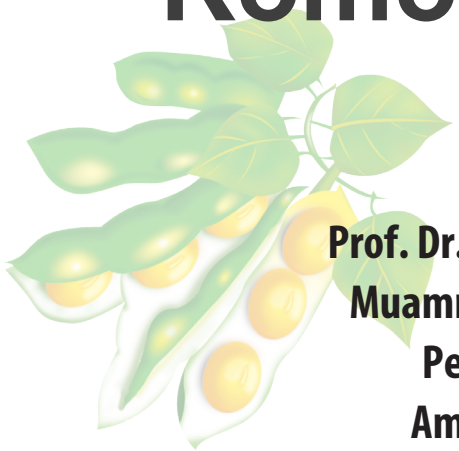
Optimalisasi Biochar dan Asam Humat untuk Ketahanan Pangan Komoditas Kedelai

Prof. Dr. Ir. Susila Herlambang, M.Si
Muammar Gomareuzzaman, S.Si.
Perwitasari, S.T., M.Eng.
Amara Seva Azalikha, S.P.
Wahyu Tri Muhardi, S.P.





Mitra Wacana Media
PENERBIT

Optimalisasi Biochar dan Asam Humat untuk Ketahanan Pangan Komoditas Kedelai

Prof. Dr. Ir. Susila Herlambang, M.Si
Muammar Gomareuzzaman, S.Si.
Perwitasari, S.T., M.Eng.
Amara Seva Azalikha, S.P.
Wahyu Tri Muhardi, S.P.

Edisi Asli
Hak Cipta © 2026 : Penulis
Diterbitkan : **Penerbit Mitra Wacana Media**
Telp. : (021) 824-31931
Faks. : (021) 824-31931
Website : http//www.mitrawacanamedia.com
E-mail : mitrawacanamedia@gmail.com
Office : Vila Nusa Indah 3 Blok KE.2 No.14
Bojongkulur-Gunung Putri. Bogor

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

UNDANG-UNDANG NOMOR 28 TAHUN 2014 TENTANG HAK CIPTA

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial **dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).**
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial **dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).**
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial **dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).**
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, **dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).**

Susila Herlambang, Muammar Gomareuzzaman, Perwitasari, Amara Seva Azalikha, Wahyu Tri Muhardi

Optimalisasi Biochar dan Asam Humat untuk Ketahanan Pangan Komoditas Kedelai

—Jakarta: Mitra Wacana Media, 2026
1 jil., 17 × 24 cm, 176 hal.
Anggota IKAPI No: 410/DKI/2010

ISBN: 978-602-318-614-3

1. Teknik Pertanian 2. Optimalisasi Biochar
I. Judul II. Susila Herlambang, Muammar Gomareuzzaman, Perwitasari, Amara Seva Azalikha, Wahyu Tri Muhardi

KATA PENGANTAR

Kami mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas tersusun dan terselesaikannya buku referensi bertajuk "Optimalisasi Biochar dan Asam Humat untuk Ketahanan Pangan Komoditas Kedelai". Buku ini hadir untuk membahas salah satu persoalan penting dalam ketahanan pangan yang tidak hanya dihadapi Indonesia tetapi juga berbagai negara lainnya, yaitu pemenuhan kebutuhan kedelai di tengah keterbatasan sumber daya lahan.

Pemanfaatan lahan marginal, seperti lahan pasir pantai di wilayah Samas, Bantul, Yogyakarta, menawarkan peluang sekaligus tantangan teknis yang besar. Karakteristik tanah Pasir pantai yang umumnya memiliki porositas tinggi, tetapi kemampuan dalam mempertahankan unsur hara relatif rendah, memerlukan penerapan teknologi pembenahan tanah (*soil ameliorant*) yang tepat dan efektif. Buku ini membahas secara komprehensif pemanfaatan biochar dan asam humat, baik secara terpisah maupun dalam kombinasi, sebagai upaya memperbaiki kualitas dan kesuburan tanah sekaligus mendukung peningkatan produktivitas tanaman kedelai.

Buku ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai salah satu sumber rujukan bagi akademisi, peneliti, praktisi di bidang pertanian, maupun para pemangku kebijakan dalam menyusun dan mengembangkan

strategi budidaya pertanian yang berkelanjutan, khususnya pada wilayah pesisir. Penyusunan buku ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada tim peneliti Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta serta seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi, baik melalui hasil penelitian, penyediaan kata, maupun kajian literatur terkini yang menjadi landasan dalam penyusunan buku ini.

Yogyakarta

Prof. Dr. Ir. Susila Herlambang, M.Si
Muammar Gomareuzzaman, S.Si.
Perwitasari, S.T., M.Eng.
Amara Seva Azalikha, S.P.
Wahyu Tri Muhardi, S.P.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **iii**
DAFTAR ISI ..... **v**
DAFTAR GAMBAR ..... **xi**
Daftar Gambar xi

BAB 1 URGENSI KETAHANAN PANGAN KEDELAI DAN PEMANFAATAN LAHAN MARGINAL **1**
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Urgensi Ketahanan Pangan Kedelai 3
1.2.1. Meningkatnya Kebutuhan Konsumsi Nasional *5*
1.2.2. Ketergantungan terhadap Impor *8*
1.2.3. Sumber Protein Nabati Berkualitas *9*
1.2.4. Nilai Ekonomi yang Tinggi *9*
1.2.5. Mendukung Kemandirian Pangan Nasional *10*
1.3. Tantangan Pengembangan Produksi Kedelai 10
1.3.1 Tantangan Utama Budidaya Kedelai di Lahan Marginal *11*
1.3.2 Rencana Strategi Pengembangan Berkelanjutan *11*
1.4. Lahan Marginal Sebagai Potensi Pengembangan Kedelai 13
1.5. Peluang Pemanfaatan Lahan Marginal Untuk Budidaya Kedelai 14
1.5.1. Efisiensi Pemanfaatan Sumber Daya Lahan *15*
1.5.2. Perbaikan Kesuburan Tanah *15*
1.5.3. Mendukung Pertanian Berkelanjutan *16*
1.5.4. Peningkatan Pendapatan Masyarakat *16*

Bab 2 Karakteristik Tanah Pasir Pantai, Kendala dan Tantangan 17
2.1. Pendahuluan..... 17
2.2. Karakteristik Tanah Pasir Pantai (Pasir pantai)..... 18
2.2.1. Asal Usul dan Proses Pembentukan..... 21
2.2.2. Karakteristik Fisik..... 23
2.3. Karakteristik Kimia Tanah..... 35
2.3.1. Kandungan Material Organik Rendah..... 36
2.3.2. Kapasitas pertukaran kation (KPK) Rendah..... 36
2.3.3. Kandungan Unsur Hara Rendah..... 37
2.3.4. Salinitas pada Wilayah Tertentu..... 37
2.3.5. Reaksi Tanah (pH)..... 37
2.4. Karakteristik Biologi Tanah..... 38
2.4.1. Populasi Mikroorganisme Rendah..... 38
2.4.2. Aktivitas Biologi Rendah..... 39
2.4.3. Biomassa Mikroba Terbatas..... 39
2.5. Kendala Pemanfaatan Tanah Pasir Pantai untuk Pertanian 39
2.5.1. Rendahnya Efisiensi Pemupukan..... 40
2.5.2. Ketersediaan Air Terbatas..... 40
2.5.3. Produktivitas Tanaman Rendah..... 41
2.5.4. Risiko Kekeringan Tinggi..... 41
2.5.5. Ancaman Perubahan Iklim..... 41
2.6. Tantangan dan Peluang Pengelolaan Tanah Pasir Pantai . 42
2.7. Implikasi terhadap Budidaya Kedelai..... 43
2.8. Kesimpulan..... 44

Bab Peran Biochar sebagai Soil Ameliorant..... 45
3.1. Pendahuluan..... 45
3.2. Konsep Biochar sebagai Soil Ameliorant..... 47
3.3. Karakteristik Biochar yang Mendukung Perbaikan Tanah 47
3.3.1. Struktur Berpori..... 48
3.3.2. Kandungan Karbon Stabil..... 49
3.3.3. Kapasitas pertukaran kation Tinggi..... 49
3.3.4. Stabilitas Kimia..... 50
3.4. Peran Biochar terhadap Sifat Fisik Tanah..... 50

3.4.1. Meningkatkan Kapasitas Menahan Air *50*
3.4.2. Memperbaiki Struktur Tanah *51*
3.4.3. Mengurangi Kepadatan Isi (Bulk Density) *51*
3.4.4. Mengurangi Erosi dan Kehilangan Air *52*
3.5. Peran Biochar terhadap Sifat Kimia Tanah 52
3.5.1. Meningkatkan Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) *52*
3.5.2. Meningkatkan Efisiensi Pemupukan *54*
3.5.3. Menstabilkan Reaksi Tanah (pH) *56*
3.5.4. Mengurangi Pelindian Unsur Hara *58*
3.6. Peran Biochar terhadap Sifat Biologi Tanah 58
3.6.1. Menyediakan Habitat Mikroorganisme *58*
3.6.2. Meningkatkan Aktivitas Mikroba Tanah *58*
3.6.3. Mendukung Simbiosis dengan Mikroba Menguntungkan ... *59*
3.6.4. Stimulasi Pertumbuhan Akar *59*
3.7. Peran Biochar pada Tanah Pasir Pantai (Pasir pantai) 59
3.8. Aplikasi Biochar pada Budidaya Kedelai 60
3.9. Biochar dalam Perspektif Pertanian Berkelanjutan dan Mitigasi Perubahan Iklim 60
3.10. Kesimpulan 61

Bab 4 Asam Humat: Timulasi Pertumbuhan dan Sinergi dengan Biochar 63
4.1. Pendahuluan 63
4.2. Konsep dan Karakteristik Asam Humat 64
4.2.1. Pengertian Asam Humat *64*
4.2.2. Sifat Kimia Asam Humat *65*
4.3. Mekanisme Kerja Asam Humat di Dalam Tanah 65
4.3.1. Meningkatkan Kapasitas pertukaran kation *66*
4.3.2. Membentuk Kompleks Organo-Mineral *66*
4.3.3. Meningkatkan Ketersediaan Unsur Hara *66*
4.4. Asam Humat sebagai Biostimulan Pertumbuhan Tanaman 66
4.4.1. Merangsang Pertumbuhan Akar *67*
4.4.2. Meningkatkan Fotosintesis *68*
4.4.3. Meningkatkan Aktivitas Enzim *69*
4.4.4. Memacu Produksi Fitohormon *69*
4.5. Peran Asam Humat dalam Meningkatkan Ketahanan Tanaman terhadap Cekaman 70
4.5.1. Cekaman Kekeringan *70*

4.5.2. Cekaman Salinitas *70*
4.5.3. Cekaman Logam Berat *70*
4.6. Sinergi Asam Humat dengan Biochar 71
4.6.1. Peningkatan Retensi Air *71*
4.6.2. Peningkatan Efisiensi Unsur Hara *72*
4.6.3. Meningkatkan Aktivitas Mikroba Tanah *73*
4.6.4. Pembentukan Agregat Tanah yang Lebih Stabil *73*
4.7. Aplikasi pada Tanah Pasir Pantai (Pasir pantai) 73
4.8. Implikasi terhadap Budidaya Kedelai 75
4.9. Prospek Pengembangan dalam Pertanian Berkelanjutan. 77
4.10. Kesimpulan 77

Bab 5 Strategi Optimalisasi Budidaya Kedelai: Formulasi dan Teknik Aplikasi .. 79
5.1. Kedelai merupakan komoditas pangan strategis 79
5.2. Prinsip Optimalisasi Budidaya Kedelai pada Lahan Marginal 81
5.3. Formulasi Amelioran untuk Budidaya Kedelai 82
5.3.1. Biochar sebagai Pembenah Tanah *82*
5.3.2. Asam Humat sebagai Biostimulan *83*
5.3.3. Pupuk Organik *84*
5.3.4. Pupuk Hayati *84*
5.4. Sinergi Antar-Komponen Formulasi 84
5.5. Teknik Aplikasi pada Budidaya Kedelai 86
5.5.1. Aplikasi Sebelum Tanam *87*
5.5.2. Perlakuan Benih (Seed Treatment) *87*
5.5.3. Aplikasi Saat Penanaman *88*
5.5.4. Aplikasi Selama Pertumbuhan Vegetatif *88*
5.5.5. Pengelolaan Fase Generatif *88*
5.6. Pengelolaan Air pada Tanah Pasir Pantai 89
5.7. Pengelolaan Hara Terpadu (Integrated Nutrient Management) 89
5.8. Evaluasi Keberhasilan Strategi Optimalisasi 90
5.9. Implikasi terhadap Pertanian Berkelanjutan 92
5.10. Arah Pengembangan Formulasi Berbasis Biochar–Asam Humat–Kasgot 93
5.11. Kesimpulan 94

Bab 6 Dampak Lingkungan dan Keberlanjutan (SDGs)..... 95
6.1. Pertanian pada abad ke-21..... 95
6.2. Konsep Keberlanjutan dalam Sistem Pertanian 96
6.2.1. Keberlanjutan Lingkungan..... 97
6.2.2. Keberlanjutan Ekonomi 97
6.2.3. Keberlanjutan Sosial..... 97
6.3. Dampak Lingkungan Pengelolaan Lahan Marginal..... 97
6.3.1. Perbaikan Kualitas Tanah..... 98
6.3.2. Rehabilitasi Lahan Terdegradasi 98
6.3.3. Konservasi Air..... 99
6.3.4. Pengurangan Erosi dan Degradasi Tanah 99
6.4. Kontribusi terhadap Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim..... 100
6.4.1. Penyimpanan Karbon (Carbon Sequestration) 100
6.4.2. Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca..... 100
6.4.3. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim..... 101
6.5. Efisiensi Pemanfaatan Sumber Daya Alam..... 101
6.5.1. Pemanfaatan Limbah Biomassa 102
6.5.2. Pengurangan Ketergantungan terhadap Input Kimia..... 103
6.5.3. Peningkatan Efisiensi Penggunaan Air..... 103
6.6. Kontribusi terhadap Keanekaragaman Hayati Tanah..... 104
6.7. Kontribusi terhadap Sustainable Development Goals (SDGs) 105
6.7.1. SDG 2: Zero Hunger (Tanpa Kelaparan)..... 106
6.7.2. SDG 6: Clean Water and Sanitation (Air Bersih dan Sanitasi Layak)..... 106
6.7.3. SDG 12: Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab (Responsible Consumption and Production)..... 106
6.7.4. SDG 13: Climate Action (Penanganan Perubahan Iklim)..... 106
6.7.5. SDG 15: Life on Land (Menjaga Ekosistem Daratan)..... 107
6.7.6. SDG 8: Decent Work and Economic Growth (Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi)..... 107
6.7.7. SDG 9: Industry, Innovation and Infrastructure (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur)..... 107
6.8. Tantangan Implementasi..... 108
6.9. Prospek Pengembangan..... 108
6.10. Kesimpulan..... 109

