menyimpan kerentanan struktural. Produktivitas yang tinggi sangat bergantung pada kondisi iklim dan ketersediaan air. Sekitar 25% wilayah Grobogan masuk kategori kekeringan berat. Lahan sawah tadah hujan yang mengandalkan curah hujan sering kali mengalami kekeringan dan retak sehingga menyebabkan gagal tanam maupun gagal panen (*puso*). Masalah ini diperburuk oleh degradasi tanah, ditandai dengan rendahnya kandungan bahan organik serta defisiensi hara esensial seperti Fosfor (P) dan Kalium (K), sebagaimana ditunjukkan dalam analisis tanah pada penelitian ini.

1.4. Paradigma Baru: *Climate Smart Agriculture* (CSA) sebagai Solusi Sistemik

Menghadapi kompleksitas tantangan di sektor pertanian, pendekatan *business-as-usual* tidak lagi memadai. Diperlukan paradigma baru yang mampu mengintegrasikan tiga kebutuhan utama secara bersamaan, yaitu

peningkatan produktivitas, ketahanan terhadap perubahan iklim, dan pengurangan emisi GRK. Pendekatan ini dikenal sebagai *Climate Smart Agriculture* (CSA) atau Pertanian Cerdas Iklim.

CSA bukan sekadar paket teknologi tunggal, melainkan sebuah kerangka transformasi sistem pertanian yang bersifat kontekstual. Artinya, praktik yang tepat di satu lokasi mungkin tidak sesuai diterapkan di lokasi lain. Prinsip dasar CSA adalah menyesuaikan teknologi dan praktik pengelolaan lahan dengan kondisi agroekologi setempat, termasuk karakteristik tanah, iklim, dan kapasitas petani dengan tiga pilar utama CSA sebagai berikut:

- **Pilar 1: Produktivitas**

Meningkatkan hasil dan pendapatan pertanian secara berkelanjutan dengan memaksimalkan efisiensi input seperti air, pupuk, dan tenaga kerja.

- **Pilar 2: Adaptasi**

Meningkatkan ketangguhan sistem pertanian terhadap dampak perubahan iklim, seperti kekeringan dan variabilitas curah hujan.

- **Pilar 3: Mitigasi**

Mengurangi emisi GRK dari sektor pertanian dan meningkatkan kemampuan lahan dalam menyerap karbon.

Implementasi CSA sangat selaras dengan komitmen iklim Indonesia dalam *Enhanced Nationally Determined Contribution* (E-NDC), strategi *Long-Term*

Strategy for Low Carbon and Climate Resilience (LTS-LCCR), dan target *Net Zero Emission (NZE)* 2060. Karena itu, validasi teknologi yang terbukti mampu menurunkan emisi GRK secara signifikan memiliki nilai strategis nasional.

1.5. Biochar: Inovasi Teknologi Kunci dalam Kerangka CSA

Di antara berbagai teknologi dalam CSA, biochar menonjol sebagai salah satu solusi paling menjanjikan, khususnya untuk ekosistem sawah. Biochar memiliki kemampuan unik untuk memenuhi ketiga pilar CSA secara simultan.

Biochar adalah arang hayati yang dihasilkan melalui proses pirolisis, yaitu pemanasan biomassa seperti limbah pertanian pada suhu tinggi (350–700°C) dalam kondisi minim oksigen. Proses ini mengubah biomassa menjadi karbon stabil dengan struktur aromatik yang tahan ratusan hingga ribuan tahun. Tidak seperti pembakaran terbuka yang melepaskan hampir seluruh karbon sebagai CO₂, pirolisis mengunci karbon ke dalam bentuk padat yang dapat disimpan di dalam tanah.

Di Grobogan, ketersediaan sekam padi sebagai limbah pertanian sangat melimpah sehingga menjadi bahan baku biochar ideal dalam kerangka ekonomi sirkular. Alih-alih terbuang, membusuk, atau bahkan dibakar, sekam diubah menjadi pembenah tanah bernilai tinggi—sebuah bentuk transformasi limbah menjadi sumber daya. Biochar bekerja melalui dua jalur utama:

1. Pada tanah (Adaptasi & Produktivitas):

- Struktur pori-pori besar meningkatkan kapasitas menahan air.
- Kapasitas Tukar Kation (KTK) sangat tinggi sehingga mampu menahan hara penting (Kalium, Kalsium, Magnesium (Mg)).
- pH cenderung basa, membantu memperbaiki tanah masam.
- Berperan sebagai penyedia hara P dan K.

2. Pada atmosfer (Mitigasi):

- Menyimpan karbon dalam bentuk stabil (carbon sequestration).
- Menekan emisi CH₄ dengan meningkatkan aerasi zona perakaran dan menghambat aktivitas metanogen.

1.6. Tujuan dan Ruang Lingkup

Buku ini disusun untuk memberikan bukti empiris komprehensif mengenai implementasi teknologi CSA-Biochar pada kondisi lapangan di Indonesia.

Tujuan utamanya adalah:

1. **Menganalisis dampak biochar terhadap kesuburan tanah, pertumbuhan tanaman, dan produktivitas padi** di lahan tadah hujan Grobogan.
2. **Mengukur efektivitas biochar dalam memitigasi emisi GRK**, khususnya **CH₄** dan **N₂O**, selama satu musim tanam.
3. **Mengevaluasi kelayakan ekonomi adopsi teknologi ini dengan membandingkan** skenario usaha tani konvensional dan CSA-Biochar.
4. **Merumuskan model bisnis hijau berbasis ekonomi sirkular** yang dapat **direplikasi** dan berkelanjutan bagi petani.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan landasan teoretis, ilmiah, dan kontekstual yang menjadi dasar keseluruhan studi. Penjelasan diberikan untuk memperjelas alasan pemilihan biochar sebagai intervensi utama, permasalahan fundamental yang dihadapi lokasi penelitian, serta mekanisme ilmiah yang mendasari hipotesis penelitian.

2.1. Definisi, Produksi, dan Karakteristik Kunci Biochar

Sebagai komponen inti dalam intervensi teknologi pada penelitian ini, pemahaman mendalam tentang biochar menjadi sangat penting. Biochar bukan sekadar arang biasa, melainkan produk rekayasa material melalui proses pirolisis yang dirancang khusus untuk meningkatkan kualitas lingkungan dan produktivitas pertanian.

Proses pirolisis adalah pemanasan biomassa pada suhu tinggi (350–700°C) dalam kondisi minim oksigen. Tidak seperti pembakaran terbuka yang menghasilkan CO₂, pirolisis memecah struktur biomassa dan mengonsentrasikan sekitar 50% karbon ke dalam struktur aromatik yang stabil (*recalcitrant carbon*). Karbon ini merupakan karbon yang sebelumnya diserap

tanaman dari atmosfer, kemudian diubah menjadi bentuk yang mampu bertahan di dalam tanah selama ratusan hingga ribuan tahun.

Pemilihan sekam padi sebagai bahan baku biochar di Grobogan memiliki dasar yang kuat. Sekam adalah limbah yang melimpah dan seringkali tidak dimanfaatkan. Melalui pirolisis, limbah ini dapat diubah menjadi "emas hitam" yang bernilai tinggi dan berkontribusi pada ekonomi sirkular di tingkat lokal.

Tabel 2.1 menggambarkan karakteristik kimia dan fisik biochar yang digunakan dalam studi ini. Data tersebut menunjukkan kualitas biochar yang sangat baik untuk perbaikan tanah dan penyimpanan karbon.

Tabel 2.1. Karakteristik Awal Biochar Sekam Padi

Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Kategori	Implikasi Agronomi
pH (H ₂ O)	-	8.81	Sangat Basa	Berfungsi sebagai agen pengapuran (<i>liming agent</i>) untuk menetralkan kemasaman tanah.
C-Organik	%	27.41	Sangat Tinggi	Sumber karbon stabil untuk perbaikan struktur tanah

Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Kategori	Implikasi Agronomi
				dan sekuestrasi karbon.
N-Total	%	0.55	Rendah	Biochar bukan sumber N utama, sehingga pupuk N tetap esensial.
P ₂ O ₅ Total	%	0.33	Sedang	Memberikan suplai Fosfor tambahan secara perlahan.
K ₂ O Total	%	1.02	Tinggi	Sumber Kalium yang signifikan, sangat penting untuk pengisian bulir padi.
KTK	cmol/kg	73.43	Sangat Tinggi	Kemampuan luar biasa untuk menahan hara (pupuk) dan air.