Bab 7 BIOCHAR DAN ASAM HUMAT UNTUK KETAHANAN PANGAN 111

7.1. Peran Biochar dan Asam Humat dalam Pengembangan Kedelai pada Lahan Marginal Pasir Pantai..... 111

7.2. Pengunaan Bahan Pembenah Tanah Biochar dan Asam Humat untuk Lahan Marginal..... 116

7.2.1. Pengembangan Teknologi kedepan pada Biochar dan Asam Humat 118

7.2.2. Kebijakan Pengunaan Lahan marginal untuk Ketahanan Pangan..... 120

7.2.3. Strategi Pengelolaan Kedelai pada Lahan Marginal Pasir Pantai..... 122

7.2.4 Keberhasilan Pengembangan Biochar dan Asam Humat... 126

7.3. Pembangunan Pertanian Kedelai pada Lahan Marginal yang Ramah Lingkungan untuk Ketahanan Pangan..... 133

7.4. Kerangka Strategis untuk Mewujudkan Pembangunan Pertanian Ramah Lingkungan..... 137

7.4.1 Pengelolaan/Manajemen Tanah..... 138

7.4.2 Efisiensi Irigasi 142

7.4.3 Diversifikasi Pangan 143

7.4.4 Pengendalian Hama Terpadu (PHT) 143

7.4.5 Penerapan Teknologi Hijau..... 144

7.5. Tahapan Implementasi Jangka Panjang..... 145

7.5.1 Fase 1: Transisi & Edukasi (Tahun 1–2) 146

7.5.2 Fase 2: Skala Industri & Infrastruktur (Tahun 3–5)..... 148

7.5.3 Fase 3: Mandiri & Berkelanjutan (Tahun >5)..... 149

DAFTAR PUSTAKA 153

GLOSARIUM 159

TENTANG PENULIS 161

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Tanaman Kedelai Lahan Pasir	2
Gambar 2.1	Lahan Pasir Pantai Samas	17
Gambar 2.2.	Tanah Pasir Pantai Samas	19
Gambar 2.3	Pengamatan Tanah Pasir Pantai Samas	22
Gambar 3.1	Biochar Berbahan Baku dari Tempurung Kelapa dan Sekam Padi	46
Gambar 3.2	Biochar Halus	46
Gambar 3.3	Bentuk dan ukuran struktur ronga (void) biochar berbahan tempurung kelapa (Herlambang et al., 2019)	48
Gambar 3.4.	Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap KPK Tanah Pasir Pantai	53
Gambar 3.5.	Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap N-total Tanah Pasir Pantai	55
Gambar 3.6	Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap P-tersedia Tanah Pasir Pantai	55
Gambar 3.7	Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap pH Tanah Pasir Pantai	57
Gambar 4.1	Asam Humat Cair	63
Gambar 4.2	Nilai Tinggi Tanaman Kedelai yang Diberi Perlakuan Biochar Sekam Padi dan Asam Humat	67
Gambar 4.6.	Jumlah Polong Tanaman Kedelai yang Diberi Perlakuan Biochar Sekam Padi dan Asam Humat	76
Gambar 5.1	Tanaman Kedelai	80
Gambar 5.2	Tanaman Kedelai	81
Gambar 5.3	Skema Aplikasi Biochar Sekam Padi dan Asam Humat pada Budidaya Kedelai	86

BAB 1

URGENSI KETAHANAN PANGAN KEDELAI DAN PEMANFAATAN LAHAN MARGINAL

1.1. LATAR BELAKANG

Ketahanan pangan menjadi salah satu unsur penting dalam mewujudkan pembangunan nasional yang berkelanjutan. Pemenuhan kebutuhan pangan yang memadai, aman, bergizi, serta dapat dijangkau oleh masyarakat memiliki kaitan erat dengan kestabilan ekonomi, kondisi sosial, dan tingkat kesehatan penduduk. Dalam konteks Indonesia, kedelai (Glycine max L.) termasuk salah satu komoditas strategis yang mempunyai posisi penting dalam mendukung ketahanan pangan. Komoditas ini dikenal sebagai salah satu sumber protein nabati yang banyak dikonsumsi masyarakat dan diolah menjadi beragam produk pangan, antara lain tempe, tahu, kecap, susu kedelai, serta berbagai produk pangan fungsional. Pemanfaatan kedelai tidak terbatas pada kebutuhan konsumsi rumah tangga, tetapi juga mencakup industri pangan dan industri pakan ternak. Kondisi tersebut menjadikan kebutuhan terhadap kedelai relatif tinggi dan cenderung mengalami peningkatan sejalan dengan pertumbuhan penduduk, perubahan pola konsumsi, serta perkembangan berbagai sektor industri yang menggunakan kedelai sebagai bahan baku.

Ketahanan pangan kedelai di Indonesia berada dalam kondisi kritis akibat ketergantungan impor yang sangat tinggi. Sebagian besar kebutuhan kedelai nasional terutama untuk industri olahan pangan lokal seperti tahu dan tempe masih dipenuhi dari pasar internasional. Di sisi lain, alih fungsi

lahan produktif di Pulau Jawa terus membatasi area tanam konvensional. Luas areal tanam kedelai di tanah subur terus menyusut akibat terdesak oleh komoditas pangan lain seperti padi dan jagung serta konversi lahan pertanian menjadi kawasan pemukiman dan industri.



Gambar 1.1 Tanaman Kedelai Lahan Pasir

Pemanfaatan lahan marginal untuk budidaya kedelai tidak hanya menjawab tantangan keterbatasan lahan subur, tetapi juga menjadi benteng utama dalam mengurangi ketergantungan impor pangan. Keberhasilan strategi ini memerlukan integrasi antara dukungan regulasi pemerintah, pendampingan teknologi kepada petani, serta jaminan kepastian harga jual di tingkat penangkar dan petani. Meskipun produksi

kedelai memiliki tingkat konsumsi yang tinggi, namun secara nasional masih belum mampu memenuhi kebutuhan dalam negeri. Kondisi tersebut menyebabkan Indonesia masih bergantung pada impor kedelai dalam jumlah besar setiap tahunnya. Ketergantungan terhadap impor tidak hanya meningkatkan kerentanan terhadap fluktuasi harga global dan perubahan kebijakan perdagangan internasional, tetapi juga berpotensi mengganggu stabilitas ketahanan pangan nasional apabila terjadi gangguan pasokan dunia. Oleh karena itu, peningkatan produksi kedelai domestik menjadi salah satu prioritas dalam pembangunan sektor pertanian.

Ketahanan pangan kedelai perlu ditempatkan dalam hubungan yang lebih luas antara kebutuhan pangan, ketersediaan lahan, dan kemampuan sistem produksi mempertahankan hasil. Kedelai bukan hanya komoditas yang dipanen untuk memenuhi kebutuhan protein, tetapi juga bagian dari rantai pangan yang melibatkan petani, pengolah, pedagang, industri pangan, dan konsumen. Karena itu, persoalan produksi kedelai tidak dapat dipisahkan dari persoalan kualitas sumber daya lahan. Ketika lahan produktif semakin terbatas, pemanfaatan lahan marginal menjadi salah satu pilihan yang perlu dikembangkan dengan pendekatan yang mampu memperbaiki faktor pembatas tanpa menimbulkan tekanan baru terhadap lingkungan.

1.2. URGENSI KETAHANAN PANGAN KEDELAI

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2012 tentang Pangan, ketahanan pangan merupakan kondisi ketika kebutuhan pangan, mulai dari tingkat negara sampai perseorangan, dapat terpenuhi secara memadai. Kondisi tersebut ditunjukkan oleh ketersediaan pangan yang cukup, baik dari segi jumlah maupun kualitas, aman untuk dikonsumsi, beragam, bergizi, dapat diperoleh secara merata, serta memiliki harga yang dapat dijangkau oleh masyarakat. Dalam kaitannya dengan pemenuhan

kebutuhan pangan nasional, kedelai mempunyai peranan yang cukup penting karena menjadi salah satu sumber protein nabati yang relatif mudah diperoleh dan harganya masih terjangkau bagi sebagian besar masyarakat Indonesia.

Kebutuhan kedelai nasional Indonesia mengalami defisit yang cukup tinggi, di mana lebih dari 80% kebutuhan domestic terutama untuk bahan baku industri tahu dan tempe masih menggantungkan pasokan pada impor global. Di saat yang sama, alih fungsi lahan subur di Jawa terus terjadi, sehingga alokasi lahan utama diprioritaskan untuk padi dan jagung. Dalam kondisi ini, pemanfaatan lahan marginal menjadi pilihan strategis dan mendesak untuk menjaga kedaulatan pangan nasional.

Penyebab urgensivitas ketahanan pangan kedelai di lahan marginal untuk mencapai ketahanan pangan yang bersifat berkelanjutan:

- Menurunkan Kerentanan Impor: Ketergantungan pada kedelai impor membuat harga pangan lokal sangat rentan terhadap fluktuasi harga komoditas global, perubahan iklim di negara produsen (seperti AS dan Brasil), serta krisis geopolitik.
- Memproteksi Akses Protein Rakyat: Kedelai adalah sumber protein nabati yang paling terjangkau bagi mayoritas masyarakat Indonesia. Keterbatasan pasokan kedelai berpotensi memicu lonjakan harga pangan dasar yang berdampak langsung pada gizi masyarakat dan pencegahan stunting.
- Ekspansi Tanpa Menggeser Padi: Luas lahan subur yang terbatas melahirkan kompetisi ketat antar-komoditas. Mengoptimalkan lahan marginal memungkinkan peningkatan produksi kedelai tanpa mengurangi areal tanam padi dan jagung.

Kendala Utama pada Lahan Marginal dan Strategi Teknis di Lapangan

Jenis Lahan Marginal	Kendala Utama	Solusi & Strategi Teknis
Lahan Masam (Ultisol)	pH rendah, kejenuhan aluminium tinggi yang beracun bagi akar.	Pengapuran (dolomit), pemupukan fosfat, dan penggunaan varietas toleran masam (misal: Demas 1).
Lahan Kering / Tadah Hujan	Defisit air tinggi, struktur tanah kurang mengikat air.	Penerapan mulsa, penyiraman efisien (irigasi tetes/embung), dan varietas tahan kering (misal: Dena 1).
Lahan Salin (Pesisir)	Kadar garam/natrium tinggi yang menghambat penyerapan air.	Pencucian garam (leaching), aplikasi bahan organik, dan penanaman varietas toleran salinitas.
Lahan Bukaan Baru / Perkebunan	Naungan dari tanaman utama (sawit/ kayu putih muda).	Pola tumpangsari (intercropping) dan penggunaan varietas tahan naungan (misal: Dena 2).

Pengembangan kedelai di lahan marginal membutuhkan integrasi antara inovasi bioteknologi tanaman, perbaikan kualitas tanah, serta jaminan kepastian harga jual agar para petani terdorong untuk membudidayakannya secara berkelanjutan.

Upaya memperkuat ketahanan pangan melalui peningkatan ketersediaan dan pemenuhan kebutuhan kedelai menjadi penting karena didukung oleh beberapa pertimbangan utama berikut.

1.2.1. Meningkatnya Kebutuhan Konsumsi Nasional

Kenaikan jumlah penduduk di Indonesia memberikan dampak terhadap kenaikan kebutuhan pangan, termasuk kedelai. Produk olahan berbasis kedelai telah menjadi bagian dari pola konsumsi masyarakat sehingga permintaannya relatif stabil bahkan cenderung meningkat setiap tahun. Kondisi ini menuntut adanya peningkatan produksi nasional agar kebutuhan masyarakat dapat dipenuhi secara berkelanjutan.

Kebutuhan kedelai nasional Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan tingginya konsumsi

produk olahan berbasis kedelai. Namun, kapasitas produksi dalam negeri masih belum mampu mengimbangi laju permintaan tersebut, sehingga memicu ketergantungan impor yang tinggi.

a. Dinamika Pertumbuhan Penduduk dan Konsumsi Kedelai

   1) Jumlah penduduk Indonesia yang melampaui 280 juta jiwa menjadikan kedelai sebagai komoditas strategis. Kedelai merupakan sumber protein nabati utama yang terjangkau bagi sebagian besar masyarakat melalui produk olahan harian.
   2) Rata-rata Konsumsi: Konsumsi kedelai dalam bentuk biji kering mencapai 9–15 kg/kapita/tahun, yang sebagian besar diserap oleh industri pengolahan pangan informal dan UMKM.
   3) Pola Konsumsi Olahan: Sekitar 88% total pasokan kedelai nasional didistribusikan untuk industri tahu dan tempe. Sisanya dimanfaatkan untuk kecap, tauco, susu kedelai, pakan ternak, serta benih.

b. Ketimpangan Kebutuhan dan Produksi Nasional
   Terdapat kesenjangan (gap) yang sangat signifikan antara angka kebutuhan (permintaan) dan realisasi produksi kedelai dalam negeri.

Indikator	Estimasi Rata-Rata Tahunan	Keterangan
Kebutuhan Nasional	2,8 - 3,0 juta ton	Terus meningkat seiring pertumbuhan populasi
Produksi Dalam Negeri	200 - 300 ribu ton	Hanya memenuhi < 10% dari total kebutuhan
Defisit (Impor)	2,5 - 2,7 juta ton	Dipenuhi melalui impor (mayoritas dari Amerika Serikat)

c. Tantangan Utama Peningkatan Produksi Kedelai Nasional
   Upaya untuk mencapai swasembada atau meningkatkan produksi kedelai nasional secara berkelanjutan menghadapi sejumlah kendala teknis dan ekonomis:

1) Alih Fungsi dan Keterbatasan Lahan: Luas areal tanam kedelai terus menyusut akibat alih fungsi lahan pertanian menjadi pemukiman/industri, serta persaingan penggunaan lahan dengan tanaman pangan lain yang dinilai lebih menguntungkan seperti padi dan jagung.
2) Insentif Harga dan Disparitas: Kedelai impor umumnya memiliki keseragaman ukuran biji yang tinggi, kadar air yang stabil, dan harga yang bersaing. Hal ini membuat perajin tahu/tempe cenderung memilih kedelai impor dibandingkan kedelai lokal.
3) Produktivitas Rendah: Tingkat produktivitas rata-rata kedelai lokal masih berada di kisaran 1,3 – 1,5 ton/hektar, sedangkan potensi varietas unggul dapat mencapai lebih dari 2,0 – 2,5 ton/hektar.
4) Faktor Iklim: Kedelai sensitif terhadap intensitas curah hujan dan kelembapan. Perubahan iklim yang tidak menentu kerap memicu kegagalan panen atau penurunan kualitas biji.

d. Strategi Peningkatan Produksi Berkelanjutan

Untuk mereduksi ketergantungan impor dan menjaga ketahanan pangan nasional, langkah-langkah strategis yang diperlukan meliputi:

1) Ekspansi Lahan Tanam (*Extensifikasi*): Memanfaatkan lahan suboptimal, lahan tumpang sari (*intercropping*) di area perkebunan kelapa sawit muda atau perhutanan sosial, serta optimalisasi lahan kering.
2) Peningkatan Produktivitas (Intensifikasi): Penggunaan varietas unggul bersertifikat yang tahan kekeringan, tahan hama, serta memiliki produktivitas tinggi dan ukuran biji lebih besar (sesuai preferensi industri tahu/tempe).
3) Kepastian Harga dan Tataniaga: Penerapan kebijakan harga acuan pembelian di tingkat petani untuk menjamin kepastian keuntungan, sehingga mendorong petani untuk tetap membudidayakan kedelai.

4) Modernisasi Teknologi Pascapanen: Penyediaan sarana pengeringan (dryer) dan penanganan pascapanen agar mutu biji kedelai lokal dapat bersaing dengan produk impor.

Konsumsi kedelai mempunyai konsekuensi langsung terhadap kebutuhan kapasitas produksi dalam negeri. Kebutuhan akan kedelai sebagai bahan baku dipengaruhi oleh perkembangan industri pengolahan pangan berbasis kedelai selain juga dari konsumsi rumah tangga. Pertumbuhan permintaan yang berlangsung terus-menerus menyebabkan sistem produksi perlu mampu menyediakan bahan baku dalam jumlah dan mutu yang relatif konsisten.

1.2.2. Ketergantungan terhadap Impor

Produksi kedelai nasional belum mampu mengimbangi kebutuhan domestik. Akibatnya, sebagian besar kebutuhan dipenuhi melalui impor. Ketergantungan yang tinggi terhadap pasar internasional menyebabkan Indonesia rentan terhadap perubahan harga dunia, gangguan rantai pasok global, perubahan nilai tukar mata uang, hingga kebijakan ekspor negara produsen. Situasi tersebut dapat memengaruhi stabilitas harga kedelai di tingkat konsumen maupun industri.

Ketergantungan pada pasokan kedelai dari luar negeri menunjukkan bahwa produksi kedelai domestik masih belum mampu sepenuhnya memenuhi kebutuhan dalam negeri. Kondisi ini menyebabkan harga dan ketersediaan kedelai di pasar domestik turut dipengaruhi oleh perubahan produksi di negara pemasok, biaya transportasi, fluktuasi nilai tukar, serta kebijakan perdagangan yang berlaku. Dari sudut pandang ketahanan pangan, diversifikasi sumber pasokan memang penting, tetapi peningkatan kemampuan produksi domestik tetap menjadi fondasi jangka panjang.

1.2.3. Sumber Protein Nabati Berkualitas

Kedelai mengandung protein sekitar 35–40%, lemak sehat 18–20%, karbohidrat, serat pangan, vitamin, mineral, serta senyawa bioaktif seperti isoflavon. Kandungan gizi tersebut menjadikan kedelai sebagai salah satu sumber protein nabati terbaik yang berperan dalam meningkatkan kualitas gizi masyarakat serta mendukung program penanggulangan stunting dan malnutrisi.

Keunggulan kedelai sebagai sumber protein nabati tidak semata-mata ditentukan oleh kandungan proteinnya, tetapi juga oleh kemampuannya untuk diolah menjadi berbagai jenis produk pangan. Keragaman produk tersebut membuat permintaan terhadap kedelai relatif luas dan melibatkan berbagai kelompok konsumen. Karena itu, stabilitas produksi kedelai mempunyai implikasi terhadap keberlangsungan industri pengolahan pangan yang bergantung pada komoditas ini.

1.2.4. Nilai Ekonomi yang Tinggi

Pengembangan usaha budidaya kedelai tidak hanya berperan dalam meningkatkan ketersediaan pangan, tetapi juga dapat membuka peluang ekonomi bagi petani. Kedelai memiliki pasar yang cukup luas karena dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam industri pangan, industri pakan, maupun berbagai kegiatan usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM). Peningkatan produktivitas kedelai berpotensi meningkatkan pendapatan petani sekaligus memperkuat perekonomian daerah.

Nilai ekonomi kedelai terbentuk dari hubungan antara produksi, permintaan, harga, dan kegiatan pengolahan di sepanjang rantai pasok. Peningkatan produktivitas di tingkat usaha tani dapat memperkuat posisi petani apabila diikuti dengan efisiensi biaya produksi dan kepastian pasar. Karena itu, teknologi budidaya sebaiknya dinilai bukan hanya berdasarkan kemampuan meningkatkan hasil, tetapi juga berdasarkan kebutuhan input dan kemudahan penerapannya.

1.2.5. Mendukung Kemandirian Pangan Nasional

Peningkatan produksi kedelai merupakan bagian dari upaya mewujudkan kedaulatan dan kemandirian pangan nasional. Semakin tinggi kemampuan suatu negara memenuhi kebutuhan pangannya sendiri, semakin kecil ketergantungan terhadap negara lain sehingga ketahanan pangan menjadi lebih kuat dalam menghadapi berbagai tantangan global.

Kemandirian pangan tidak berarti setiap kebutuhan pangan harus dipenuhi sepenuhnya dari satu wilayah, tetapi menunjukkan kemampuan sistem pangan untuk meningkatkan kapasitas produksi dan mengurangi kerentanan terhadap gangguan eksternal. Dalam konteks kedelai, peningkatan produktivitas domestik merupakan bagian penting karena komoditas ini memiliki permintaan yang relatif tinggi dan digunakan oleh berbagai sektor.

Kemandirian pangan tidak berarti setiap kebutuhan pangan harus dipenuhi sepenuhnya dari satu wilayah, tetapi menunjukkan kemampuan sistem pangan untuk meningkatkan kapasitas produksi dan mengurangi kerentanan terhadap gangguan eksternal. Dalam konteks kedelai, peningkatan produktivitas domestik merupakan bagian penting karena komoditas ini memiliki permintaan yang relatif tinggi dan digunakan oleh berbagai sektor.

1.3. TANTANGAN PENGEMBANGAN PRODUKSI KEDELAI

Pengembangan budidaya kedelai di lahan marginal seperti tanah masam/ podsolik merah kuning, lahan gambut, lahan pesisir pantai, dan lahan kering merupakan solusi strategis untuk memperluas areal tanam tanpa menggusur komoditas pangan utama lain. Namun, kondisi fisik dan kimia tanah yang suboptimal menghadirkan tantangan teknis yang cukup kompleks.

1.3.1 Tantangan Utama Budidaya Kedelai di Lahan Marginal

Jenis Lahan Marginal	Karakteristik & Kendala Utama	Dampak terhadap Tanaman Kedelai
Lahan Asam / Podsolik	pH rendah (< 4,5), keracunan Aluminium (Al) dan Besi (Fe), defisiensi Fosfor (P).	Pertumbuhan akar terhambat, pembentukan bintil akar (*Rhizobium*) terganggu.
Lahan Kering	Defisit air/curah hujan tinggi fluctuated, erosi tinggi, bahan organik sangat rendah.	Perkecambahan benih gagal, kekeringan pada fase pengisian polong (*pod filling*).
Lahan Gambut	Ketersediaan unsur hara mikro (Cu, Zn, B) sangat rendah, daya tumpu mekanis lemah, asam organik tinggi.	Tanaman mudah rebah, pembentukan polong hampa (*empty pods)*.
Lahan Pesisir Pantai	Kadar garam/natrium (Na+) tinggi, tekanan osmotik tinggi.	Stress osmotik, daun terbakar (*leaf scorch*), penyerapan air dan nutrisi terhambat.

1.3.2 Rencana Strategi Pengembangan Berkelanjutan

Untuk mengoptimalkan lahan marginal menjadi kawasan produksi kedelai yang produktif, diperlukan kombinasi pendekatan teknis, pemuliaan tanaman, serta kelembagaan.

a. Ameliorasi dan Pengondisian Tanah (Soil Conditioning)
   1) Pengapuran (Kapur Pertanian/Dolomit): Diberikan pada lahan asam (1–3 ton/ha) untuk meningkatkan pH tanah ke kisaran optimal (5,8–6,5) serta menetralkan racun Aluminium.
   2) Pemberian Bahan Organik & Biochar: Menambahkan kompos, pupuk kandang, atau biochar (1–2 ton/ha) guna meningkatkan daya simpan air pada lahan kering dan memperbaiki struktur tanah gambut/pasir.

3) Aplikasi Mikroba Fungsional: Inokulasi bakteri pemfiksasi nitrogen (*Bradyrhizobium japonicum*) dan Mikoriza Vesikular Arbuskular (MVA) untuk memaksimalisasi penyerapan P dan N di tanah yang miskin hara.

b. Penggunaan Varietas Unggul Toleran (VUT)

Menggunakan benih varietas spesifik lokasi yang dibiakan khusus untuk kondisi stres lingkungan:

1) Toleran Lahan Asam & Al: Varietas Anjasmoro, Demas 1, Tanggamus, Dena 1.
2) Toleran Kekeringan: Varietas Dering 1, Dering 2, Dering 3.
3) Toleran Salinitas/Garam: Varietas Mutiara 1, Grobogan (dengan ambang batas toleransi tertentu).

c. Manajemen Air dan Pola Tanam (*Water & Crop Management*)

1) Sistem Tata Air Mikro (Lahan Gambut/Pasang Surut): Pembuatan saluran drainase dan tabat (*sluice gate*) untuk menjaga tinggi muka air tanah (*water table*) pada kedalaman 30–40 cm agar perakaran tidak tergenang sekaligus menghindari kekeringan.
2) Sistem Tumpang Sari (*Intercropping*): Menanam kedelai di antara tanaman jagung muda atau di sela-sela kelapa sawit/karet belum menghasilkan (TBM) untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang dan cahaya.
3) Konservasi Air (Mulsa): Penggunaan mulsa jerami atau sisa panen untuk mengurangi penguapan (*evapotranspirasi*) pada lahan kering.

d. Insentif Kebijakan dan Kelembagaan Petani

1) Subsidi Paket Teknologi Lengkap: Bantuan pemerintah tidak hanya berupa benih, tetapi berupa paket utuh (Benih VUT + Kapur Dolomit + Inokulan Rhizobium + Pupuk P).
2) Klasterisasi & Penguatan Kemitraan: Mengelompokkan petani lahan marginal ke dalam kelembagaan korporasi petani yang terhubung langsung dengan off-taker (industri tahu/tempe/pakan) untuk menjamin kepastian harga dan pasar.

Beberapa kendala yang dihadapi oleh Indonesia dalam peningkatan produksi kedelai:

1) alih fungsi lahan pertanian menjadi kawasan permukiman dan industri;
2) penurunan kualitas tanah akibat eksploitasi lahan yang intensif;
3) perubahan iklim yang menyebabkan ketidakpastian musim tanam;
4) keterbatasan penggunaan varietas unggul dan teknologi budidaya;
5) rendahnya produktivitas lahan dibandingkan potensi genetik tanaman;
6) keterbatasan lahan subur untuk perluasan areal tanam.

Kondisi tersebut menuntut adanya strategi alternatif yang mampu meningkatkan produksi tanpa harus bergantung pada pembukaan lahan pertanian baru yang produktif. Tantangan peningkatan produksi kedelai berasal dari kombinasi faktor biofisik, teknis, ekonomi, dan kelembagaan. Keterbatasan kualitas lahan dapat berinteraksi dengan ketidakpastian iklim, ketersediaan air, harga input, serta akses teknologi. Karena faktor-faktor tersebut saling berkaitan, satu intervensi saja biasanya belum cukup untuk menghasilkan perubahan produktivitas yang konsisten.

1.4. LAHAN MARGINAL SEBAGAI POTENSI PENGEMBANGAN KEDELAI

Pemanfaatan lahan marginal menjadi salah satu alternatif yang memiliki prospek besar. Lahan marginal merupakan lahan yang memiliki keterbatasan fisik, kimia, maupun biologis sehingga produktivitasnya relatif rendah apabila dibandingkan dengan lahan pertanian yang subur. Karakteristik lahan marginal antara lain memiliki kandungan bahan organik rendah, tingkat kesuburan rendah, kapasitas menahan air terbatas, pH tanah ekstrem, salinitas tinggi, atau kondisi topografi yang kurang mendukung.

Indonesia memiliki potensi lahan marginal yang sangat luas, meliputi lahan kering masam, lahan bekas tambang, lahan salin, lahan pasir

pantai, lahan gambut tertentu, serta lahan tadah hujan. Apabila dikelola dengan teknologi yang tepat, lahan-lahan tersebut dapat menjadi sumber peningkatan produksi pangan tanpa mengurangi fungsi kawasan hutan maupun mengkonversi lahan pertanian produktif.

Lahan marginal perlu dipandang sebagai sumber daya yang mempunyai keterbatasan tertentu, bukan sebagai lahan yang sama sekali tidak dapat digunakan. Tingkat kemarginalan suatu lahan sangat bergantung pada jenis kendala, tingkat keparahannya, dan teknologi yang tersedia untuk mengatasinya. Cara pandang tersebut membuka peluang untuk mengembangkan teknologi pengelolaan yang spesifik lokasi sehingga pemanfaatan lahan kurang produktif dapat lebih optimal.

1.5. PELUANG PEMANFAATAN LAHAN MARGINAL UNTUK BUDIDAYA KEDELAI

Kedelai termasuk tanaman leguminosa yang memiliki daya adaptasi cukup baik terhadap beragam kondisi lingkungan, terutama apabila penerapannya didukung oleh teknologi budidaya yang tepat. Pemanfaatan lahan marginal untuk pengembangan kedelai masih memiliki peluang yang cukup besar. Lahan marginal sebaiknya tidak dipandang sebagai lahan yang sama sekali tidak dapat dimanfaatkan, melainkan sebagai sumber daya yang memiliki keterbatasan tertentu. Tingkat kemarginalan suatu lahan ditentukan oleh jenis kendala yang dihadapi, tingkat keparahan kendala tersebut, serta ketersediaan teknologi yang dapat digunakan untuk mengatasinya. Pemahaman tersebut memberikan dasar bagi pengembangan teknik pengelolaan lahan yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing lokasi. Dengan pendekatan yang tepat, lahan yang selama ini memiliki produktivitas rendah dapat dikelola dan dimanfaatkan secara lebih optimal untuk mendukung pengembangan tanaman kedelai.

1.5.1. Efisiensi Pemanfaatan Sumber Daya Lahan

Optimalisasi lahan yang selama ini belum dimanfaatkan dapat meningkatkan luas tanam nasional sehingga berkontribusi terhadap peningkatan produksi kedelai. Besarnya area lahan yang tertanami dan jumlah produk yang dihasilkan dari pemanfaatan sumber daya secara proporsional, menjadi ukuran dari efisiensi pemanfaatan lahan. Pada lahan marginal, indikator efisiensi menjadi semakin penting karena kebutuhan input dapat lebih tinggi untuk mengatasi faktor pembatas. Perbaikan sifat tanah diharapkan dapat mengurangi kehilangan air dan hara sehingga sebagian input yang diberikan benar-benar berada pada zona perakaran.

1.5.2. Perbaikan Kesuburan Tanah

Kedelai merupakan salah satu tanaman leguminosa yang memiliki kemampuan bersimbiosis dengan bakteri Rhizobium. Melalui hubungan simbiotik tersebut, nitrogen bebas di atmosfer dapat difiksasi menjadi bentuk nitrogen yang lebih tersedia bagi tanaman. Fiksasi nitrogen secara biologis ini berperan dalam meningkatkan ketersediaan nitrogen di dalam tanah, sehingga secara bertahap dapat membantu mempertahankan kesuburan lahan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan pupuk nitrogen anorganik. Pada dasarnya, kesuburan tanah tidak hanya ditentukan oleh satu faktor, tetapi merupakan hasil keterkaitan antara sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang secara bersama-sama mendukung kemampuan tanah dalam menyediakan kondisi yang sesuai bagi pertumbuhan tanaman. Perbaikan satu sifat tidak selalu menghasilkan peningkatan produktivitas apabila sifat lain masih menjadi faktor pembatas. Oleh karena itu, pendekatan ameliorasi pada tanah marginal sebaiknya diarahkan pada perbaikan beberapa fungsi tanah secara bersamaan.

1.5.3. Mendukung Pertanian Berkelanjutan

Pemanfaatan lahan marginal yang diimbangi dengan penerapan konservasi tanah, penggunaan pupuk organik, biochar, amelioran, serta pengelolaan air yang baik dapat meningkatkan produktivitas lahan sekaligus menjaga kualitas lingkungan. Pertanian berkelanjutan menuntut keseimbangan antara produktivitas, efisiensi ekonomi, dan pemeliharaan sumber daya. Pemanfaatan lahan marginal dapat mendukung tujuan tersebut apabila dilakukan melalui teknologi yang memperbaiki fungsi tanah dan mengurangi tekanan terhadap sumber daya lain. Dengan cara ini, peningkatan produksi tidak harus selalu dicapai melalui intensifikasi input kimia semata.