Sumber: Analisis LPPS UNDIP (2025)

Interpretasi dari parameter seperti pH basa (8,81) dan KTK sangat tinggi (73,43 cmol/kg) menunjukkan bahwa biochar memiliki kemampuan besar untuk menahan dan menyeimbangkan hara penting. Karakteristik ini menjadikan biochar sebagai pembenah tanah yang mampu meningkatkan efisiensi pemupukan sekaligus menstabilkan struktur tanah.

2.2. Problem Mendasar: Degradasi Lahan Sawah (Studi Kasus Grobogan)

Intervensi apa pun akan tidak efektif jika tidak diawali dengan diagnosis lahan yang akurat. Oleh karena itu, analisis awal tanah di lokasi penelitian—Desa Menawan, Kecamatan Klambu—menjadi langkah penting untuk mengidentifikasi akar masalah yang memengaruhi produktivitas lahan.

2.2.1. Paparan Data Kesuburan Awal (*Baseline*)

Analisis *baseline* memberikan gambaran jelas mengenai kondisi kesuburan tanah sawah tadah hujan di Grobogan. Hasilnya menunjukkan adanya beberapa permasalahan mendasar yang berpotensi membatasi produktivitas, bahkan ketika budaya tanam dilakukan dengan praktik terbaik petani setempat. Hasil analisis sebagaimana tabel 2.2 menunjukkan bahwa sebagian besar parameter hara berada pada kategori rendah hingga sangat rendah.

Tabel 2.2. Karakteristik Awal Tanah Sawah di Lokasi Penelitian (*Baseline*)

Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Kategori	Implikasi Agronomi
pH (H ₂ O)	-	7.14	Netral	Kemasaman tanah bukan masalah utama di lokasi ini.
C-Organik	%	1.22	Rendah	Tanah kekurangan bahan organik; struktur tanah buruk, aktivitas mikroba rendah.
N-Total	%	0.14	Rendah	Menunjukkan ketergantungan tinggi pada pupuk Urea sintetis.
P ₂ O ₅ tersedia	ppm	2.64	Sangat Rendah	Faktor pembatas kritis. Fosfor (P) sangat tidak tersedia bagi tanaman.
K ₂ O tersedia	ppm	16.36	Sangat Rendah	Faktor pembatas kritis. Kalium (K) sangat tidak tersedia bagi tanaman.

Sumber: Analisis LPPS UNDIP (2025)

2.2.2. Interpretasi Diagnosis: Tanah “Sakit” dan “Lapar Hara”

Data *baseline* menunjukkan beberapa temuan penting sebagai berikut:

1. pH Tanah Bukan Masalah Utama:

Dengan pH 7,14 (netral), lokasi penelitian tidak menghadapi isu kemasaman atau kebasaan tanah.

2. Kekurangan Bahan Organik:

Kandungan C-Organik sebesar 1,22% termasuk rendah. Hal ini mengindikasikan struktur tanah yang kurang baik, porositas yang rendah, aktivitas biologi tanah terbatas, serta kapasitas menahan air yang minim.

3. Defisiensi Fosfor dan Kalium:

Ketersediaan P_2O_5 dan K_2O berada pada kategori “Sangat Rendah”. Defisiensi P menghambat pertumbuhan akar dan pembentukan energi tanaman, sementara Kalium sangat penting untuk fotosintesis, regulasi air, dan pengisian bulir padi. Tanah dengan defisiensi P dan K tidak akan mampu menghasilkan hasil optimal, meskipun pupuk nitrogen diberikan dalam jumlah besar.

Temuan ini menunjukkan bahwa tanah di Grobogan mengalami "kelaparan hara" dan membutuhkan intervensi ameliorasi yang mampu menyediakan sekaligus menahan hara agar tidak cepat tercuci.

2.3. Mekanisme Biochar sebagai Amelioran Tanah (Solusi Hipotesis)

Biochar dipilih sebagai solusi karena karakteristiknya sesuai dengan kebutuhan spesifik lahan Grobogan. Karakteristik biochar (Tabel 2.1) secara langsung menjawab masalah kesuburan tanah (Tabel 2.2). Ini menciptakan hubungan “kunci-gembok” yang ideal antara masalah dan solusi.

2.3.1. Perbaikan Sifat Fisik Tanah

Struktur biochar yang berpori menyerupai spons mampu meningkatkan kemampuan tanah dalam menyerap dan menyimpan air. Dalam kondisi tadah hujan seperti Grobogan, peran ini sangat penting untuk mengatasi cekaman kekeringan. Selain itu, aplikasinya mampu menggemburkan tanah yang padat sehingga meningkatkan jumlah pori-pori makro yang membantu aerasi tanah dan kesehatan akar.

2.3.2. Perbaikan Sifat Kimia Tanah

Ini adalah mekanisme paling relevan dengan permasalahan yang ditemukan pada tanah Grobogan. Biochar berperan sebagai:

- Penyedia hara langsung: Kandungan K_2O yang tinggi dan P_2O_5 pada tingkat sedang mampu meningkatkan ketersediaan dua hara yang sangat defisien di tanah awal.

- Penyangga dan penahan hara: KTK yang sangat tinggi memungkinkan biochar menyerap ion-ion hara dari pupuk seperti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan NH_4^+ , sehingga tidak mudah tercuci oleh air hujan.
- Penyeimbang pH: Sifat basa biochar membantu menetralkan tanah masam, meskipun di lokasi penelitian pH sudah netral.

2.3.3. Perbaikan Sifat Biologi Tanah

Pori-pori biochar berfungsi sebagai habitat mikroorganisme menguntungkan. Biochar menyediakan tempat berlindung bagi mikroba dan membantu meningkatkan aktivitas biologi tanah dalam mendekomposisi bahan organik, melarutkan hara, dan meningkatkan kesehatan tanah secara keseluruhan.

2.4. Tantangan Lingkungan: Emisi GRK dari Lahan Sawah

Lahan sawah merupakan sumber emisi dua gas rumah kaca utama, yaitu CH_4 dan N_2O . Keduanya berkontribusi besar terhadap jejak karbon sektor pangan.

2.4.1. Produksi Metana (CH_4)

Metana dihasilkan melalui proses metanogenesis, yaitu dekomposisi bahan organik dalam kondisi anaerobik. Pada lahan sawah yang tergenang, oksigen tidak dapat masuk ke dalam tanah. Kondisi ini menciptakan lingkungan ideal

bagi mikroba metanogen yang memproduksi CH_4 . Emisi CH_4 meningkat selama fase vegetatif ketika bahan organik banyak terdekomposisi.

2.4.2. Produksi Dinitrogen Oksida (N_2O)

Emisi N_2O sangat erat kaitannya dengan penggunaan pupuk nitrogen. N_2O dilepaskan sebagai hasil samping dari dua proses mikrobiologis, yaitu:

- **Nitrifikasi** (kondisi aerobik)
 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$
- **Denitrifikasi** (kondisi anaerobik)
 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ atau N_2O

Siklus penggenangan dan pengeringan pada sawah menciptakan kondisi yang memungkinkan kedua proses berlangsung secara simultan, sehingga meningkatkan potensi emisi N_2O .

2.5. Kerangka Konseptual: Hipotesis Peran Ganda Biochar

Seluruh landasan teoretis di atas membentuk kerangka konseptual yang menjadi dasar penelitian ini. Kerangka ini menghubungkan tiga komponen: **masalah, intervensi, dan hasil yang diharapkan.**

- **Masalah (Konteks Lapangan):**

Fluktuasi hasil panen akibat kekeringan, tanah terdegradasi dengan kandungan C-Organik rendah, defisiensi P dan K, serta tingginya emisi CH_4 dan N_2O dari lahan sawah.

- **Intervensi (Teknologi CSA-Biochar):**

Aplikasi biochar sekam padi dosis 4 ton/ha dengan karakteristik pH basa, C-Organik tinggi, KTK sangat tinggi, serta kandungan K dan P yang mendukung pertumbuhan tanaman.

- **Hipotesis Hasil (Tiga Pilar CSA):**

(1) Biochar akan memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah sehingga meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman (Pilar Adaptasi & Produktivitas).

(2) Biochar akan meningkatkan aerasi tanah, menghambat aktivitas metanogen, dan secara signifikan menurunkan emisi CH_4 (Pilar Mitigasi).

(3) Secara keseluruhan, aplikasi biochar akan mewujudkan integrasi ketiga pilar CSA secara simultan.