1.5.4. Peningkatan Pendapatan Masyarakat

Pemanfaatan lahan yang sebelumnya kurang produktif dapat menjadi peluang untuk mengembangkan kegiatan ekonomi baru bagi masyarakat pedesaan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah diversifikasi usaha tani melalui budidaya kedelai, yang berpotensi meningkatkan pendapatan petani sekaligus memperkuat kondisi ekonomi rumah tangga. Upaya peningkatan pendapatan masyarakat sebaiknya tidak dipandang sebagai kegiatan yang berdiri sendiri, tetapi sebagai bagian dari sistem pengelolaan lahan dan tanaman yang saling berhubungan. Kondisi tanah, ketersediaan air, keseimbangan unsur hara, serta aktivitas biologis di dalam tanah merupakan komponen yang saling memengaruhi. Oleh karena itu, perubahan pada salah satu komponen dapat memberikan dampak terhadap komponen lainnya. Pengelolaan lahan dan tanaman yang optimal dengan demikian memerlukan pendekatan yang terpadu dan mempertimbangkan keterkaitan antarkomponen tersebut.

BAB 2

KARAKTERISTIK TANAH PASIR PANTAI, KENDALA DAN TANTANGAN

2.1. PENDAHULUAN

Salah satu lahan marginal di Indonesia dengan potensi yang besar sebagai lahan pertanian adalah tanah pasir pantai. Tanah ini banyak dijumpai di sepanjang wilayah pesisir, seperti Pantai Selatan Yogyakarta, pesisir selatan Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, hingga beberapa wilayah Sumatera dan Kalimantan. Dalam klasifikasi tanah di Indonesia, tanah pasir pantai umumnya termasuk ke dalam kelompok **Pasir pantai**, sedangkan menurut *USDA Soil Taxonomy* sebagian besar tergolong **Pasir pantai**, yaitu tanah muda yang masih mengalami perkembangan profil tanah secara terbatas.



Gambar 2.1 Lahan Pasir Pantai Samas

Meskipun memiliki luasan yang cukup besar, pemanfaatan tanah pasir pantai untuk kegiatan budidaya pertanian masih menghadapi berbagai kendala. Karakteristik fisik, kimia, dan biologinya menyebabkan produktivitas tanaman relatif rendah apabila tidak disertai dengan pengelolaan yang tepat. Namun demikian, perkembangan teknologi pengelolaan tanah, penggunaan bahan amelioran, pupuk organik, biochar, mikroorganisme hayati, serta sistem irigasi yang lebih efisien telah membuka peluang pemanfaatan tanah pasir pantai sebagai lahan pertanian produktif. Oleh karenanya, agar s*ustainable agriculture* tanah pasir pantai dapat tercapai, maka pengenalan karakteristik dari tanah Pasir pantai menjadi penting.

2.2. KARAKTERISTIK TANAH PASIR PANTAI (PASIR PANTAI)

Tanah pasir pantai banyak ditemukan di kawasan pesisir dan umumnya terbentuk dari endapan pasir yang dipengaruhi oleh proses marin serta eolian. Kondisi tersebut menyebabkan tanah di wilayah ini didominasi oleh fraksi pasir, sementara kandungan lempung dan debunya relatif rendah. Kondisi tersebut menyebabkan tanah memiliki tekstur kasar, struktur lepas, serta daya ikat antarpartikel yang lemah. Secara fisik, tanah pasir pantai cenderung memiliki porositas makro yang tinggi sehingga air yang masuk ke dalam tanah dengan cepat bergerak ke lapisan bawah atau hilang melalui drainase. Sifat tersebut membuat tanah pasir pantai memiliki daya simpan air rendah dan kurang mampu menjaga kelembapan tanah dalam waktu lama, terutama setelah hujan atau irigasi (Hardjowigeno, 2010).



Gambar 2.2. Tanah Pasir Pantai Samas

Karakteristik tersebut juga terlihat pada tanah pasir Pantai Samas, Bantul, yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil analisis awal menunjukkan bahwa tanah didominasi oleh fraksi pasir sebesar 93%, sedangkan fraksi debu dan lempung masing-masing sebesar 6% dan 1%. Komposisi tersebut menempatkan tanah dalam kelas tekstur pasir dan menunjukkan dominasi partikel berukuran kasar. Dominasi fraksi pasir menjadi salah satu faktor yang menyebabkan kemampuan tanah dalam mempertahankan air dan unsur hara relatif rendah. Kondisi tersebut sesuai dengan karakter umum tanah pasir pantai yang memiliki drainase cepat dan kemampuan menyimpan air serta hara yang terbatas.

Selain berpengaruh terhadap ketersediaan air, dominasi fraksi pasir juga berdampak terhadap sifat kimia tanah. Tanah pasir pantai umumnya memiliki kapasitas pertukaran kation (KPK) yang rendah karena minimnya

fraksi lempung dan bahan organik sebagai penyumbang muatan tanah. Rendahnya KPK menyebabkan tanah kurang mampu mengikat dan mempertahankan kation unsur hara pada kompleks pertukaran tanah. Akibatnya, unsur hara yang ditambahkan melalui pemupukan lebih mudah tercuci dan terbawa aliran air menuju lapisan tanah yang lebih dalam. Keadaan ini menyebabkan tanah pasir pantai memiliki kesuburan alami yang relatif rendah sehingga membutuhkan pengelolaan lebih intensif untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal (Hanafiah, 2014).

Kondisi tersebut juga tercermin dari karakteristik kimia awal tanah Pantai Samas. Nilai KPK tanah hanya sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1}, sedangkan kandungan C-organik sebesar 0,51%. Rendahnya kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa kemampuan tanah dalam mempertahankan kation dan menyediakan bahan organik relatif terbatas. Kandungan N-total tanah juga tergolong rendah, yaitu sebesar 0,215%. Sementara itu, P-tersedia pada kondisi awal tercatat sebesar 44,98 ppm. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa tanah pasir Pantai Samas memiliki beberapa keterbatasan kimia yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan untuk budidaya tanaman.

Karakteristik fisik dan kimia tersebut menjadi salah satu faktor pembatas dalam pemanfaatan tanah pasir pantai untuk kegiatan pertanian. Tanaman yang dibudidayakan pada tanah pasir pantai dapat mengalami keterbatasan ketersediaan air dan unsur hara karena kemampuan tanah dalam mempertahankan keduanya relatif rendah. Nitrogen, terutama dalam bentuk nitrat, cenderung mudah tercuci karena aliran air yang tinggi di sepanjang profil tanah, sementara ketersediaan fosfor sangat bergantung pada proses penahanan serta perubahan bentuk unsur di dalam tanah. Keadaan ini dapat menurunkan efisiensi penggunaan hara dan menghambat pertumbuhan tanaman apabila tidak diimbangi dengan pengelolaan tanah yang sesuai. Dengan demikian, penggunaan tanah pasir pantai sebagai lahan pertanian membutuhkan strategi pengelolaan yang

dapat meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air sekaligus mempertahankan unsur hara (Putri & Herlambang, 2025).

Keterbatasan tanah pasir pantai juga erat kaitannya dengan rendahnya kandungan bahan organik. Bahan organik berperan penting dalam memperbaiki struktur dan agregasi tanah, meningkatkan kapasitas pertukaran kation, menjaga ketersediaan air dalam tanah, serta menjadi sumber energi bagi aktivitas mikroorganisme tanah. Namun, pada tanah pasir pantai, kandungan bahan organik umumnya rendah karena rendahnya kemampuan tanah dalam mempertahankan bahan organik serta terbatasnya masukan bahan organik pada sebagian kawasan pesisir. Kondisi tersebut semakin membatasi kemampuan tanah dalam mempertahankan unsur hara dan air di sekitar zona perakaran. Penelitian pada lahan pertanian pasir pantai menunjukkan bahwa kandungan C-organik dapat digunakan sebagai indikator penting untuk menilai kesuburan serta kualitas tanah di kawasan pesisir (Putri & Herlambang, 2025).

2.2.1. Asal Usul dan Proses Pembentukan

Tanah pasir pantai merupakan tanah muda yang terbentuk melalui proses pelapukan bahan induk dan belum mengalami perkembangan horizon tanah secara sempurna. Pada kawasan pesisir, tanah pasir pantai umumnya berasal dari endapan pasir hasil aktivitas gelombang laut, angin (*aeolian deposits*), maupun sedimentasi material vulkanik yang terbawa hingga wilayah pantai. Karena proses pembentukan tanah masih berlangsung, struktur dan perkembangan profil tanah relatif sederhana dengan horizon yang tipis serta kandungan bahan organik yang rendah.



Gambar 2.3 Pengamatan Tanah Pasir Pantai Samas

Tanah pasir pantai umumnya tersusun atas fraksi pasir, terutama pasir kuarsa (SiO_2), sedangkan fraksi debu (*silt*) dan liat (*clay*) hanya terdapat dalam jumlah sangat kecil. Kondisi tersebut menghasilkan dominasi pori makro sehingga kemampuan tanah menahan air dan menyimpan unsur hara relatif sangat rendah secara alami. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik tanah Pantai Samas yang digunakan dalam penelitian, dengan fraksi pasir mencapai 93%, sedangkan fraksi debu dan lempung masing-masing hanya 6% dan 1%. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa tanah memiliki dominasi partikel kasar yang kuat dan termasuk dalam kelas tekstur pasir.

Karakter tanah pasir pantai sangat dipengaruhi oleh bahan asal dan proses geomorfologi yang berlangsung di wilayah pesisir. Material pasir dapat berasal dari hasil pelapukan batuan yang kemudian mengalami transportasi oleh aliran air dan gelombang, sebelum akhirnya diendapkan dan dipindahkan kembali oleh angin. Proses tersebut menghasilkan bahan tanah dengan dominasi partikel kasar dan perkembangan profil tanah yang relatif terbatas. Pada tanah Pantai Samas, karakteristik tersebut tercermin tidak hanya dari dominasi fraksi pasir, tetapi juga dari rendahnya

kandungan C-organik sebesar 0,51% dan KPK sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1}. Kedua karakteristik tersebut memperkuat gambaran bahwa tanah memiliki kemampuan terbatas dalam mempertahankan bahan organik dan kation hara, sehingga memerlukan pengelolaan yang sesuai untuk mendukung pemanfaatannya sebagai lahan budidaya.

2.2.2. Karakteristik Fisik

Beberapa karakteristik fisik tanah pasir pantai yang membatasi kemampuannya dalam budidaya tanaman, antara lain:

a. Tekstur Sangat Kasar

Tanah Pasir pantai umumnya memiliki kandungan pasir lebih dari 70–90%. Dominasi partikel berukuran besar menyebabkan agregat tanah sulit terbentuk sehingga tanah bersifat gembur tetapi kurang stabil.

b. Struktur Tanah Lemah

Struktur tanah pada tanah pasir umumnya tergolong lemah karena rendahnya kandungan bahan organik dan mineral liat yang berperan dalam pembentukan serta stabilisasi agregat tanah. Ikatan antarpartikel tanah relatif rendah sehingga partikel pasir cenderung berada dalam kondisi lepas dan tidak membentuk agregat yang stabil. Kondisi tersebut menyebabkan tanah memiliki tingkat kohesi yang rendah dan struktur tanah mudah mengalami perubahan akibat pengaruh air, angin, maupun aktivitas mekanis. Tanah pasir tidak mampu menjaga kondisi fisiknya , karena strukturnya yang lemah, sehingga kurang mendukung pertumbuhan tanaman.

Kurang optimalnya agregat yang terbentuk pada tanah pasir disebabkan oleh rendahnya kandungan bahan organik di dalamnya. Bahan organik dapat berperan sebagai perekat alami yang menghubungkan partikel-partikel tanah dan membantu membentuk agregat yang lebih stabil. Pada tanah dengan kandungan bahan

organik rendah, fungsi tersebut menjadi terbatas sehingga partikel tanah lebih mudah terlepas dan berpindah. Kondisi ini menyebabkan permukaan tanah pasir relatif tidak stabil dan lebih mudah mengalami perubahan ketika mendapatkan gangguan dari lingkungan.

Struktur yang lemah juga menyebabkan tanah pasir lebih mudah mengalami dispersi dan perpindahan partikel. Ketika terkena air dengan intensitas tertentu, partikel yang tidak terikat kuat dapat terlepas dan bergerak mengikuti aliran air. Pada kondisi permukaan tanah yang terbuka, partikel pasir juga lebih mudah mengalami perpindahan akibat hembusan angin. Proses tersebut dapat memperbesar kehilangan material permukaan dan meningkatkan kerentanan tanah terhadap erosi, terutama pada lahan yang tidak memiliki tutupan vegetasi atau perlindungan permukaan yang memadai.

Lemahnya struktur tanah juga berkaitan dengan kondisi lingkungan perakaran tanaman. Tanah dengan struktur yang tidak stabil memiliki kemampuan yang terbatas dalam menyediakan lingkungan fisik yang konsisten bagi perkembangan akar. Partikel tanah yang tidak terikat kuat mudah berpindah sehingga kestabilan ruang di sekitar akar menurun. Erosi juga dapat mengurangi material tanah dan mengubah kedalaman serta kondisi lapisan tempat akar berkembang. Keadaan ini berpotensi menghambat pertumbuhan sistem perakaran dan mengurangi kemampuan tanaman menjangkau tanah dalam memperoleh air serta unsur hara.

Struktur tanah yang lemah juga dapat memengaruhi hubungan antara tanah, air, dan udara. Ketidakstabilan agregat menyebabkan distribusi ruang pori lebih mudah berubah ketika terjadi pembasahan dan pengeringan. Pada tanah pasir, kondisi tersebut dapat memperkuat karakteristik pergerakan air yang cepat karena dominasi ruang antarpartikel yang relatif besar. Air yang masuk ke dalam tanah dapat segera bergerak melalui ruang tersebut, sedangkan kemampuan tanah untuk mempertahankan air dalam lingkungan perakaran

tetap rendah. Dengan demikian, struktur tanah yang lemah dapat memperkuat keterbatasan tanah pasir dalam menyediakan kondisi air yang stabil bagi tanaman.

Dari sisi pengelolaan lahan, struktur tanah yang lemah menunjukkan perlunya upaya untuk meningkatkan stabilitas agregat dan memperkuat ikatan antarpartikel. Penambahan bahan organik dapat membantu meningkatkan pembentukan agregat melalui perannya sebagai sumber bahan perekat dan sumber energi bagi aktivitas biologis tanah. Aktivitas organisme tanah juga dapat membantu menghasilkan senyawa yang berperan dalam mengikat partikel tanah dan meningkatkan stabilitas agregat. Selain bahan organik, penggunaan bahan pembenah seperti biochar dapat mendukung perbaikan kondisi fisik tanah melalui interaksinya antara molekul tanah dengan molekul organik di dalam tanah.

Perlindungan permukaan tanah juga menjadi bagian penting dalam mempertahankan struktur tanah pasir. Keberadaan vegetasi, sisa tanaman, dan bahan penutup permukaan dapat mengurangi pengaruh langsung air hujan dan angin terhadap partikel tanah. Akar tanaman akan menurunkan resiko perpindahan partikel tanah dan menjaga material tanah tetap di tempatnya. Kestabilan kondisi tanah dan keberlanjutan penggunaan lahan pasir dapat tercapai dengan kombinasi antara perlindungan permukaan dan peningkatan kandungan bahan organik.

c. Porositas Tinggi

Tanah pasir umumnya memiliki porositas yang relatif tinggi, tetapi sebagian besar ruang porinya didominasi oleh pori berukuran besar atau pori makro. Kondisi tersebut berkaitan dengan ukuran partikel pasir yang relatif besar dan susunan antarpartikel yang menghasilkan ruang pori yang cukup lebar. Besarnya jumlah pori makro menyebabkan infiltrasi air berlangsung sangat cepat. Meskipun kondisi tersebut mampu mengurangi genangan di permukaan

tanah, air yang masuk ke dalam tanah juga lebih cepat bergerak menuju lapisan yang lebih dalam sehingga tidak seluruhnya dapat dipertahankan pada zona perakaran.

Porositas tanah menggambarkan banyaknya ruang pori di antara butiran tanah. Ruang tersebut menjadi media penyimpanan dan jalur pergerakan air, sekaligus memungkinkan pertukaran udara dalam tanah. Pada tanah berpasir, banyaknya pori makro membuat air lebih cepat bergerak ke bawah mengikuti gaya gravitasi. Sebaliknya, kemampuan pori tersebut dalam mempertahankan air relatif rendah karena air tidak dapat ditahan dengan kuat oleh partikel tanah. Oleh karena itu, tingginya porositas pada tanah pasir tidak selalu menunjukkan tingginya kemampuan tanah dalam menyediakan air bagi tanaman.

Dominasi pori makro juga menyebabkan proses drainase berlangsung dengan cepat. Setelah hujan atau pemberian irigasi, air dapat segera memasuki profil tanah dan bergerak menuju lapisan yang lebih dalam. Kondisi ini memberikan keuntungan karena dapat mengurangi kemungkinan terjadinya genangan pada permukaan tanah, terutama pada wilayah dengan curah hujan tinggi. Namun, apabila pergerakan air berlangsung terlalu cepat, sebagian air dapat melewati zona perakaran sebelum sempat dimanfaatkan oleh tanaman. Akibatnya, waktu keberadaan air pada zona perakaran menjadi relatif singkat dan ketersediaan air bagi tanaman dapat cepat menurun setelah masukan air berhenti.

Kondisi porositas yang tinggi dan dominasi pori makro juga berpengaruh terhadap hubungan antara air dan udara di dalam tanah. Pori makro yang tidak terisi air akan menjadi ruang yang memungkinkan pertukaran udara berlangsung dengan baik sehingga aerasi tanah relatif tinggi. Kondisi aerasi yang baik dapat mendukung respirasi akar dan aktivitas mikroorganisme aerob. Akan tetapi, apabila air bergerak terlalu cepat dan tanah menjadi cepat kering, lingkungan perakaran dapat mengalami kekurangan air meskipun

aerasi tanah tetap baik. Dengan demikian, keseimbangan antara air dan udara dalam ruang pori menjadi salah satu aspek penting dalam menentukan kualitas lingkungan perakaran pada tanah pasir.

Besarnya ruang pori makro juga dapat meningkatkan risiko kehilangan unsur hara melalui perlindihan. Air yang bergerak cepat melalui profil tanah dapat membawa unsur hara yang berada dalam bentuk terlarut menuju lapisan tanah yang lebih dalam. Nitrogen, terutama dalam bentuk nitrat, merupakan salah satu unsur yang relatif mudah bergerak bersama aliran air sehingga berpotensi mengalami kehilangan dari zona perakaran. Kondisi tersebut menyebabkan unsur hara yang telah diberikan melalui pemupukan tidak seluruhnya dapat dimanfaatkan tanaman. Dengan demikian, tingginya porositas dan cepatnya pergerakan air perlu menjadi pertimbangan dalam menentukan pengelolaan pemupukan pada tanah pasir.

Dominasi pori makro pada tanah pasir juga berkaitan dengan rendahnya kemampuan tanah dalam mempertahankan air setelah proses infiltrasi berlangsung. Air yang tidak segera digunakan oleh tanaman akan lebih mudah bergerak ke lapisan yang lebih dalam melalui proses perkolasi. Kondisi ini menyebabkan perubahan kadar air tanah berlangsung relatif cepat dan dapat memperpendek waktu tersedianya air bagi tanaman. Permasalahan tersebut menjadi semakin penting pada periode kering ketika tidak terdapat tambahan air dari curah hujan. Tanaman yang tumbuh pada tanah pasir dengan kondisi tersebut membutuhkan pasokan air yang lebih teratur agar ketersediaan air pada zona perakaran tetap terjaga.

Peningkatan porositas dan perbaikan distribusi ukuran pori pada tanah pasir dapat dilakukan dengan menambah bahan organik serta menggunakan pembenah tanah. Bahan organik berperan dalam pembentukan agregat dan mengubah distribusi ukuran pori, sehingga keseimbangan antara pori makro dan mikro menjadi lebih optimal. Biochar dengan struktur berpori juga berpotensi mengubah karakteristik ruang pori tanah serta meningkatkan kemampuan

tanah dalam menyimpan air. Perubahan tersebut diharapkan dapat mengurangi kehilangan air secara berlebihan tanpa menghilangkan fungsi pori makro dalam menyediakan aerasi dan memperlancar infiltrasi.

d. Kapasitas Menahan Air Rendah

Kemampuan tanah menyimpan air (*water holding capacity*) sangat rendah. Pada musim kemarau tanaman lebih mudah mengalami cekaman kekeringan karena cadangan air di dalam tanah cepat habis. Kondisi tersebut terutama berkaitan dengan dominasi fraksi pasir yang memiliki ukuran partikel relatif besar dan susunan antarpartikel yang menghasilkan banyak ruang pori berukuran besar. Pori-pori makro tersebut memungkinkan air bergerak dengan cepat melalui profil tanah setelah terjadi hujan atau pemberian irigasi. Akibatnya, hanya sebagian kecil air yang dapat dipertahankan di dalam zona perakaran dan tersedia bagi tanaman dalam waktu yang lebih lama.

Kemampuan tanah pasir yang rendah dalam menahan air juga dipengaruhi oleh rendahnya kandungan bahan organik. Bahan organik berperan dalam pembentukan agregat, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan kapasitas tanah menyimpan air. Pada tanah pasir dengan kandungan bahan organik rendah, fungsi tersebut tidak berlangsung optimal sehingga air lebih cepat meresap menuju lapisan tanah yang lebih dalam. Kondisi ini berdampak pada perubahan kadar air tanah berlangsung relatif cepat, terutama ketika tidak terdapat masukan air dari hujan atau irigasi. Dengan demikian, tanah pasir dapat mengalami kondisi lembap dalam waktu singkat setelah menerima air, tetapi kemudian kembali mengalami kekeringan ketika air telah bergerak keluar dari zona perakaran.

Air tanah tidak seluruhnya dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Sebagian air bergerak terlalu cepat melalui pori-pori besar sehingga tidak sempat disimpan di dalam zona perakaran, sedangkan sebagian lainnya dapat tertahan sangat kuat pada permukaan partikel tanah sehingga sulit diambil oleh akar. Pada tanah pasir, kondisi yang

lebih dominan adalah rendahnya kemampuan mempertahankan air dalam bentuk yang dapat tersedia bagi tanaman. Kondisi tersebut menyebabkan interval antara kondisi tanah cukup lembap dan kondisi tanah mulai mengalami kekeringan dapat berlangsung relatif singkat. Pengelolaan air pada tanaman yang tumbuh di tanah pasir harus lebih cermat dibandingkan tanaman yang tumbuh pada tanah dengan kemampuan menahan air lebih tinggi.

Keterbatasan air menjadi semakin nyata pada musim kemarau ketika curah hujan rendah dan interval tanpa hujan berlangsung lebih panjang. Air yang tersimpan di dalam tanah pasir dapat berkurang dengan cepat akibat drainase, evaporasi, dan penggunaan air oleh tanaman. Turunnya ketersediaan air di zona perakaran tanaman dan munculnya respon terhadap cekaman kekeringan disebabkan karena pasokan air yang tidak mencukupi. Cekaman tersebut dapat menyebabkan tanaman mengurangi pembukaan stomata untuk menekan kehilangan air melalui transpirasi. Dalam kondisi yang berlangsung lebih lama, keterbatasan air dapat menghambat proses fotosintesis, memperlambat pertumbuhan, serta menurunkan kemampuan tanaman dalam membentuk biomassa dan hasil.

Rendahnya kapasitas menahan air juga berkaitan dengan efisiensi pemanfaatan unsur hara. Pergerakan air yang cepat melalui profil tanah dapat membawa unsur hara terlarut keluar dari zona perakaran sebelum dapat dimanfaatkan secara optimal oleh tanaman. Kondisi tersebut terutama menjadi perhatian pada unsur hara yang mudah bergerak bersama air, seperti nitrogen dalam bentuk nitrat. Dengan demikian, rendahnya kemampuan tanah pasir dalam mempertahankan air tidak hanya menyebabkan tanaman mengalami cekaman kekeringan, tetapi juga dapat meningkatkan risiko kehilangan unsur hara melalui proses perlindihan. Hubungan antara air dan unsur hara tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan air pada tanah pasir perlu dilakukan secara bersamaan dengan pengelolaan kesuburan tanah.

Material pembenah tanah dan material organik prlu ditambahkan dalam rangka peningkatan kemampuan tanah pasir dalam mempertahankan air. Material organik dapat membantu meningkatkan pembentukan agregat dan memperbaiki distribusi ukuran pori sehingga sebagian air dapat dipertahankan lebih lama di dalam tanah. Biochar juga memiliki struktur berpori yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan retensi air apabila diaplikasikan pada kondisi dan dosis yang sesuai. Selain itu, keberadaan bahan organik dan pembenah tanah dapat membantu menciptakan lingkungan perakaran yang lebih stabil sehingga perubahan kadar air tanah tidak berlangsung terlalu cepat.

Pengelolaan air pada tanah berpasir perlu mempertimbangkan cara dan waktu pemberian air. Pemberian air dalam volume besar sekaligus dapat meningkatkan kehilangan air melalui drainase karena daya simpan air tanah relatif rendah. Pemberian air secara teratur sesuai kebutuhan tanaman dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan air. Penggunaan mulsa atau penutup tanah juga dapat membantu menekan kehilangan air akibat evaporasi secara langsung dari permukaan tanah. Pendekatan tersebut dapat dikombinasikan dengan perbaikan sifat tanah agar air yang diberikan dapat bertahan lebih lama pada zona perakaran.

e. Suhu Tanah Tinggi

Permukaan pasir memiliki kemampuan menyerap dan melepaskan panas dengan cepat sehingga suhu tanah pada siang hari dapat meningkat cukup tinggi. Fluktuasi suhu yang ekstrem berpotensi menghambat perkecambahan benih dan pertumbuhan akar. Kondisi tersebut berkaitan dengan rendahnya kemampuan tanah pasir dalam menyimpan dan mempertahankan panas maupun air dalam jumlah yang stabil. Pada saat menerima radiasi matahari, permukaan tanah pasir dapat mengalami peningkatan suhu dengan cepat, terutama pada kondisi permukaan yang terbuka dan tidak terlindungi oleh vegetasi. Sebaliknya, setelah intensitas radiasi matahari menurun,

panas pada permukaan tanah juga dapat dilepaskan dengan relatif cepat sehingga suhu tanah mengalami penurunan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan tanah yang memiliki kandungan bahan organik dan air lebih tinggi.

Perbedaan suhu antara siang dan malam tersebut menyebabkan tanah pasir mengalami fluktuasi suhu harian yang relatif besar. Kondisi ini menjadi salah satu karakteristik penting yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan lahan pasir untuk pertanian. Kandungan air tanah yang rendah dapat memperbesar perubahan suhu karena air memiliki kemampuan menyerap dan menyimpan panas sehingga dapat membantu meredam perubahan suhu tanah. Ketika kandungan air tanah rendah, fungsi tersebut menjadi terbatas dan permukaan tanah lebih mudah mengalami pemanasan pada siang hari. Kondisi ini menyebabkan lingkungan perakaran tanaman pada tanah pasir dapat mengalami perubahan suhu yang cukup besar dalam satu hari. Suhu tanah yang tinggi dapat memengaruhi proses perkecambahan benih. Kesesuaian kondisi lingkungan, termasuk adanya air dan suhu optimal untuk fisiologis benih, sangat diperlukan dalam proses perkecambahan. Peningkatan suhu tanah yang terlalu tinggi dapat mempercepat kehilangan air dari lapisan permukaan dan menyebabkan kondisi kelembapan di sekitar benih cepat berubah. Apabila kondisi tersebut terjadi bersamaan dengan rendahnya kemampuan tanah dalam mempertahankan air, benih dapat mengalami keterbatasan air pada tahap awal perkecambahan. Akibatnya, proses imbibisi dan perkembangan awal kecambah dapat berlangsung kurang optimal.

Kondisi suhu yang tinggi juga dapat memengaruhi perkembangan sistem perakaran tanaman. Akar merupakan bagian tanaman yang secara langsung berinteraksi dengan lingkungan tanah sehingga perubahan suhu pada zona perakaran dapat memengaruhi aktivitas fisiologis dan perkembangan akar. Suhu yang terlalu tinggi dapat meningkatkan tekanan lingkungan terhadap akar, terutama apabila

kondisi tersebut disertai dengan ketersediaan air yang rendah. Kurang optimalnya penyerapan air dan unsur hara oleh tanaman disebabkan karena tingginya suhu tanah dan rendahnya kelembapan sehingga resiko cekaman pada tanaman meningkat.

Dampak suhu tinggi pada tanah pasir juga berkaitan dengan kondisi permukaan tanah yang terbuka. Lahan pasir yang tidak memiliki penutup vegetasi memiliki permukaan yang lebih banyak menerima radiasi matahari secara langsung sehingga pemanasan tanah dapat berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, keberadaan vegetasi dapat memberikan naungan dan mengurangi jumlah radiasi yang secara langsung mencapai permukaan tanah. Serasah dan bahan organik yang berada di permukaan juga dapat membantu memberikan perlindungan terhadap perubahan suhu yang terlalu cepat. Oleh karena itu, penting adanya penutup tanah untuk menjaga kestabilan kondisi mikroklimat pada lingkungan perakaran.

Fluktuasi suhu yang tinggi pada tanah pasir pada akhirnya dapat memperbesar tingkat cekaman lingkungan yang dihadapi tanaman. Kondisi tersebut penting sekali pada fase awal pertumbuhan ketika akar tanaman belum berkembang secara luas dan air yang diperoleh tanaman masih terbatas. Tanaman yang tumbuh pada kondisi suhu tanah tinggi dan kelembapan rendah perlu melakukan penyesuaian fisiologis untuk mempertahankan keseimbangan air. Apabila cekaman berlangsung terus-menerus, pertumbuhan vegetatif dan perkembangan sistem perakaran dapat terganggu sehingga produktivitas tanaman berpotensi menurun.

Pengelolaan suhu tanah pada lahan pasir dapat dilakukan melalui upaya yang bertujuan meningkatkan perlindungan permukaan tanah dan mempertahankan kelembapan. Penanaman vegetasi penutup, penggunaan mulsa, serta penambahan bahan organik merupakan beberapa pendekatan yang dapat membantu mengurangi pemanasan langsung pada permukaan tanah. Bahan pembenah tanah seperti biochar juga berpotensi mendukung perbaikan kondisi

lingkungan tanah melalui peningkatan kemampuan tanah dalam mempertahankan air. Dengan kondisi kelembapan tanah yang lebih baik dan permukaan tanah yang lebih terlindungi, perubahan suhu di sekitar zona perakaran dapat ditekan sehingga lingkungan tumbuh tanaman menjadi lebih mendukung.

f. Rentan terhadap Erosi Angin

Permukaan tanah yang ringan dan bertekstur kasar menyebabkan butiran pasir mudah berpindah akibat hembusan angin. Fenomena ini sering dikenal sebagai *sand drift* dan menjadi salah satu penyebab kerusakan tanaman di wilayah pesisir. Pergerakan butiran pasir terjadi ketika kecepatan angin pada permukaan tanah telah mampu mengangkat atau menggerakkan partikel pasir, terutama pada kondisi permukaan tanah yang terbuka dan tidak memiliki penutup vegetasi yang memadai. Ukuran partikel pasir yang relatif seragam serta rendahnya kohesi antarpartikel menyebabkan material tersebut lebih mudah terlepas dari permukaan tanah dibandingkan tanah dengan kandungan liat dan bahan organik lebih tinggi. Proses perpindahan tersebut dapat berlangsung secara bertahap maupun dalam jumlah yang besar ketika terjadi hembusan angin yang kuat dan berlangsung dalam waktu yang cukup lama.