BAB 3. METODOLOGI IMPLEMENTASI DI LAPANGAN

Bab ini menguraikan secara rinci desain penelitian, metode pengumpulan data, dan tahapan operasional dalam uji coba lapangan (*field trial*) yang digunakan untuk menguji hipotesis tiga pilar CSA-Biochar. Metodologi dirancang secara sistematis agar mampu memberikan bukti kuantitatif yang kuat mengenai dampak biochar terhadap produktivitas, adaptasi, dan mitigasi.

3.1. Lokasi, Waktu, dan Desain Penelitian

Penelitian dilakukan pada lahan sawah tadah hujan milik petani di Desa Menawan, Kecamatan Klambu, Kabupaten Grobogan, Jawa Tengah. Lokasi ini dipilih karena mewakili kondisi agroekologi yang umum dijumpai pada lahan-lahan padi di Grobogan, terutama masalah kekeringan musiman dan defisiensi hara P dan K sebagaimana diidentifikasi pada Bab 2.

Kegiatan penelitian berlangsung selama satu musim tanam (Mei–Agustus 2025), mencakup seluruh siklus produksi padi. Desain penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) di lahan seluas 3.600 m², dengan dua perlakuan utama, yaitu:

- **P0 (Kontrol):** Praktik budidaya standar petani setempat tanpa aplikasi biochar.
- **P1 (Biochar):** Aplikasi biochar sekam padi dengan dosis 4 ton/ha.

Seluruh praktik budidaya selain aplikasi biochar (pemupukan, varietas, metode tanam, dan manajemen air) disamakan antara kedua perlakuan. Hal ini memastikan bahwa perbedaan hasil antara P0 dan P1 dapat diatribusikan secara langsung pada efek biochar sebagai intervensi utama.

3.2. Prosedur Aplikasi dan Budidaya

Implementasi perlakuan mengikuti Standar Operasional Prosedur (SOP) agar setiap tahapan dapat direplikasi secara konsisten oleh peneliti maupun petani.

Tahap 1: Pengolahan Lahan Awal (Bajak)

Lahan terlebih dahulu dibajak satu kali untuk membalik tanah dan memecah lapisan keras sehingga memudahkan pencampuran biochar pada tahap berikutnya.

Tahap 2: Aplikasi Biochar (P1)

Biochar ditimbang sesuai dosis (4 ton/ha atau 0,4 kg/m²), kemudian ditebar merata pada permukaan tanah yang telah dibajak. Penebaran dilakukan secara manual agar distribusinya merata.

Tahap 3: Pengolahan Lahan Lanjutan (Garuk/Pelumpuran)

Lahan kemudian digaru dan dilumpurkan. Proses ini sangat penting karena memastikan biochar tercampur homogen ke dalam lapisan olah tanah (kedalaman 0–20 cm), yaitu zona aktif perakaran tanaman.

Tahap 4: Pemupukan Dasar dan Penanaman

- Bahan tanam: Varietas padi Inpari 32.
- Pemupukan dasar (H-5 sebelum tanam): SP-36 (159 kg/ha) + KCl (50 kg/ha).
- Bibit umur 21 hari setelah semai (HSS) ditanam dengan jarak 20 cm × 20 cm.

Tahap 5: Pemupukan Susulan

Pupuk diberikan secara identik untuk P0 dan P1 agar efek biochar tidak bias:

- **Susulan I (5 HST):** Urea 50 kg/ha

- **Susulan II (21 HST):** Urea 100 kg/ha + KCl 50 kg/ha
- **Susulan III (42 HST):** Urea 50 kg/ha

Total pupuk kimia per hektar:

✓ Urea 200 kg

✓ SP-36 159 kg

✓ KCl 100 kg

Tahap 6: Pemeliharaan Tanaman

Meliputi pengairan dengan metode intermiten, penyiangan gulma, dan pengendalian OPT menggunakan pendekatan terpadu (*Integrated Pest Management*). Metode irigasi berselang juga sekaligus mendukung pengurangan emisi CH₄ (pilar mitigasi).

3.3. Metode Pengukuran Variabel (Pengumpulan Data)

Untuk menguji hipotesis tiga pilar CSA, data yang dikumpulkan dikelompokkan menjadi tiga komponen utama: kualitas tanah (adaptasi), performa agronomis (produktivitas), dan emisi GRK (mitigasi).

3.3.1. Analisis Tanah (Pilar Adaptasi)

Sampel tanah komposit dari setiap petak perlakuan (P0 dan P1) diambil setelah panen. Analisis dilakukan di LPPS UNDIP terhadap parameter pH, C-Organik, N-Total, P_2O_5 tersedia, dan K_2O tersedia. Tujuannya adalah untuk mengetahui perubahan sifat kimia tanah akibat aplikasi biochar, serta membandingkannya dengan data *baseline* pada Bab 2.

3.3.2. Pengamatan Agronomi (Pilar Produktivitas)

Pengamatan dilakukan pada dua fase utama, yaitu:

a. Fase Vegetatif (33 HST)

Parameter yang diukur:

- Tinggi tanaman (cm)
- Jumlah anakan produktif (batang)

b. Fase Generatif dan Pasca Panen

Parameter yang diukur:

- Persentase bulir isi (%)
- Bobot 1.000 butir (g)
- Kadar air gabah (%)

- Produktivitas Gabah Kering Panen (GKP) melalui metode ubinan

Seluruh data hasil ubinan dikonversi ke produktivitas per hektar.

3.3.3. Pengukuran Emisi Gas Rumah Kaca (Pilar Mitigasi)

Metode yang digunakan adalah ***closed static chamber***, standar internasional untuk pengukuran fluks GRK dari lahan sawah.

a. Peralatan

Sungkup statis berukuran 50 × 50 × 100 cm dipasang di petak P0 dan P1.

b. Jadwal Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan mingguan mulai 19–87 HST, mencakup fase vegetatif hingga generatif.

c. Prosedur Pengambilan Sampel

Saat sungkup ditutup, gas di dalamnya diambil dengan syringe 20 mL pada menit ke-0, 10, 20, dan 30. Sampel disimpan dalam *vacuum vial* 10 mL.

d. Analisis Laboratorium

- Gas CH₄ dianalisis menggunakan Gas Kromatografi (GC) dengan Flame Ionization Detector (FID).
- Gas N₂O dianalisis menggunakan Electron Capture Detector (ECD).

Data konsentrasi digunakan untuk menghitung fluks harian.

3.4. Analisis Data

Seluruh data dianalisis secara kuantitatif menggunakan metode statistik dan konversi standar GWP (*Global Warming Potential*).

a. Analisis Sifat Tanah dan Agronomi

Perbandingan antara P0 dan P1 diuji menggunakan metode statistik seperti Uji-t atau ANOVA untuk mengetahui signifikansi perbedaan.

b. Analisis Emisi GRK

Fluks harian dihitung dari laju peningkatan konsentrasi gas dalam sungkup. Emisi kumulatif dihitung dengan mengintegrasikan fluks harian selama satu musim tanam.

c. Konversi ke GWP (kg CO₂eq)

Emisi CH₄ dan N₂O dikonversi ke satuan yang sama menggunakan nilai GWP 100 tahun:

- CH₄ = 34
- N₂O = 298

Total GWP digunakan untuk mengukur jejak karbon dan efisiensi mitigasi.

d. Analisis Ekonomi

Biaya dan penerimaan usaha tani dianalisis untuk menghitung R/C Ratio dan BEP (dibahas lebih lanjut di Bab 6).

BAB 4. HASIL DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan temuan empiris dari implementasi biochar terhadap dua pilar pertama *Climate Smart Agriculture* (CSA), yaitu **Adaptasi (perbaikan kesehatan tanah)** dan **Produktivitas (peningkatan hasil panen)**. Data kuantitatif menunjukkan bagaimana aplikasi biochar 4 ton/ha memberikan dampak positif yang signifikan terhadap sifat kimia tanah, performa pertumbuhan tanaman, serta hasil akhir produksi gabah.

4.1. Perbaikan Kualitas Tanah (Bukti Pilar Adaptasi)

Sebagaimana ditunjukkan pada analisis *baseline* di Bab 2, tanah di lokasi penelitian mengalami defisiensi hara P dan K yang tergolong kritis. Hasil analisis tanah pascapanen menunjukkan bahwa aplikasi biochar mampu meningkatkan dua unsur hara tersebut secara signifikan. Perubahan ini menjadi indikator penting membaiknya kesehatan tanah setelah satu musim tanam. Tabel 4.1 menyajikan perubahan sifat kimia tanah pada P0 (kontrol) dan P1 (biochar).