Tingkat kerentanan tanah pasir pantai terhadap erosi angin semakin tinggi karena kondisi permukaannya umumnya terbuka dan memiliki sedikit agregat tanah yang stabil. Vegetasi yang tumbuh pada lingkungan pesisir juga sering menghadapi keterbatasan air dan unsur hara sehingga tutupan tanaman tidak selalu mampu berkembang secara optimal untuk melindungi permukaan tanah. Ketika permukaan tanah tidak terlindungi oleh vegetasi, sisa tanaman, atau bahan penutup lainnya, energi angin dapat langsung berinteraksi dengan partikel pasir di permukaan. Partikel yang telah terlepas kemudian dapat bergerak melalui permukaan tanah dan terbawa menuju lokasi lain. Akumulasi material pasir pada suatu tempat dapat membentuk timbunan pasir, sedangkan bagian permukaan tanah

yang kehilangan material secara terus-menerus dapat mengalami perubahan kondisi permukaan dan penurunan kualitas lahan.

Perpindahan material tanah dan tekanan pada tanaman yang dibudidayakan, disebabkan karena angin yang menggerakan pasir. Butiran pasir yang terbawa angin dapat mengenai bagian tanaman, terutama batang dan daun, sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan mekanis pada jaringan tanaman. Pada tanaman yang masih muda, akumulasi pasir di sekitar pangkal tanaman juga dapat menimbun sebagian jaringan tanaman dan menghambat pertumbuhan. Sebaliknya, hilangnya lapisan pasir pada area perakaran dapat menyebabkan akar menjadi lebih terbuka terhadap kondisi lingkungan. Perubahan permukaan tanah tersebut dapat mengganggu kestabilan tanaman dan memperbesar risiko terjadinya cekaman pada tanaman yang tumbuh di wilayah pesisir.

Selain menyebabkan kerusakan langsung pada tanaman, erosi angin juga berpotensi memengaruhi distribusi bahan organik dan unsur hara pada permukaan tanah. Material tanah yang berpindah dapat membawa partikel halus, bahan organik, serta unsur hara yang terdapat pada lapisan permukaan. Meskipun tanah pasir didominasi oleh fraksi kasar, sebagian bahan organik dan partikel yang lebih halus tetap memiliki peran penting dalam mempertahankan unsur hara dan mendukung aktivitas biologis tanah. Hilangnya material permukaan secara berulang dapat mengurangi keberadaan komponen tersebut dan semakin memperbesar keterbatasan kesuburan alami tanah pasir. Kondisi ini menunjukkan bahwa erosi angin tidak hanya berkaitan dengan perpindahan fisik partikel tanah, tetapi juga dapat berhubungan dengan penurunan kualitas tanah dalam jangka panjang.

Kerentanan terhadap erosi angin dapat dikurangi melalui pengelolaan permukaan tanah dan peningkatan penutup vegetasi. Vegetasi berperan sebagai penghalang alami yang dapat mengurangi kecepatan angin di dekat permukaan tanah sekaligus melindungi tanah dari kontak langsung dengan energi angin. Sistem perakaran

tanaman juga membantu memperkuat dan menstabilkan material tanah di sekitar zona perakaran, sedangkan sisa tanaman atau bahan organik yang berada di permukaan dapat mengurangi bagian tanah yang terbuka. Oleh karena itu, pengelolaan tanah pasir pantai perlu memperhatikan keberadaan penutup tanah dan vegetasi sebagai bagian dari upaya konservasi untuk mengurangi perpindahan pasir serta mempertahankan kualitas tanah.

Dalam pengembangan pertanian di lahan pasir pantai, pengendalian erosi angin merupakan salah satu aspek penting dalam pengelolaan lahan secara berkelanjutan. Tindakan konservasi tidak semata-mata diarahkan untuk menekan kehilangan partikel tanah, tetapi juga membentuk kondisi permukaan yang lebih mantap sehingga mendukung pertumbuhan tanaman. Pemberian bahan organik dan pembenah tanah dapat diterapkan sebagai salah satu upaya memperbaiki kualitas tanah, terutama dengan meningkatkan kandungan bahan organik serta kemampuan tanah dalam menyimpan air dan mempertahankan ketersediaan unsur hara.

2.3. KARAKTERISTIK KIMIA TANAH

Selain memiliki keterbatasan fisik, tanah pasir pantai juga memiliki karakteristik kimia yang kurang mendukung pertumbuhan tanaman.

Karakteristik kimia tanah perlu dipahami sebagai bagian dari sistem pengelolaan lahan dan tanaman yang saling berhubungan. Kondisi tanah, ketersediaan air, pergerakan unsur hara, serta aktivitas biologis saling memengaruhi. Perubahan pada salah satu komponen dapat berdampak pada komponen lainnya, sehingga pengelolaan lahan perlu dilakukan secara terpadu.

2.3.1. Kandungan Material Organik Rendah

Material organik merupakan komponen penting dalam pembentukan agregat tanah dan penyedia unsur hara. Pada tanah pasir pantai, kandungan bahan organik umumnya sangat rendah akibat tingginya laju dekomposisi dan minimnya akumulasi sisa vegetasi. Rendahnya bahan organik menyebabkan tanah kurang subur serta memiliki kapasitas penyangga unsur hara yang rendah.

Material organik merupakan komponen penting yang memengaruhi berbagai fungsi tanah secara bersamaan. Keberadaannya berhubungan dengan pembentukan agregat, kapasitas menahan air, kapasitas pertukaran kation, dan aktivitas mikroorganisme. Pada tanah pasir pantai, rendahnya bahan organik membuat fungsi-fungsi tersebut belum berkembang secara optimal.

2.3.2. Kapasitas pertukaran kation (KPK) Rendah

Dominasi mineral kuarsa menyebabkan kapasitas pertukaran kation (*Cation Exchange Capacity*) sangat rendah. Kondisi ini mengakibatkan unsur hara seperti kalium (K^+), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan amonium (NH_4^+) mudah tercuci oleh air hujan sebelum dapat diserap tanaman.

Kapasitas pertukaran kation menggambarkan kemampuan tanah mempertahankan dan mempertukarkan kation yang dibutuhkan tanaman. Nilai yang rendah menyebabkan unsur seperti kalium, kalsium, magnesium, dan bentuk kation nitrogen lebih mudah berada dalam larutan tanah dan kemudian tercuci. Pada tanah berpasir, keterbatasan ini menjadi semakin penting karena pergerakan air berlangsung cepat.

2.3.3. Kandungan Unsur Hara Rendah

Sebagian besar tanah Pasir pantai umumnya miskin nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), sulfur (S), serta unsur mikro. Kondisi ini menyebabkan produktivitas tanaman bergantung pada pemupukan dan pengelolaan kesuburan tanah.

Rendahnya kandungan unsur hara pada tanah pasir pantai berkaitan dengan rendahnya bahan organik, kemampuan retensi kation yang terbatas, dan tingginya potensi pelindian. Unsur yang diberikan melalui pupuk dapat berpindah keluar dari zona perakaran sebelum diserap tanaman. Kondisi tersebut membuat efisiensi pemupukan menjadi isu penting.

2.3.4. Salinitas pada Wilayah Tertentu

Pada beberapa lokasi yang dekat dengan garis pantai, intrusi air laut dapat meningkatkan kadar garam tanah. Salinitas yang tinggi menyebabkan tekanan osmotik meningkat sehingga akar tanaman mengalami kesulitan menyerap air meskipun kondisi tanah tampak lembap.

Salinitas merupakan faktor pembatas yang dapat muncul pada sebagian wilayah pesisir akibat pengaruh air laut, intrusi, evaporasi tinggi, atau akumulasi garam. Dampaknya terhadap tanaman terutama berkaitan dengan meningkatnya tekanan osmotik sehingga tanaman lebih sulit mengambil air. Selain itu, ion tertentu dapat menimbulkan ketidakseimbangan hara apabila konsentrasinya tinggi.

2.3.5. Reaksi Tanah (pH)

Nilai pH tanah pasir pantai bervariasi tergantung bahan induk dan kondisi lingkungan. Pada daerah yang dipengaruhi material vulkanik, pH dapat bersifat agak masam hingga netral, sedangkan pada wilayah dengan pengaruh garam laut dapat mendekati netral hingga agak alkalis.

Reaksi tanah atau pH memengaruhi kelarutan, ketersediaan, dan mobilitas berbagai unsur hara. Perubahan pH dapat menggeser bentuk kimia unsur sehingga memengaruhi kemampuan akar menyerapnya. Oleh karena itu, pH perlu dilihat sebagai bagian dari sistem kesuburan, bukan sebagai parameter yang berdiri sendiri.

2.4. KARAKTERISTIK BIOLOGI TANAH

Komponen biologis merupakan indikator penting dalam menentukan kualitas tanah. Pada tanah pasir pantai, aktivitas biologis umumnya masih rendah karena keterbatasan bahan organik.

Karakteristik biologi tanah perlu dipahami sebagai bagian dari sistem pengelolaan lahan dan tanaman yang saling terhubung. Kondisi tanah, ketersediaan air, pergerakan unsur hara, serta aktivitas organisme tanah tidak berjalan sendiri-sendiri. Perubahan dalam satu komponen dapat berdampak pada komponen lainnya, sehingga pengelolaan efektif membutuhkan pendekatan yang terpadu.

2.4.1. Populasi Mikroorganisme Rendah

Jumlah bakteri, fungi, aktinomiset, maupun mikroorganisme pelarut fosfat relatif sedikit karena sumber karbon sebagai substrat mikroba sangat terbatas.

Kehidupan mikroorganisme tanah sangat dipengaruhi oleh ketersediaan karbon sebagai sumber energi, air, oksigen, dan kondisi kimia media. Tanah pasir pantai yang miskin bahan organik cenderung menyediakan sumber energi yang terbatas sehingga populasi dan aktivitas mikroba dapat lebih rendah. Kondisi tersebut berpengaruh terhadap proses dekomposisi dan transformasi unsur hara.

2.4.2. Aktivitas Biologi Rendah

Penguraian bahan organik berlangsung kurang optimal sehingga perputaran hara berjalan lebih lambat dibandingkan pada tanah yang lebih subur.

Aktivitas mikroorganisme tanah dipengaruhi oleh ketersediaan karbon sebagai sumber energi, air, oksigen, serta kondisi kimia lingkungan. Tanah pasir pantai yang rendah bahan organik umumnya memiliki sumber energi terbatas, sehingga jumlah dan aktivitas mikroba cenderung lebih rendah. Kondisi ini selanjutnya memengaruhi proses penguraian bahan organik dan perubahan bentuk unsur hara.

2.4.3. Biomassa Mikroba Terbatas

Biomassa mikroba tanah merupakan indikator kesehatan tanah. Pada tanah Pasir pantai, biomassa mikroba umumnya rendah sehingga efisiensi mineralisasi unsur hara juga menjadi terbatas.

Kehidupan mikroorganisme tanah sangat dipengaruhi oleh ketersediaan karbon sebagai sumber energi, air, oksigen, dan kondisi kimia media. Tanah pasir pantai yang miskin bahan organik cenderung menyediakan sumber energi yang terbatas sehingga populasi dan aktivitas mikroba dapat lebih rendah. Kondisi tersebut berpengaruh terhadap proses dekomposisi dan transformasi unsur hara.

2.5. KENDALA PEMANFAATAN TANAH PASIR PANTAI UNTUK PERTANIAN

Karakteristik tanah Pasir pantai menyebabkan berbagai kendala dalam pengembangan pertanian, antara lain:

Kendala budidaya pada tanah pasir pantai pada dasarnya merupakan rangkaian persoalan yang saling berhubungan. Kehilangan air yang cepat dapat diikuti oleh kehilangan unsur hara, sedangkan rendahnya bahan

organik membatasi kemampuan tanah memperbaiki kondisi tersebut secara alami. Akibatnya, tanaman menghadapi lingkungan yang berubah cepat dan membutuhkan pengelolaan yang lebih intensif.

2.5.1. Rendahnya Efisiensi Pemupukan

Karena kapasitas menahan unsur hara sangat rendah, pupuk yang diberikan mudah mengalami pelindian (*leaching*). Kondisi ini menyebabkan efisiensi pemupukan menjadi rendah dan biaya produksi meningkat.

Kendala budidaya pada tanah pasir pantai pada dasarnya merupakan rangkaian persoalan yang saling berhubungan. Kehilangan air yang cepat dapat diikuti oleh kehilangan unsur hara, sedangkan rendahnya bahan organik membatasi kemampuan tanah memperbaiki kondisi tersebut secara alami. Akibatnya, tanaman menghadapi lingkungan yang berubah cepat dan membutuhkan pengelolaan yang lebih intensif.

2.5.2. Ketersediaan Air Terbatas

Air irigasi yang diberikan cepat meresap ke lapisan bawah sehingga tanaman memerlukan frekuensi penyiraman yang lebih tinggi dibandingkan pada tanah bertekstur sedang atau berat.

Kendala budidaya pada tanah pasir pantai pada dasarnya merupakan rangkaian persoalan yang saling berhubungan. Kehilangan air yang cepat dapat diikuti oleh kehilangan unsur hara, sedangkan rendahnya bahan organik membatasi kemampuan tanah memperbaiki kondisi tersebut secara alami. Akibatnya, tanaman menghadapi lingkungan yang berubah cepat dan membutuhkan pengelolaan yang lebih intensif.

2.5.3. Produktivitas Tanaman Rendah

Kombinasi keterbatasan air, unsur hara, dan bahan organik menyebabkan pertumbuhan tanaman sering kali tidak optimal. Tanpa pengelolaan yang tepat, hasil panen cenderung rendah.

Kendala budidaya pada tanah pasir pantai pada dasarnya merupakan rangkaian persoalan yang saling berhubungan. Kehilangan air yang cepat dapat diikuti oleh kehilangan unsur hara, sedangkan rendahnya bahan organik membatasi kemampuan tanah memperbaiki kondisi tersebut secara alami. Akibatnya, tanaman menghadapi lingkungan yang berubah cepat dan membutuhkan pengelolaan yang lebih intensif.

2.5.4. Risiko Kekeringan Tinggi

Pada musim kemarau, tanah pasir pantai kehilangan kelembapan dengan cepat sehingga tanaman rentan mengalami stres air yang dapat menurunkan hasil maupun kualitas produksi.

Kendala budidaya pada tanah pasir pantai pada dasarnya merupakan rangkaian persoalan yang saling berhubungan. Kehilangan air yang cepat dapat diikuti oleh kehilangan unsur hara, sedangkan rendahnya bahan organik membatasi kemampuan tanah memperbaiki kondisi tersebut secara alami. Akibatnya, tanaman menghadapi lingkungan yang berubah cepat dan membutuhkan pengelolaan yang lebih intensif.

2.5.5. Ancaman Perubahan Iklim

Perubahan pola curah hujan, kenaikan suhu, dan peningkatan intrusi air laut akibat perubahan iklim semakin memperbesar tantangan pengelolaan lahan pasir pantai. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan adaptif dalam sistem budidaya untuk meningkatkan ketahanan produksi.

Kendala budidaya pada tanah pasir pantai pada dasarnya merupakan rangkaian persoalan yang saling berhubungan. Kehilangan air yang cepat

dapat diikuti oleh kehilangan unsur hara, sedangkan rendahnya bahan organik membatasi kemampuan tanah memperbaiki kondisi tersebut secara alami. Akibatnya, tanaman menghadapi lingkungan yang berubah cepat dan membutuhkan pengelolaan yang lebih intensif.

2.6. TANTANGAN DAN PELUANG PENGELOLAAN TANAH PASIR PANTAI

Meskipun memiliki sejumlah keterbatasan, tanah pasir pantai tetap berpotensi dikembangkan apabila dikelola secara tepat. Kendala utamanya meliputi peningkatan kemampuan tanah menahan air dan hara, perbaikan struktur, serta penguatan aktivitas biologis. Beragam teknologi telah dikembangkan untuk mengatasi kendala tersebut, antara lain:

- pemberian pupuk organik dalam menaikkan jumlah karbon organik dan memperbaiki agregasi tanah;
- penggunaan biochar sebagai amelioran untuk meningkatkan kapasitas pertukaran kation, retensi air, dan stabilitas struktur tanah;
- pemakaian kompos, kasgot (frass *Black Soldier Fly*), dan material organik lokal untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah;
- inokulasi mikroorganisme hayati seperti *Rhizobium*, mikoriza, dan bakteri pelarut fosfat guna meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara;
- penerapan mulsa organik maupun plastik untuk mengurangi evaporasi dan menjaga kelembapan tanah;
- peningkatan efisiensi penggunaan air dengan sistem irigasi tetes (*drip irrigation*);
- Penurunan erosi angin dan perbaikan kondisi mikroklimat dengan penanaman tanaman penutup tanah (*cover crops*) atau vegetasi penahan angin (*windbreaks*).

Penerapan strategi tersebut secara terpadu dapat meningkatkan produktivitas tanah pasir pantai sekaligus mendukung sistem pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Pengelolaan tanah pasir pantai membutuhkan keseimbangan antara perbaikan produktivitas dan perlindungan fungsi ekologis kawasan pesisir. Tidak semua lahan pantai harus diarahkan menjadi lahan pertanian, sehingga pemanfaatan perlu mempertimbangkan zonasi, fungsi perlindungan pantai, dan kesesuaian penggunaan lahan. Pada lokasi yang memang sesuai untuk pertanian, teknologi ameliorasi dapat digunakan untuk mengurangi faktor pembatas.

2.7. IMPLIKASI TERHADAP BUDIDAYA KEDELAI

Kedelai merupakan tanaman legum yang memiliki kemampuan beradaptasi pada berbagai kondisi lingkungan, termasuk lahan marginal, apabila faktor pembatas dapat diminimalkan. Pada tanah pasir pantai, keberhasilan budidaya kedelai sangat dipengaruhi oleh pengelolaan kelembapan tanah, peningkatan kandungan bahan organik, ketersediaan fosfor dan kalium, serta pembentukan bintil akar yang efektif melalui simbiosis dengan *Rhizobium*. Penambahan biochar dan pupuk organik terbukti mampu memperbaiki retensi air, meningkatkan efisiensi pemupukan, serta menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi perkembangan akar dan aktivitas mikroba tanah. Dengan demikian, pendekatan pengelolaan terpadu menjadi kunci untuk meningkatkan produktivitas kedelai pada tanah Pasir pantai.

Karakteristik tanah pasir pantai secara langsung menentukan teknik budidaya kedelai yang diperlukan. Sistem perakaran harus memperoleh air dan unsur hara dalam kondisi yang relatif stabil, sementara media harus tetap menyediakan aerasi yang cukup. Perbaikan lingkungan perakaran menjadi titik temu antara pengelolaan tanah dan kebutuhan fisiologis tanaman.

Pembahasan mengenai perlu dilihat sebagai bagian dari sistem pengelolaan lahan dan tanaman yang saling berkaitan. Kondisi tanah, ketersediaan air, dinamika unsur hara, dan aktivitas biologis tidak

berlangsung secara terpisah. Perubahan pada satu komponen dapat memengaruhi komponen lain sehingga pengelolaan yang efektif memerlukan pendekatan terpadu.

2.8. KESIMPULAN

Tanah pasir pantai (Pasir pantai) merupakan lahan marginal yang dicirikan oleh tekstur kasar, kandungan bahan organik rendah, kapasitas pertukaran kation rendah, kemampuan menahan air yang terbatas, serta aktivitas biologi tanah yang relatif rendah. Karakteristik tersebut menjadi faktor pembatas utama dalam budidaya tanaman karena menyebabkan rendahnya efisiensi penggunaan air dan pupuk serta tingginya risiko cekaman kekeringan.

Namun demikian, keterbatasan tersebut bukan merupakan hambatan yang tidak dapat diatasi. Melalui penerapan teknologi pengelolaan tanah yang tepat, seperti penggunaan biochar, pupuk organik, kasgot, mikroorganisme hayati, sistem irigasi hemat air, dan teknik konservasi tanah, kualitas tanah Pasir pantai dapat ditingkatkan secara signifikan. Oleh karena itu, tanah pasir pantai memiliki prospek yang besar sebagai sumber pengembangan pertanian berkelanjutan, khususnya untuk komoditas adaptif seperti kedelai, sekaligus menjadi bagian dari strategi optimalisasi lahan marginal dalam mendukung ketahanan pangan nasional.

BAB 3

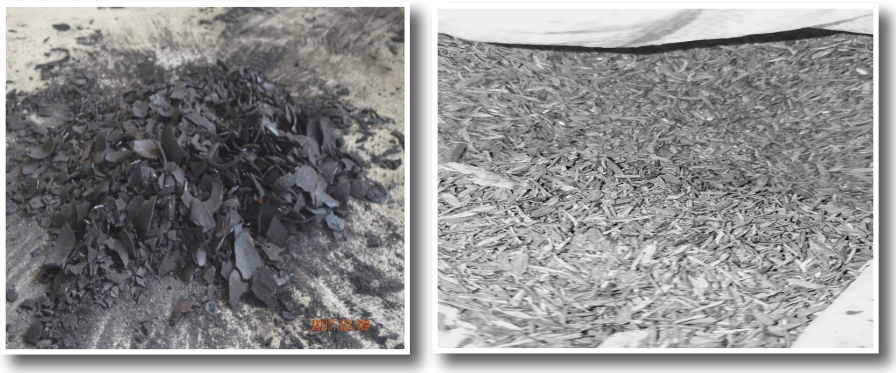
PERAN BIOCHAR SEBAGAI SOIL AMELIORANT

3.1. PENDAHULUAN

Penggunaan biochar semakin banyak terutama sebagai soil ameliorant untuk memperbaiki kualitas tanah, terutama pada lahan marginal. Istilah soil ameliorant digunakan untuk menyebut bahan yang ditambahkan ke dalam tanah guna memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Perbaikan tersebut diharapkan dapat menciptakan kondisi tanah yang lebih sesuai bagi pertumbuhan tanaman sekaligus meningkatkan produktivitas lahan secara berkelanjutan. Berbeda dengan pupuk yang terutama berfungsi menyediakan unsur hara, biochar berperan dalam memperbaiki kondisi lingkungan tumbuh tanaman. Peran tersebut antara lain ditunjukkan melalui kemampuannya dalam meningkatkan daya simpan air, mempertahankan unsur hara di dalam tanah, dan menyediakan kondisi yang mendukung aktivitas mikroorganisme.

Biochar dibuat melalui proses pirolisis, yaitu pemanasan biomassa pada suhu sekitar 300–700 °C dengan jumlah oksigen yang terbatas. Proses tersebut menghasilkan bahan berwarna hitam yang kaya karbon, memiliki struktur berpori dan luas permukaan spesifik yang tinggi, serta relatif sulit terurai. Berbagai jenis limbah biomassa dapat digunakan sebagai bahan baku biochar, seperti tempurung kelapa, sekam padi, tongkol jagung, serbuk gergaji, limbah kehutanan, dan residu pertanian lainnya. Pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku biochar tidak hanya membantu mengurangi beban pencemaran lingkungan, tetapi juga

menghasilkan produk bernilai tambah yang dapat mendukung pertanian berkelanjutan dan penerapan konsep ekonomi sirkular.



Gambar 3.1 Biochar Berbahan Baku dari Tempurung Kelapa dan Sekam Padi

Dalam budidaya tanaman di lahan marginal, khususnya tanah pasir pantai (Pasir pantai), biochar memiliki potensi sebagai salah satu bahan pembenah tanah. Pemberian biochar dapat membantu mengurangi beberapa kendala utama pada tanah tersebut, antara lain kandungan bahan organik yang rendah, kapasitas pertukaran kation (KPK) yang rendah, kemampuan menahan air yang terbatas, serta tingginya kehilangan unsur hara akibat proses pelindian (*leaching*).



Gambar 3.2 Biochar Halus

3.2. KONSEP BIOCHAR SEBAGAI *SOIL AMELIORANT*

Pada dasarnya, biochar merupakan bahan padat yang kaya karbon dan diperoleh melalui proses pirolisis biomassa dengan ketersediaan oksigen yang terbatas. Material ini banyak dimanfaatkan sebagai pembenah atau amelioran tanah (*soil amendment* atau *soil ameliorant*). Sifat dan karakteristik biochar sangat bergantung pada jenis bahan baku, temperatur pirolisis, waktu proses, serta teknik produksi yang digunakan. Biochar berbahan biomassa berkayu umumnya mempunyai kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) yang tinggi dan relatif stabil, sedangkan biochar yang berasal dari limbah pertanian biasanya memiliki kandungan abu dan unsur hara yang lebih tinggi.

Dalam perannya sebagai *soil ameliorant*, biochar memberikan manfaat melalui beberapa mekanisme, antara lain meningkatkan kemampuan tanah menahan air, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas pertukaran kation, menjadi tempat hidup bagi mikroorganisme tanah, dan menekan kehilangan unsur hara. Berkat strukturnya yang relatif stabil, biochar dapat bertahan dalam tanah selama puluhan hingga ratusan tahun. Oleh karena itu, pengaruhnya terhadap kualitas tanah dapat berlangsung lebih lama dibandingkan bahan organik segar yang umumnya lebih mudah mengalami dekomposisi.

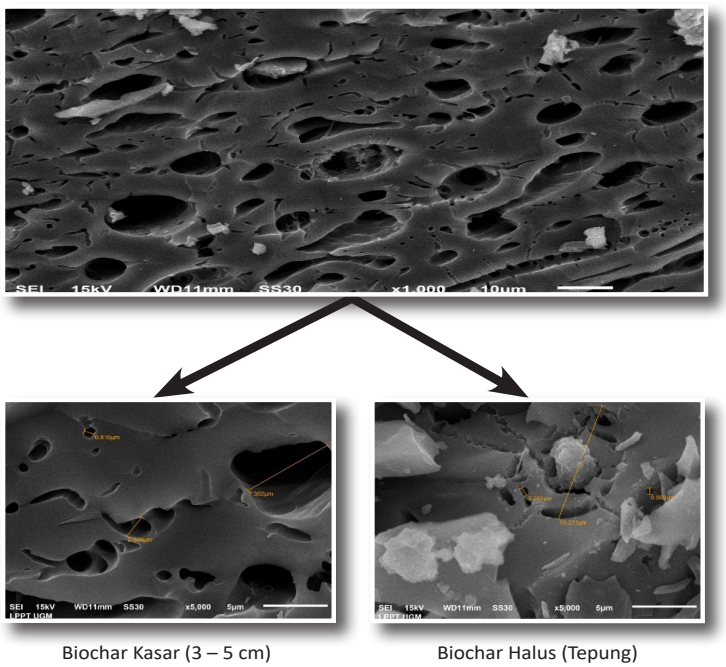
3.3. KARAKTERISTIK BIOCHAR YANG MENDUKUNG PERBAIKAN TANAH

Efektivitas biochar sebagai pembenah tanah berkaitan erat dengan karakteristik fisik dan kimianya. Karakteristik biochar menentukan fungsi yang dapat diberikan setelah bahan tersebut masuk ke dalam tanah. Ukuran dan distribusi pori memengaruhi kemampuan menahan air, sedangkan permukaan dan gugus fungsi memengaruhi interaksi dengan kation serta molekul organik. Stabilitas karbon menentukan lamanya sebagian karbon dapat bertahan di dalam tanah.

3.3.1. Struktur Berpori

Biochar memiliki jaringan pori mikro, meso, dan makro yang terbentuk selama proses pirolisis. Struktur ini meningkatkan luas permukaan spesifik sehingga biochar mampu menyerap dan menyimpan air serta unsur hara dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan tanah berpasir tanpa perlakuan. Porositas biochar dapat mencapai lebih dari 70%, tergantung jenis bahan baku dan suhu pirolisis. Biochar dari tempurung kelapa, misalnya, memiliki pori yang lebih halus dan stabil, sementara biochar dari sekam padi memiliki pori lebih besar dan ringan (Herlambang et al., 2023).

Struktur dan komposisi biochar menjelaskan mengapa bahan ini dapat berfungsi sebagai soil ameliorant. Pori menyediakan ruang mikro yang dapat menyimpan air atau menjadi tempat berlangsungnya interaksi antara larutan tanah dan permukaan biochar. Sementara itu, karbon yang relatif stabil membuat sebagian efek pembenah dapat bertahan lebih lama dibandingkan bahan organik yang cepat terdekomposisi.



Gambar 3.3 Bentuk dan ukuran struktur ronga (void) biochar berbahan tempurung kelapa (Herlambang et al., 2019)

3.3.2. Kandungan Karbon Stabil

Sebagian besar karbon dalam biochar berada dalam bentuk karbon aromatik yang resisten terhadap dekomposisi mikroba. Karakteristik ini menjadikan biochar sebagai media penyimpan karbon (carbon sequestration) yang berperan dalam mitigasi perubahan iklim. Biochar mengandung 50–90% karbon stabil, tergantung suhu pirolisis. Kandungan karbon ini penting untuk memperbaiki rasio C/N tanah dan menstimulasi aktivitas mikroorganisme (Herlambang et al., 2023b).

Struktur dan komposisi biochar menjelaskan mengapa bahan ini dapat berfungsi sebagai soil ameliorant. Pori menyediakan ruang mikro yang dapat menyimpan air atau menjadi tempat berlangsungnya interaksi antara larutan tanah dan permukaan biochar. Sementara itu, karbon yang relatif stabil membuat sebagian efek pembenah dapat bertahan lebih lama dibandingkan bahan organik yang cepat terdekomposisi. Herlambang et al. (2019) menyatakan bahwa biochar mampu memberikan kontribusi karbon yang besar dan bersifat stabil, sehingga dapat menjaga keseimbangan bahan organik tanah terutama di lahan-lahan terdegradasi atau yang miskin bahan organik.

3.3.3. Kapasitas pertukaran kation Tinggi

Biochar memiliki gugus fungsi permukaan, seperti karboksil (-COOH), hidroksil (-OH), dan fenolik, yang dapat mengikat ion positif. Kondisi tersebut meningkatkan kapasitas pertukaran kation tanah dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman.

Struktur dan komposisi biochar menjelaskan mengapa bahan ini dapat berfungsi sebagai soil ameliorant. Pori menyediakan ruang mikro yang dapat menyimpan air atau menjadi tempat berlangsungnya interaksi antara larutan tanah dan permukaan biochar. Sementara itu, karbon yang relatif stabil membuat sebagian efek pembenah dapat bertahan lebih lama dibandingkan bahan organik yang cepat terdekomposisi.

3.3.4. Stabilitas Kimia

Biochar relatif tahan terhadap pelapukan sehingga mampu mempertahankan struktur tanah dalam jangka waktu yang lama. Stabilitas ini membuat biochar efektif digunakan sebagai teknologi rehabilitasi lahan terdegradasi. Struktur dan komposisi biochar menjelaskan mengapa bahan ini dapat berfungsi sebagai soil ameliorant. Pori menyediakan ruang mikro yang dapat menyimpan air atau menjadi tempat berlangsungnya interaksi antara larutan tanah dan permukaan biochar. Sementara itu, karbon yang relatif stabil membuat sebagian efek pembenah dapat bertahan lebih lama dibandingkan bahan organik yang cepat terdekomposisi.

3.4. PERAN BIOCHAR TERHADAP SIFAT FISIK TANAH

Perbaikan sifat fisik merupakan salah satu manfaat utama biochar, terutama pada tanah bertekstur kasar seperti Pasir pantai.