Tabel 4.1. Perbandingan Kualitas Kimia Tanah Akhir (Pasca Panen)

Parameter	Satuan	Kontrol (P0)	Biochar (P1)	Perubahan	Keterangan
pH (H ₂ O)	-	7.11	7.17	+0.8%	Tetap netral, stabil.
C-Organik	%	1.24	1.32	+6.45%	Peningkatan awal C-Organik.
P ₂ O ₅ tersedia	ppm	2.96	4.11	+38.85%	Sangat Signifikan.
K ₂ O tersedia	ppm	20.89	24.11	+15.41%	Signifikan.

Sumber: Analisis LPPS UNDIP (2025)

Hasil analisis sebagaimana tabel 4.1 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kualitas kimia tanah melalui aplikasi biochar.

- **Peningkatan P₂O₅ tersedia +38,85%**

Peningkatan ini sangat signifikan dan selaras dengan karakter biochar yang bersifat basa serta memiliki KTK tinggi. Kedua sifat tersebut membantu meningkatkan kelarutan fosfat dan mencegah fiksasi P oleh mineral tanah.

- **Peningkatan K_2O tersedia +15,41%**

Biochar sekam padi mengandung kalium relatif tinggi, sehingga memberikan suplai langsung. KTK yang sangat tinggi juga membantu menahan ion K agar tidak cepat tercuci.

- **C-Organik meningkat +6,45%**

Kenaikan ini menandai awal pemulihan struktur tanah dan bertambahnya aktivitas mikroorganisme.

- **pH tanah tetap stabil (netral)**

Hal ini menunjukkan biochar tidak menyebabkan perubahan reaksi tanah secara berlebihan.

Secara keseluruhan, temuan tersebut memperlihatkan bahwa biochar mampu memperbaiki tanah pada musim tanam pertama, dan efek ini diperkirakan semakin kuat pada musim tanam berikutnya karena sifat residu biochar yang persisten.

4.2. Respons Pertumbuhan Vegetatif Tanaman

Perbaikan kondisi tanah berpengaruh langsung pada pertumbuhan vegetatif tanaman. Pengamatan pada 33 Hari Setelah Tanam (HST) menunjukkan

bahwa tanaman pada lahan yang diberi biochar tumbuh lebih baik dibanding lahan kontrol. Tabel 4.2 menyajikan perbandingan pertumbuhan vegetatif pada P0 dan P1.

Tabel 4.2. Perbandingan Pertumbuhan Vegetatif (33 HST)

Parameter	Satuan	Kontrol (P0)	Biochar (P1)	Perubahan (%)
Tinggi Tanaman	cm	61.2	74.6	+21.9%
Jumlah Anakan	batang	17.7	20.2	+14.1%

Sumber: Data Lapangan (2025)

Pengamatan pada 33 HST menunjukkan dua parameter kunci:

1. Tinggi tanaman meningkat +21,9%

Ini menunjukkan bahwa tanaman pada lahan biochar tumbuh lebih cepat, mendapatkan suplai hara yang lebih baik, serta memiliki sistem perakaran yang lebih sehat.

2. Jumlah anakan meningkat +14,1%

Jumlah anakan yang lebih banyak menjadi indikator penting keberhasilan fase vegetatif karena berpotensi meningkatkan jumlah malai produktif pada fase generatif.

Peningkatan vegetatif ini konsisten dengan perbaikan ketersediaan P dan K, di mana Fosfor mendukung perkembangan akar dan Kalium mengatur turgor sel dan fotosintesis.

4.3. Dampak pada Komponen Hasil Panen

Peningkatan pada fase vegetatif kemudian tercermin pada kualitas hasil panen. Data menunjukkan adanya peningkatan pada persentase bulir isi serta penurunan kadar air panen, yang menjadi indikator fisiologis penting dalam produksi padi. Tabel 4.3 menyajikan perbandingan komponen hasil panen antara P0 dan P1.

Tabel 4.3. Perbandingan Komponen Hasil Panen

Parameter	Satuan	Kontrol (P0)	Biochar (P1)	Keterangan
Persentase Bulir Isi	%	87.70	90.20	Peningkatan pengisian bulir.
Kadar Air Panen	%	12.80	11.30	Pematangan lebih cepat/serempak.
Bobot 1000 Butir	g	26.21	26.95	Relatif sama (tidak signifikan).

Sumber: Data Lapangan (2025)

Hasil dari tabel tersebut menjelaskan hal-hal sebagai berikut:

1. Persentase bulir isi meningkat dari 87,70% menjadi 90,20%

Peran Kalium sangat penting pada fase pengisian bulir, sehingga peningkatan ketersediaan K di tanah menghasilkan bulir yang lebih terisi penuh.

2. Kadar air gabah lebih rendah pada P1 (11,30% vs 12,80%)

Tanaman pada lahan biochar menunjukkan pematangan bulir yang lebih cepat dan serempak. Secara praktis, hal ini mengurangi biaya pengeringan dan meningkatkan kualitas gabah.

3. Bobot 1.000 butir relatif sama

Ini menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas lebih disebabkan oleh bertambahnya jumlah bulir berisi, bukan ukuran bulir.

Hasil ini mengonfirmasi bahwa biochar tidak hanya meningkatkan pertumbuhan, tetapi juga meningkatkan efisiensi fisiologis tanaman.

4.4. Peningkatan Produktivitas Akhir (Bukti Pilar Produktivitas)

Produktivitas GKP merupakan indikator utama keberhasilan budidaya. Hasil ubinan yang dikonversi ke satuan hektar menunjukkan peningkatan

produktivitas pada perlakuan biochar. Tabel 4.4 menunjukkan perbandingan produktivitas GKP antara P0 dan P1.

Tabel 4.4. Perbandingan Produktivitas Gabah Kering Panen (GKP)

Perlakuan	Produktivitas (ton/ha)	Peningkatan (ton/ha)	Peningkatan (%)
P0 (Kontrol)	6.19	-	-
P1 (Biochar 4 ton/ha)	6.58	+0.39	+6.3%

Sumber: Data Lapangan (2025)

Data menunjukkan bahwa terjadi peningkatan produktivitas sebesar 0,39 ton/ha (6,3%) menjadi 6,58 ton/ha (P1 Biochar) dari *business as usual* 6,19 ton/ha (P0 Kontrol).

Peningkatan ini merupakan hasil akumulatif dari perbaikan kesuburan tanah, pertumbuhan vegetatif yang lebih kuat, jumlah anakan lebih banyak, serta persentase bulir isi yang lebih tinggi.

Efek ini cukup signifikan untuk musim tanam pertama, mengingat banyak penelitian menunjukkan bahwa dampak biochar biasanya lebih besar pada musim kedua dan ketiga karena sifat residu biochar.

Hasil ini menunjukkan bahwa biochar tidak hanya memperbaiki tanah, tetapi juga meningkatkan hasil secara nyata, menjadikannya teknologi yang selaras dengan pilar produktivitas CSA.

BAB 5. HASIL DAN ANALISIS

Bab ini membahas dampak aplikasi biochar terhadap emisi GRK dari lahan sawah, yang merupakan pilar ketiga dalam pendekatan *Climate Smart Agriculture* (CSA). Fokus utama analisis adalah dua gas yang paling berkontribusi terhadap jejak karbon sistem persawahan, yaitu Metana (CH_4) dan Dinitrogen Oksida (N_2O). Melalui metode pengukuran yang konsisten, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa biochar mampu memberi dampak mitigasi yang sangat signifikan, khususnya terhadap pengurangan emisi CH_4 .

5.1. Dinamika Fluks Gas Rumah Kaca (GRK)

Pengukuran fluks GRK dilakukan setiap minggu sejak 19 hingga 87 HST menggunakan metode *closed static chamber*. Hasil pengamatan menunjukkan pola emisi yang berbeda antara perlakuan tanpa biochar (P0) dan perlakuan dengan biochar (P1).

Pada lahan kontrol (P0), fluks CH_4 cenderung mengalami peningkatan tajam terutama pada fase vegetatif ketika dekomposisi bahan organik berlangsung pada kondisi anaerob. Lingkungan sawah yang tergenang, minim oksigen, dan kaya bahan organik memberikan kondisi ideal bagi mikroorganisme metanogen yang menghasilkan CH_4 . Puncak-puncak emisi terjadi pada waktu

tertentu ketika kondisi anaerob mencapai titik optimum, sehingga produksi metana meningkat secara signifikan.

Sebaliknya, pada lahan dengan biochar (P1), fluks CH_4 menunjukkan pola yang jauh lebih stabil dan berada pada tingkat yang rendah sepanjang musim tanam. Hal ini mengindikasikan bahwa biochar memberikan pengaruh nyata terhadap perubahan kondisi mikro tanah. Struktur biochar yang berpori meningkatkan aerasi dan memungkinkan lebih banyak oksigen masuk ke zona perakaran, sehingga mengurangi dominasi kondisi anaerob. Dalam kondisi seperti ini, mikroorganisme metanogen menjadi kurang aktif, sehingga produksi CH_4 menurun tajam. Temuan ini selaras dengan teori pada Bab 2 yang menjelaskan bahwa biochar dapat menciptakan kondisi yang kurang menguntungkan bagi pembentukan metana.

Untuk N_2O , fluks keduanya—baik pada P0 maupun P1—menunjukkan pola yang fluktuatif tetapi pada tingkat yang relatif rendah. Tidak tampak adanya perbedaan signifikan antarperlakuan. Hal ini penting karena beberapa intervensi pertanian yang menekan emisi CH_4 dapat memicu peningkatan emisi N_2O . Namun, dalam penelitian ini, biochar tidak menunjukkan efek samping semacam itu. Dengan kata lain, biochar berhasil menurunkan emisi CH_4 secara substansial tanpa meningkatkan emisi N_2O .

5.2. Analisis Emisi Kumulatif per Musim Tanam

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai dampak biochar terhadap emisi GRK, fluks harian yang dikumpulkan selama musim tanam diintegrasikan menjadi emisi kumulatif. Tabel 5.1 menampilkan perbandingan emisi GRK kumulatif per musim tanam.

Tabel 5.1. Perbandingan Emisi GRK Kumulatif per Musim Tanam

Parameter	Satuan	Kontrol (P0)	Biochar (P1)	Penurunan (%)
Emisi CH ₄	kg C/ha	100.26	17.73	-82.3%
Emisi N ₂ O	kg N/ha	0.14	0.24	(Tidak Signifikan).

Sumber: Data Analisis (2025)

Hasil analisis menunjukkan bahwa emisi CH₄ turun sangat drastis akibat aplikasi biochar. Pada lahan kontrol, emisi CH₄ mencapai 100,26 kg C/ha per musim tanam, sedangkan pada perlakuan biochar hanya 17,73 kg C/ha. Penurunan sebesar 82,3 persen ini merupakan temuan yang luar biasa, mengingat sawah merupakan salah satu sumber emisi metana terbesar secara global. Penurunan signifikan ini memberikan bukti kuat bahwa biochar

efektif dalam menghambat proses metanogenesis yang umumnya dominan di lahan sawah.

Untuk emisi N_2O , perbedaan antara kedua perlakuan terlihat sangat kecil dan tidak signifikan secara statistik. Pada P0, emisi tercatat sebesar 0,14 kg N/ha, sedangkan pada P1 sedikit meningkat menjadi 0,24 kg N/ha. Perbedaan ini masih berada dalam batas variasi alami yang umum terjadi dalam sistem sawah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa aplikasi biochar tidak menyebabkan peningkatan risiko emisi N_2O .

Temuan utama dari bagian ini adalah bahwa biochar memberikan manfaat mitigasi bersih (*net mitigation*) pada sistem persawahan. Penurunan CH_4 yang sangat signifikan tidak disertai peningkatan N_2O , sehingga total pengurangan emisi GRK bersih menjadi sangat besar.

5.3. Dampak terhadap Potensi Pemanasan Global (GWP)

Untuk menilai dampak iklim secara menyeluruh, emisi CH_4 dan N_2O dikonversi ke satuan setara CO_2 menggunakan nilai *Global Warming Potential* (GWP) 100 tahun, yaitu 34 untuk CH_4 dan 298 untuk N_2O . Konversi ini memberikan gambaran yang lebih komparatif mengenai kontribusi masing-masing gas terhadap pemanasan global. Tabel 5.2 menyajikan perbandingan total GWP per musim tanam.

Tabel 5.2. Perbandingan Total GWP per Musim Tanam

Sumber Emisi	Satuan	Kontrol (P0)	Biochar (P1)	Penurunan (%)
GWP dari CH ₄	kg CO ₂ eq	4,545.08	803.82	-82.3%
GWP dari N ₂ O	kg CO ₂ eq	64.19	75.24	(Tidak Signifikan)
Total GWP	kg CO₂eq	4,609.27	879.06	-80.93%

Sumber: Data Analisis (2025)

Dari tabel tersebut terlihat bahwa GWP dari CH₄ pada lahan kontrol mencapai 4.545,08 kg CO₂eq/ha, sementara pada perlakuan biochar hanya 803,82 kg CO₂eq/ha. Penurunan sebesar 82,3 persen ini konsisten dengan penurunan emisi CH₄ pada bagian sebelumnya, mengingat CH₄ merupakan penyumbang terbesar jejak karbon lahan sawah.

Kontribusi N₂O terhadap total GWP jauh lebih kecil. Meski nilai N₂O sedikit lebih tinggi pada P1, peningkatan tersebut tidak signifikan dan tidak mengubah keseluruhan tren penurunan. Total GWP turun dari 4.609,27 kg CO₂eq/ha pada P0 menjadi 879,06 kg CO₂eq/ha pada P1, atau menurun sebesar 80,93%.

Penurunan GWP sebesar lebih dari 80 persen ini menunjukkan bahwa aplikasi biochar mampu menekan jejak karbon budidaya padi secara drastis hanya

dalam satu musim tanam. Hasil ini memiliki implikasi strategis bagi mitigasi perubahan iklim, khususnya pada skala lahan sawah luas di Indonesia.

5.4. Efisiensi Karbon: Yield-Scaled GWP (GWPy)

Selain mengukur total emisi, penelitian ini juga menilai efisiensi karbon melalui indikator Yield-Scaled GWP (GWPy), yaitu rasio antara total GWP dan hasil gabah. Indikator ini memberikan gambaran seberapa efisien lahan menghasilkan pangan dalam konteks emisi yang dihasilkan. Tabel 5.3 menyajikan perbandingan intensitas emisi per kilogram gabah.

Tabel 5.3. Perbandingan Intensitas Emisi per Kilogram Gabah (GWPy)

Parameter	Satuan	Kontrol (P0)	Biochar (P1)	Perbaikan (%)
Total GWP	kg CO ₂ eq	4,609.27	879.06	-80.93%
Hasil GKG	kg/ha	6,190	6,580	+6.3%
GWPy (GWP/Hasil)	kg CO₂eq/kg Gabah	0.7446	0.1336	-82.02%

Sumber: Data Analisis (2025)

Hasil menunjukkan bahwa intensitas emisi per kilogram gabah pada lahan kontrol adalah 0,7446 kg CO₂eq/kg gabah, sementara pada lahan biochar

turun menjadi 0,1336 kg CO₂eq/kg gabah. Artinya, gabah yang dihasilkan dari lahan biochar memiliki jejak karbon 6,3 kali lebih rendah dibandingkan gabah dari lahan kontrol.

Penurunan intensitas emisi sebesar 82,02 persen ini menunjukkan bahwa biochar bukan hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga meningkatkan efisiensi produksi pangan dari perspektif iklim. Dengan demikian, biochar menghasilkan *low-carbon rice* yang berpotensi memiliki nilai tambah di rantai pasok pangan masa depan, terutama dalam konteks pasar yang semakin peduli terhadap keberlanjutan.

BAB 6. ANALISIS KELAYAKAN EKONOMI DAN MODEL BISNIS HIJAU

Setelah pada Bab 4 dan Bab 5 dibuktikan bahwa biochar mampu meningkatkan produktivitas dan menurunkan emisi secara signifikan, pertanyaan berikutnya adalah: **Apakah teknologi ini layak diadopsi secara ekonomi oleh petani?**

Bab ini menyajikan analisis usaha tani berdasarkan tiga skenario, serta menawarkan model bisnis hijau berbasis ekonomi sirkular yang dapat menjamin keberlanjutan adopsi jangka panjang.

6.1. Metodologi dan Skenario Analisis Usaha Tani

Analisis kelayakan finansial dilakukan dengan membandingkan tiga skenario usaha tani untuk satu musim tanam (MT) di lahan seluas 1 hektar:

- **Skenario 1: Kontrol (P0)**

Petani menggunakan praktik konvensional sebagaimana dilakukan selama ini, tanpa aplikasi biochar.

- **Skenario 2: CSA-Biochar (Beli)**

Petani membeli biochar dalam bentuk jadi dari pasar atau produsen lokal.

- **Skenario 3: CSA-Biochar (Produksi Mandiri)**

Petani atau kelompok tani memproduksi biochar sendiri menggunakan alat pirolisis sederhana.

Asumsi Utama Analisis

- Sewa lahan (5 bulan): Rp 14.500.000
- Harga jual GKP: Rp 6.800/kg
- Harga biochar beli: Rp 3.500.000/ton
- Dosis biochar: 4 ton/ha
- Produktivitas (per data penelitian):
 - ❖ P0 = 6.19 ton/ha
 - ❖ P1 (beli) = 6.58 ton/ha
 - ❖ P1 (produksi mandiri) = estimasi 6.4 ton/ha
- Satu musim tanam = 5 bulan

Asumsi ini konsisten dengan kondisi lapangan dan harga input-output aktual di Grobogan pada tahun penelitian.

6.2. Analisis Kelayakan Finansial (Musim Tanam Pertama)

Tabel 6.1 memperlihatkan hasil perhitungan biaya, pendapatan, dan keuntungan bersih dari ketiga skenario. Secara umum, musim tanam pertama menunjukkan bahwa penerapan biochar—baik melalui pembelian maupun produksi mandiri—masih berada dalam fase investasi. Pada fase ini, pendapatan bersih dari skenario biochar sedikit lebih rendah dibanding skenario kontrol karena adanya biaya tambahan untuk membeli atau memproduksi biochar.

Namun demikian, analisis menunjukkan bahwa produktivitas padi pada skenario biochar meningkat cukup signifikan. Pada skenario biochar beli, produktivitas meningkat sebesar 6,3 persen, sedangkan pada skenario produksi mandiri, peningkatannya diperkirakan sebesar 3,4 persen. Peningkatan ini terjadi meskipun ini adalah musim tanam pertama, di mana biasanya tanah masih berada dalam tahap awal adaptasi terhadap biochar.

Tabel 6.1. Analisis Perbandingan Usaha Tani per Hektar (1 Musim Tanam)

Komponen Analisis	Satuan	Skenario 1 (Kontrol)	Skenario 2 (Biochar Beli)	Skenario 3 (Biochar Produksi)
A. Hasil Panen (GKP)	kg/ha	6,190	6,580	6,400
B. Total Penerimaan (A x Rp 6.800)	Rp	42,160,000	44,880,000	43,520,000
---	---	---	---	---
C. Biaya Produksi (Total C1+C2)	Rp	30,450,000	33,966,000	33,247,000
C1. Biaya Tetap				
Sewa Lahan (5 bulan)	Rp	14,500,000	14,500,000	14,500,000
C2. Biaya Variabel				
Saprodi (Benih, Pupuk, Pestisida)	Rp	4,410,000	4,410,000	4,410,000
Tenaga Kerja (Olah Lahan s/d Panen)	Rp	11,540,000	11,540,000	11,540,000
Biaya Tambahan Biochar (Produksi)	Rp	-	-	2,197,000
Biaya Tambahan Biochar (Pembelian)	Rp	-	2,916,000	-
Biaya Tambahan (Tenaga Sebar)	Rp	-	600,000	600,000

Komponen Analisis	Satuan	Skenario 1 (Kontrol)	Skenario 2 (Biochar Beli)	Skenario 3 (Biochar Produksi)
---	---	---	---	---
D. Pendapatan bersih (B-C)	Rp	11,710,000	10,914,000	10,273,000
E. R/C Ratio (B/C)	-	1.39	1.32	1.30
F. BEP Produksi	kg/ha	4,478	4,995	4,889
G. BEP Harga	Rp/kg	4,911	5,146	5,195

Sumber: Data Analisis (2025)

Hal penting lainnya adalah bahwa titik impas (Break Even Point/BEP) baik untuk hasil panen maupun harga masih berada jauh di bawah hasil dan harga aktual. Ini berarti bahwa risiko kerugian relatif rendah dan usaha tani masih berada pada posisi aman secara finansial.

Interpretasi ini memberikan keyakinan bahwa biochar merupakan teknologi yang tidak membahayakan kondisi ekonomi petani, bahkan ketika manfaat penuh biochar belum muncul pada tahun pertama.

1. Semua skenario menguntungkan (R/C Ratio > 1)

- Kontrol: 1.39
- Biochar beli: 1.32

- Biochar produksi mandiri: 1.30

Ketiga skenario menunjukkan bahwa usaha tani padi pada dasarnya layak secara finansial.

2. Pendapatan bersih sedikit lebih rendah pada tahun pertama untuk skenario biochar

Hal ini **bukan karena biochar tidak menguntungkan**, tetapi karena adanya **investasi awal** untuk pembelian atau produksi biochar. Pada musim tanam berikutnya, sebagian besar manfaat biochar masih bertahan (efek residu), sehingga biaya menurun sementara produktivitas relatif bertahan atau meningkat.

3. Produktivitas lebih tinggi pada biochar

- +6,3% pada skenario biochar beli
- +3,4% (estimasi) pada skenario produksi mandiri

Kenaikan produktivitas terjadi bahkan pada tahun pertama, yang umumnya masih masa awal adaptasi tanah terhadap biochar.

4. Titik impas (BEP) tetap aman

- BEP produksi skenario biochar masih berada jauh di bawah hasil aktual.
- BEP harga berada jauh di bawah harga jual pasar.

Artinya, risiko kerugian relatif rendah.

6.3. Interpretasi Kelayakan dan Proyeksi Jangka Panjang

Analisis lanjutan menunjukkan bahwa biochar merupakan investasi jangka panjang yang memberikan manfaat meningkat dari tahun ke tahun. Pada tahun kedua dan ketiga, manfaat ekonomi biochar menjadi lebih besar karena sifat residu biochar yang dapat bertahan di tanah selama dua hingga lima tahun. Efek residu ini memperbaiki struktur tanah, meningkatkan KTK, memperkaya ketersediaan P dan K, serta meningkatkan aktivitas mikroba tanah.

Dengan semakin membaiknya kondisi tanah, petani dapat mulai mengurangi penggunaan pupuk kimia, terutama SP-36 dan KCl. Potensi penghematan pupuk pada tahun kedua dan ketiga diperkirakan mencapai 10 hingga 25 persen, bergantung pada kondisi lahan dan pola tanam. Penghematan ini akan langsung menurunkan biaya produksi dan meningkatkan keuntungan.

Pada saat biaya pupuk menurun sementara produktivitas meningkat, R/C Ratio (Revenue/Cost Ratio) pada skenario biochar berpotensi melampaui skenario kontrol. Dengan demikian, biochar bukan hanya biaya tambahan, melainkan investasi jangka panjang yang memberikan hasil berkelanjutan.

1. Musim pertama adalah fase investasi

Pada tahun pertama, pendapatan bersih sedikit menurun karena adanya biaya untuk:

- pembelian biochar (P1-beli), atau
- produksi biochar (P1-produksi mandiri) yang membutuhkan tenaga tambahan dan biaya bahan bakar.

2. Tahun kedua dan ketiga: manfaat meningkat, biaya menurun

Biochar memiliki sifat **persisten** di dalam tanah. Efek residunya dapat bertahan 2–5 tahun, terutama dalam hal:

- peningkatan KTK tanah
- peningkatan ketersediaan P dan K
- perbaikan struktur tanah
- peningkatan aktivitas mikroba

Efek residu menyebabkan petani dapat **mengurangi dosis pupuk kimia**, terutama SP-36 dan KCl.

Potensi penghematan pupuk pada tahun kedua dan ketiga diperkirakan mencapai **10–25%**, tergantung kondisi lahan dan pola tanam.

3. Profitabilitas jangka panjang melampaui skenario kontrol

Pada saat biaya pupuk menurun dan produktivitas meningkat, **R/C Ratio skenario biochar berpotensi melampaui skenario kontrol**.

Ini menunjukkan bahwa adopsi biochar merupakan **investasi jangka panjang**, bukan biaya musiman.

6.4. Model Bisnis Hijau: Ekonomi Sirkular dan Pasar Karbon

Temuan mitigasi (Bab 5) dan kelayakan ekonomi (Bab 6) membuka peluang kuat untuk membangun sebuah **model bisnis hijau** yang tidak hanya menguntungkan petani, tetapi juga mendukung target lingkungan nasional.

Model bisnis ini terdiri dari tiga elemen, yaitu:

A. Proposisi Nilai Utama: “Dua Produk dari Satu Lahan”

Dengan CSA-Biochar, petani menghasilkan:

- Produk utama: Beras dengan produktivitas lebih tinggi.
- Produk sekunder: Penurunan jejak karbon (80,93%) yang dapat diubah menjadi kredit karbon melalui skema MRV yang tervalidasi.

Artinya, petani dapat memperoleh **dua sumber pendapatan** dari satu aktivitas budidaya.

B. Siklus Ekonomi Sirkular di Tingkat Desa

Konsep ekonomi sirkular yang diusulkan melibatkan:

- Limbah pertanian (sekam padi) → diolah menjadi biochar
- Biochar → meningkatkan hasil padi
- Hasil padi → menghasilkan jerami yang dapat dikembalikan ke lahan
- Jejak karbon rendah → dikonversi menjadi kredit karbon

Unit produksi biochar dapat berada di tingkat:

- Kelompok tani (Poktan)
- Gabungan kelompok tani (Gapoktan)
- BUMDes

Unit ini dapat mengoperasikan tungku pirolisis sederhana (Kon-Tiki atau drum retort), menciptakan lapangan kerja lokal.

C. Peluang Pasar Karbon untuk Monetisasi Mitigasi

Penurunan emisi CH₄ sebesar 82,3% dan total GWP sebesar 80,93% membuka peluang langsung untuk:

1. Sertifikasi kredit karbon berbasis pertanian (*agriculture carbon credits*)

Dengan MRV yang memadai (*monitoring, reporting, verification*), nilai mitigasi dapat dijual pada:

- pasar karbon sukarela (*voluntary carbon market*), atau
- program pemerintah daerah/nasional (misal: SRN-KLHK).

2. Skema pembiayaan berbasis hasil (*results-based payments*)

Lembaga donor internasional seperti GCF, ADB, FAO, atau JICA memiliki skema pembiayaan yang memberikan insentif berdasarkan pengurangan emisi terverifikasi.

3. Produk beras rendah emisi (*low-carbon rice*)

Model ini membuka peluang branding dan nilai tambah produk, termasuk akses pasar premium.

BAB 7. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI STRATEGIS

Bab ini memberikan rangkuman komprehensif dari hasil penelitian yang telah disajikan pada Bab 4, 5, dan 6. Kesimpulan yang disusun mencerminkan keberhasilan teknologi CSA-Biochar dalam mencapai tiga pilar *Climate Smart Agriculture* sekaligus, yaitu **produktivitas, adaptasi, dan mitigasi**. Bab ini juga menyajikan implikasi strategis dan rekomendasi kebijakan untuk mendorong adopsi yang lebih luas di tingkat petani maupun pemerintah.

7.1. Kesimpulan Strategis

Penelitian ini memberikan bukti empiris yang kuat bahwa teknologi CSA-Biochar merupakan pendekatan yang efektif, berkelanjutan, dan layak diterapkan dalam sistem pertanian padi tadah hujan di Kabupaten Grobogan. Secara ringkas, temuan utama dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pilar Produktivitas: Peningkatan hasil panen sebesar 6,3%

Aplikasi biochar 4 ton/ha menghasilkan peningkatan produktivitas GKP dari 6,19 ton/ha menjadi 6,58 ton/ha pada musim tanam pertama. Peningkatan ini merupakan hasil dari:

- Pertumbuhan vegetatif lebih baik;

- Jumlah anakan yang lebih banyak;
- Persentase bulir isi lebih tinggi; dan
- Pematangan bulir lebih seragam.

Hal ini menunjukkan bahwa biochar mampu meningkatkan efisiensi fisiologis tanaman dalam memanfaatkan hara dan sumber daya lingkungan.

2. Pilar Adaptasi: Perbaikan signifikan pada kesuburan tanah

Biochar secara nyata meningkatkan ketersediaan hara makro kritis pada tanah Grobogan:

- P_2O_5 meningkat sebesar **38,85%**,
- K_2O meningkat sebesar **15,41%**,
- C-Organik meningkat **6,45%**.

Peningkatan ini mengatasi masalah defisiensi hara yang sebelumnya menjadi faktor pembatas utama produktivitas, sekaligus meningkatkan ketahanan tanah terhadap kekeringan dan degradasi.

3. Pilar Mitigasi: Penurunan GWP sebesar 80,93%

Biochar mampu menekan emisi Metana (CH_4)—gas rumah kaca utama pada lahan sawah—sebesar **82,3%**. Karena CH_4 mendominasi jejak

karbon sawah, penurunan ini menghasilkan total GWP yang turun drastis hingga **80,93%** per hektar per musim.

Selain itu, *Yield-Scaled GWP* (GWP_{Py}) menunjukkan peningkatan efisiensi karbon sebesar **82%**, menghasilkan beras dengan jejak karbon **6,3 kali lebih rendah** dibanding metode konvensional.

4. Kelayakan Ekonomi: Semua skenario usaha tani layak (R/C Ratio > 1,30)

Meskipun pendapatan bersih pada musim tanam pertama sedikit menurun akibat biaya investasi awal biochar, analisis menunjukkan bahwa:

- Teknologi CSA-Biochar sangat layak secara ekonomi;
- Manfaatnya bersifat kumulatif pada tahun kedua dan ketiga; dan
- Potensi penghematan pupuk kimia meningkat seiring bertambahnya tahun.

Dalam jangka panjang, kelayakan ekonominya berpotensi melampaui skenario praktik konvensional.

7.2. Implikasi dan Rekomendasi

Berdasarkan bukti ilmiah dan analisis ekonomi, penelitian ini memberikan implikasi kebijakan yang kuat bagi berbagai pemangku kepentingan, terutama dalam konteks pencapaian target *Net Zero Emission* (NZE) 2060 dan pembangunan ekonomi hijau nasional.

Rekomendasi strategis di bawah ini disusun untuk mendorong adopsi biochar secara lebih luas, sistematis, dan terintegrasi.

1. Untuk Pemerintah Daerah (Dinas Pertanian, Bappeda)

Peran: Fasilitator, agregator inovasi, dan akselerator adopsi teknologi.

Rekomendasi:

- Integrasikan CSA-Biochar ke dalam kurikulum penyuluhan PPL.
- Laksanakan program demplot (*demonstration plot*) di kecamatan-kecamatan prioritas.
- Fasilitasi pembentukan Unit Produksi Biochar (UPB) melalui Dana Desa, Dinas Pertanian, atau BUMDes.
- Masukkan biochar sebagai komponen dukungan dalam program subsidi atau bantuan saprodi daerah.

2. Untuk Regulator dan Lembaga Keuangan (BI, OJK, Perbankan)

Peran: Penyedia akses keuangan hijau dan insentif pembiayaan.

Rekomendasi:

- Kembangkan skema pembiayaan seperti KUR Hijau, Kredit CSA, atau insentif bunga rendah untuk adopsi biochar.
- Gunakan data R/C Ratio ($>1,30$) sebagai bukti bahwa usaha tani berbasis biochar bersifat *bankable*.
- Integrasikan biochar sebagai bagian dari skema pembiayaan hijau nasional dan taksonomi hijau Indonesia.
- Dorong inovasi pembiayaan berbasis kinerja seperti *results-based financing* untuk penurunan emisi.

3. Untuk Akademisi dan Lembaga Penelitian (Universitas, BPTP, Litbang)

Peran: Penghasil pengetahuan ilmiah dan pendamping petani.

Rekomendasi:

- Lakukan riset multi-tahun untuk memvalidasi efek residu biochar terhadap dosis pupuk N-P-K.
- Teliti dosis optimal (2–4–6 ton/ha) dan variasi jenis biomassa sebagai bahan baku.
- Kembangkan model MRV sederhana untuk petani agar penurunan emisi dapat diklaim secara kredibel.
- Lakukan pendampingan Poktan dalam pengolahan biochar dan penerapan SOP di lapangan.

4. Untuk Sektor Swasta (Industri Pupuk, Produsen Biochar, Pelaku Pasar Karbon)

Peran: Penggerak komersialisasi dan investasi hijau.

Rekomendasi:

- Kembangkan produk pupuk-biochar terintegrasi (*biochar-enriched fertilizer*).
- Produksi tungku pirolisis yang murah, efisien, dan mudah dioperasikan petani.
- Bangun rantai nilai biochar dari desa ke pasar komersial.
- Kembangkan metodologi kredit karbon berbasis penurunan emisi CH₄ dari lahan sawah.

Implikasi Nasional

Jika direplikasi secara luas pada lahan sawah Indonesia yang mencapai ±11 juta hektar, teknologi CSA-Biochar memiliki dampak strategis:

1. meningkatkan ketahanan pangan,
2. menurunkan emisi nasional secara signifikan,
3. memperkuat ekonomi desa melalui ekonomi sirkular,
4. membuka pasar baru (karbon & komoditas rendah emisi).

LAMPIRAN 1

PANDUAN TEKNIS UNTUK PETANI & KELOMPOK TANI (POKTAN)

Bagian ini menyajikan langkah-langkah teknis yang dapat langsung diterapkan oleh petani dalam memproduksi, mengaktivasi, dan mengaplikasikan biochar pada lahan sawah padi. SOP disusun untuk menjamin efektivitas biochar sekaligus memudahkan adopsi di tingkat lapangan.

TAHAP 1: PRA-TANAM (PRODUKSI & PERSIAPAN LAHAN)

1.1. Produksi Biochar Mandiri (Rekomendasi Poktan)

Bahan baku:

- Gunakan sekam padi kering dari penggilingan sebagai bahan utama.
- Pastikan sekam bersih dan tidak bercampur tanah atau bahan basah.

Metode produksi:

- Gunakan alat pirolisis sederhana seperti drum retort, Kon-Tiki, atau tungku manual lainnya.
- Proses dilakukan dalam kondisi minim oksigen (bukan pembakaran terbuka).

Prosedur:

- Isi tungku dengan sekam padi secara bertahap.
- Lakukan pembakaran terkendali sehingga sekam berubah menjadi arang (biochar), bukan abu putih.
- Saat proses selesai, padamkan dengan cara *quenching*:
 - ❖ disiram air, atau
 - ❖ tungku ditutup rapat untuk menghentikan suplai oksigen.

Kriteria kualitas biochar:

- Warna hitam pekat
- Ringan dan berpori
- Hancur bila diremas, namun tidak menjadi debu halus seperti abu

Biochar berkualitas baik memiliki kemampuan penyerapan hara dan air yang tinggi, serta memberikan manfaat optimal bagi tanah.

1.2. “Charging” atau Aktivasi Biochar (Sangat Dianjurkan)

Biochar yang baru diproduksi bersifat seperti spons kosong—mampu menyerap nutrisi, tetapi belum mengandung hara. Oleh karena itu, sebelum

diaplikasikan ke lahan, biochar sebaiknya di-charge agar dapat menyediakan hara sejak awal.

Metode aktivasi:

- Campurkan biochar dengan pupuk kandang matang atau kompos.
- Alternatif: rendam dalam larutan nutrisi organik (POC, urine kelinci, MOL).

Proporsi:

- 3 bagian kompos : 1 bagian biochar.

Lama aktivasi:

- 1–2 minggu di tempat teduh dan lembap.

Aktivasi membantu mempercepat manfaat biochar pada musim tanam pertama.

1.3. Pengolahan Lahan Tahap I (Bajak)

- Lakukan pembajakan seperti biasa untuk membalik tanah.
- Jerami sebaiknya tidak dibakar; lebih baik dikomposkan atau ditanamkan.

Pembajakan awal memudahkan pencampuran biochar pada tahap berikutnya.

TAHAP 2: APLIKASI BIOCHAR (TAHAP KRUSIAL)

2.1. Dosis Aplikasi

- Gunakan dosis 4 ton/ha.
- Setara dengan:
 - **0,4 kg/m²**, atau
 - **400 kg untuk lahan 1.000 m² (10 are).**

Dosis ini adalah dosis yang sudah terbukti efektif dalam penelitian.

2.2. Waktu dan Cara Aplikasi

Waktu aplikasi:

- Dilakukan setelah pembajakan dan sebelum penggaruan/pelumpuran.

Cara aplikasi:

- Tebarkan biochar secara merata di seluruh permukaan lahan.

- Pastikan biochar merata agar perbaikan hara dan struktur tanah optimal.
- Segera lakukan penggaruan atau pelumpuran untuk mencampur biochar ke dalam tanah (kedalaman 0–20 cm).

Peringatan:

- Jangan menebar biochar di lahan yang sudah tergenang penuh karena biochar akan mengapung dan tidak tercampur.
- Jangan menunda pelumpuran terlalu lama.

TAHAP 3: PENANAMAN DAN PEMELIHARAAN

3.1. Penanaman

- Gunakan varietas unggul seperti Inpari 32.
- Tanam bibit umur 21 HSS.
- Gunakan jarak tanam 20 × 20 cm.

3.2. Pemupukan Berimbang (Mengikuti Dosis Studi)

Biochar tidak menggantikan pupuk kimia pada tahun pertama, tetapi meningkatkan efisiensinya.

Dosis Pemupukan:

Pupuk Dasar (H-5 Tanam):

- SP-36: 159 kg/ha
- KCl: 50 kg/ha

Pupuk Susulan I (5 HST):

- Urea: 50 kg/ha

Pupuk Susulan II (21 HST):

- Urea: 100 kg/ha
- KCl: 50 kg/ha

Pupuk Susulan III (42 HST):

- Urea: 50 kg/ha

Dosis ini sudah teruji efektif dan memberikan hasil optimal pada musim pertama.

3.3. Manajemen Air (Kunci Penurunan CH₄)

Pengelolaan air menjadi komponen penting dalam mitigasi GRK.

Panduan:

- Hindari penggenangan tinggi secara terus-menerus.
- Gunakan pola irigasi intermiten (berselang):
 - ❖ genangi tipis,
 - ❖ biarkan surut,
 - ❖ ulangi sesuai kebutuhan tanaman.
- Pada periode awal vegetatif, biarkan tanah sedikit mengering (retak rambut).

Metode ini membantu menekan emisi CH₄ tanpa mengurangi pertumbuhan tanaman.

TAHAP 4: PANEN DAN SIKLUS BERIKUTNYA

4.1. Panen

- Panen dilakukan seperti biasa.
- Gabah dari lahan biochar biasanya memiliki kadar air lebih rendah (sekitar 11–12%).

4.2. Pengelolaan Jerami

- Jangan membakar jerami.
- Kembalikan ke lahan sebagai kompos atau bahan organik.

4.3. Musim Tanam Berikutnya

Biochar bersifat **persisten**, sehingga tidak perlu diaplikasikan kembali setiap musim.

Rekomendasi:

- Aplikasi ulang setiap 2–3 tahun, dengan dosis lebih rendah (1–2 ton/ha).
- Mulai evaluasi pengurangan pupuk kimia (terutama SP-36 dan KCl) pada tahun kedua.

LAMPIRAN 2

PANDUAN STRATEGIS UNTUK PEMANGKU KEPENTINGAN (*STAKEHOLDER*)

***Toolkit* Penskalaan CSA-Biochar**

Bagian ini memberikan panduan strategis untuk memperluas adopsi teknologi CSA-Biochar di tingkat kabupaten, provinsi, dan nasional.

1. Untuk Pemerintah Daerah (Dinas Pertanian, Bappeda)

Peran: Fasilitator, diseminator teknologi, dan perancang kebijakan.

Tindakan konkret:

- Jadikan CSA-Biochar bagian dari materi penyuluhan rutin PPL.
- Bangun demplot biochar di setiap kecamatan prioritas.
- Fasilitasi pembentukan unit produksi biochar desa melalui BUMDes, Poktan, atau Gapoktan.
- Integrasikan program ini dalam RPJMDes dan RKPD.

2. Untuk Regulator & Lembaga Keuangan (BI, OJK, Perbankan)

Peran: Penyedia akses pembiayaan hijau.

Tindakan:

- Kembangkan produk pembiayaan seperti KUR Hijau atau Kredit CSA.
- Integrasikan biochar sebagai proyek hijau dalam taksonomi keuangan berkelanjutan.
- Sediakan insentif bunga rendah untuk investasi tungku pirolisis.
- Gunakan data R/C Ratio > 1,3 sebagai dasar penilaian bankability petani biochar.

3. Untuk Akademisi & Lembaga Penelitian (Universitas, BPTP)

Peran: Pendamping teknis dan penghasil inovasi lanjutan.

Tindakan:

- Lakukan riset multi-tahun mengenai residu biochar dan penurunan dosis pupuk kimia.

- Kembangkan biochar dari berbagai bahan baku lokal.
- Susun metodologi MRV yang sederhana untuk pengukuran penurunan emisi CH₄.
- Libatkan mahasiswa KKN untuk membantu produksi dan pelatihan biochar di desa.

4. Untuk Sektor Swasta (Industri, Pasar Karbon)

Peran: Pengembang pasar dan pemacu investasi hijau.

Tindakan:

- Kembangkan pupuk plus biochar sebagai produk komersial.
- Produksi tungku pirolisis yang murah, efisien, dan *mobile*.
- Kembangkan rantai pasok biochar dari desa ke industri.
- Bangun metodologi verifikasi kredit karbon dari sektor sawah.