Perbaikan sifat fisik melalui biochar terutama berkaitan dengan perubahan distribusi ruang pori dan hubungan air-tanah. Menurut Herlambang et al. (2024), struktur pori biochar berperan penting dalam menyimpan air, menyediakan ruang bagi udara dan mikroorganisme, serta menahan unsur hara agar tidak mudah tercuci. Biochar yang memiliki banyak pori dapat meningkatkan volume ruang yang mampu menyimpan air, terutama ketika partikel tersebut bercampur dengan tanah berpasir. Namun, besarnya perubahan sangat dipengaruhi oleh dosis, ukuran partikel, dan sifat awal tanah.

3.4.1. Meningkatkan Kapasitas Menahan Air

Pori-pori biochar mampu menyimpan air yang kemudian dilepaskan secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman. Pada tanah pasir pantai, penambahan biochar meningkatkan available water capacity, sehingga tanaman lebih tahan terhadap cekaman kekeringan.

Perbaikan sifat fisik melalui biochar terutama berkaitan dengan perubahan distribusi ruang pori dan hubungan air-tanah. Biochar yang memiliki banyak pori dapat meningkatkan volume ruang yang mampu menyimpan air, terutama ketika partikel tersebut bercampur dengan tanah berpasir. Namun, besarnya perubahan sangat dipengaruhi oleh dosis, ukuran partikel, dan sifat awal tanah.

3.4.2. Memperbaiki Struktur Tanah

Biochar berfungsi sebagai inti pembentukan agregat tanah (*aggregate nucleus*) yang memperkuat ikatan antarpartikel. Struktur tanah yang lebih stabil meningkatkan aerasi, infiltrasi, dan perkembangan sistem perakaran.

Perbaikan sifat fisik melalui biochar terutama berkaitan dengan perubahan distribusi ruang pori dan hubungan air-tanah. Biochar yang memiliki banyak pori dapat meningkatkan volume ruang yang mampu menyimpan air, terutama ketika partikel tersebut bercampur dengan tanah berpasir. Namun, besarnya perubahan sangat dipengaruhi oleh dosis, ukuran partikel, dan sifat awal tanah.

3.4.3. Mengurangi Kepadatan Isi (*Bulk Density*)

Karena memiliki massa jenis yang relatif rendah, penambahan biochar dapat menurunkan *bulk density* tanah. Penurunan kepadatan tanah memudahkan penetrasi akar, meningkatkan ruang pori, dan memperbaiki sirkulasi udara dalam tanah.

Perbaikan sifat fisik melalui biochar terutama berkaitan dengan perubahan distribusi ruang pori dan hubungan air-tanah. Biochar yang memiliki banyak pori dapat meningkatkan volume ruang yang mampu menyimpan air, terutama ketika partikel tersebut bercampur dengan tanah

berpasir. Namun, besarnya perubahan sangat dipengaruhi oleh dosis, ukuran partikel, dan sifat awal tanah.

3.4.4. Mengurangi Erosi dan Kehilangan Air

Perbaikan agregasi tanah meningkatkan ketahanan terhadap erosi oleh angin maupun air. Struktur pori biochar memungkinkan tanah meningkatkan retensi air hingga 20–30% pada tanah berpasir, dan memperbaiki agregasi tanah di lahan marginal (Herlambang et al., 2024). Pada lahan pasir pantai, kondisi ini penting untuk menjaga stabilitas permukaan tanah dan mengurangi kehilangan partikel halus.

Perbaikan sifat fisik melalui biochar terutama berkaitan dengan perubahan distribusi ruang pori dan hubungan air-tanah. Biochar yang memiliki banyak pori dapat meningkatkan volume ruang yang mampu menyimpan air, terutama ketika partikel tersebut bercampur dengan tanah berpasir. Namun, besarnya perubahan sangat dipengaruhi oleh dosis, ukuran partikel, dan sifat awal tanah.

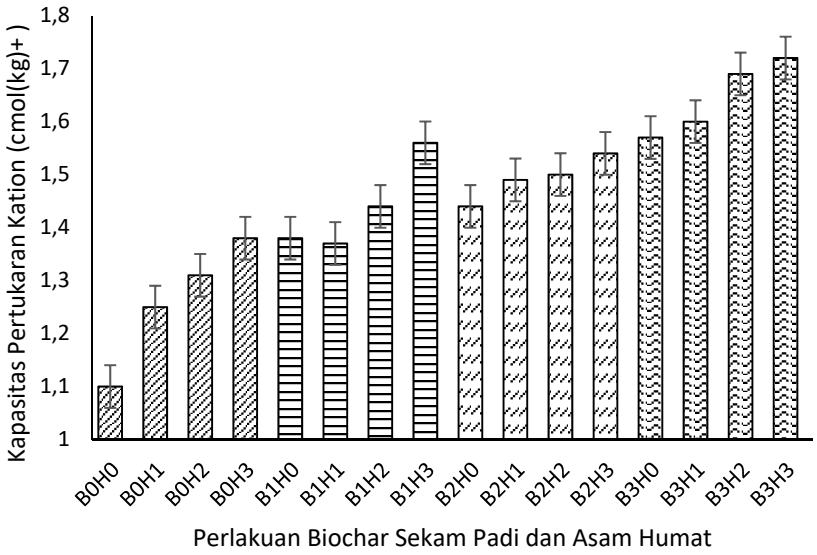
3.5. PERAN BIOCHAR TERHADAP SIFAT KIMIA TANAH

Peran biochar terhadap sifat kimia tanah berhubungan dengan permukaan aktif, gugus fungsi, dan kandungan mineral pada bahan. Permukaan tersebut dapat berinteraksi dengan kation sehingga sebagian unsur hara lebih lama berada dalam sistem tanah. Pada tanah pasir pantai, fungsi ini penting untuk mengurangi kehilangan unsur yang mudah tercuci.

3.5.1. Meningkatkan Kapasitas Pertukaran Kation (KPK)

Peningkatan KPK memungkinkan tanah menyerap dan mempertahankan unsur hara lebih lama sehingga kehilangan akibat pelindian menjadi lebih rendah. Struktur biochar yang kompleks dan kaya gugus fungsi permukaan

(seperti karboksil, fenol, dan hidroksil) memberikan kemampuan tinggi dalam menahan dan menukar ion hara seperti K^+, NH_4^+, dan Ca^{2+}. Hasil penelitian pada tanah pasir pantai menunjukkan bahwa aplikasi biochar dan asam humat dapat meningkatkan kapasitas pertukaran kation (KPK) tanah. Tanah yang digunakan pada penelitian memiliki nilai KPK awal sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1}, yang menunjukkan rendahnya kemampuan tanah pasir dalam mempertahankan kation hara. Setelah pemberian biochar dan asam humat, nilai KPK tertinggi diperoleh pada kombinasi perlakuan biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3), yaitu sebesar 1,72 cmol(+) kg^{-1}.



Gambar 3.4. Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap KPK Tanah Pasir Pantai

Efek ini sangat penting pada tanah Pasir pantai yang secara alami memiliki KPK rendah.

Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa penambahan biochar dapat memperbaiki kemampuan tanah dalam mempertahankan kation di dalam zona perakaran. Permukaan biochar yang memiliki pori dan gugus fungsional dapat menyediakan tempat pertukaran bagi kation, sedangkan

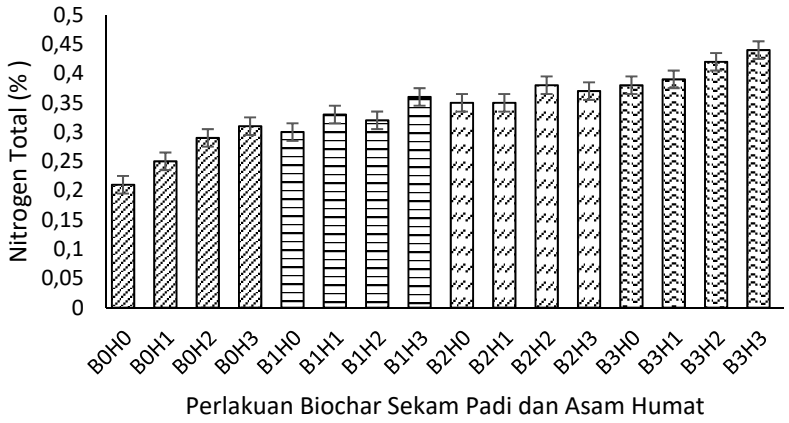
asam humat memiliki gugus fungsional yang mampu berinteraksi dengan kation maupun permukaan mineral tanah. Kombinasi keduanya berpotensi memperkuat kemampuan tanah pasir dalam mempertahankan unsur hara yang sebelumnya mudah hilang melalui pelindian.

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa perbaikan KPK menjadi salah satu mekanisme penting dalam pengelolaan tanah pasir pantai. Peningkatan kemampuan tanah mempertahankan kation dapat menciptakan kondisi yang lebih mendukung bagi ketersediaan unsur hara bagi tanaman, terutama pada tanah dengan kapasitas retensi hara yang rendah.

3.5.2. Meningkatkan Efisiensi Pemupukan

Biochar mampu mengadsorpsi nitrogen, fosfor, kalium, dan unsur hara lainnya sehingga pelepasannya berlangsung lebih bertahap. Dengan demikian, efisiensi penggunaan pupuk meningkat dan kebutuhan pupuk anorganik dapat dikurangi. Kendala budidaya pada tanah pasir pantai pada dasarnya merupakan rangkaian persoalan yang saling berhubungan. Kehilangan air yang cepat dapat diikuti oleh kehilangan unsur hara, sedangkan rendahnya bahan organik membatasi kemampuan tanah memperbaiki kondisi tersebut secara alami. Akibatnya, tanaman menghadapi lingkungan yang berubah cepat dan membutuhkan pengelolaan yang lebih intensif. Respons peningkatan ketersediaan hara juga terlihat pada hasil penelitian menggunakan tanah pasir pantai.

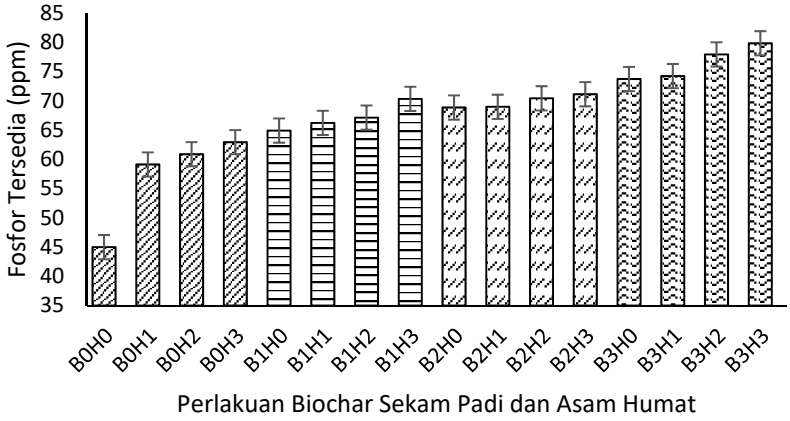
Kandungan N-total tanah sebelum perlakuan sebesar 0,215%, sedangkan setelah pemberian biochar dan asam humat nilai tertinggi mencapai 0,44% pada kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3).



Gambar 3.5. Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap N-total Tanah Pasir Pantai

Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan tanah dengan bahan amelioran dapat meningkatkan keberadaan nitrogen dalam sistem tanah.

Selain nitrogen, ketersediaan fosfor juga menunjukkan respons terhadap perlakuan. Nilai P-tersedia awal tanah sebesar 44,98 ppm dan meningkat hingga 79,80 ppm setelah perlakuan.



Gambar 3.6 Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap P-tersedia Tanah Pasir Pantai

Peningkatan ketersediaan fosfor menunjukkan bahwa perbaikan kondisi kimia tanah dapat mendukung keberadaan unsur hara dalam bentuk yang lebih mudah tersedia bagi tanaman.

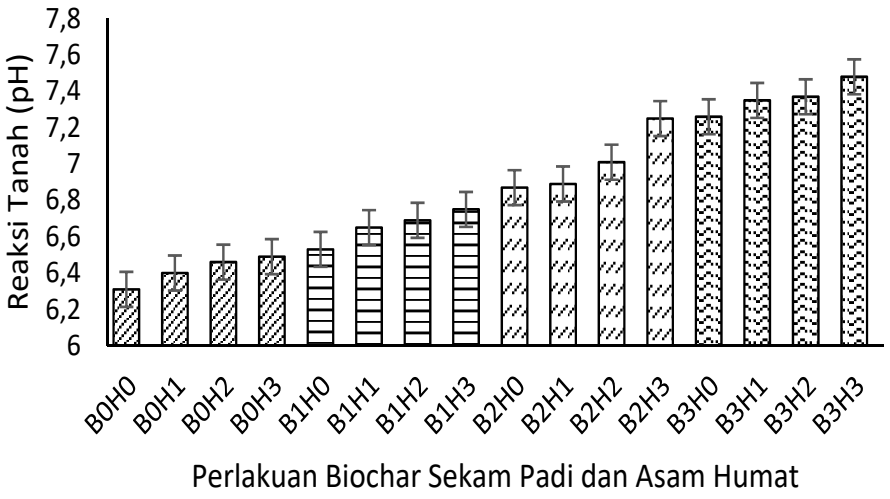
Pada tanah pasir pantai, keberadaan unsur hara sangat dipengaruhi oleh kemampuan tanah mempertahankan hara dari kehilangan. Biochar dapat berperan sebagai tempat adsorpsi sementara bagi unsur hara, sedangkan asam humat memiliki gugus fungsional yang dapat berinteraksi dengan unsur dan komponen tanah. Dengan demikian, kombinasi keduanya dapat membantu menciptakan kondisi tanah yang lebih mampu mempertahankan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman.

Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa respons setiap unsur hara tidak selalu identik. Peningkatan N-total dan P-tersedia perlu dipahami sebagai bagian dari perubahan keseluruhan kondisi kimia tanah, bukan semata-mata akibat penambahan unsur hara dari bahan amelioran.

3.5.3. Menstabilkan Reaksi Tanah (pH)

Banyak jenis biochar bersifat netral hingga agak alkalis sehingga mampu meningkatkan pH tanah yang masam. Kebanyakan biochar bersifat basa (pH 7–10), tergantung pada bahan baku dan suhu pirolisis. Biochar dari bahan lignoselulosa (kayu, tempurung kelapa) biasanya memiliki pH yang lebih tinggi dibanding biochar dari limbah hewan. Sifat ini menjadikannya efektif dalam menetralkan tanah yang asam (Herlambang et al., 2023c).

Perubahan pH menuju kisaran optimum meningkatkan ketersediaan unsur hara dan mengurangi toksisitas aluminium pada tanah masam. Pada penelitian menggunakan tanah pasir pantai, pH awal tanah sebesar 6,31. Setelah pemberian biochar, nilai pH meningkat dan nilai tertinggi mencapai 7,37 pada perlakuan biochar 20 ton ha^{-1}.



Gambar 3.7 Pengaruh Pemberian Biochar Sekam Padi dan Asam Humat Terhadap pH Tanah Pasir Pantai

Hasil tersebut menunjukkan bahwa biochar dapat memberikan perubahan terhadap reaksi tanah, terutama pada tanah dengan kondisi awal yang relatif rendah bahan organik.

Menariknya, respons pH pada penelitian tersebut tidak menunjukkan adanya interaksi antara biochar dan asam humat. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh bahan amelioran terhadap sifat kimia tanah tidak selalu terjadi melalui pola yang sama. Biochar memberikan pengaruh yang lebih jelas terhadap perubahan pH, sedangkan penambahan asam humat tidak menunjukkan pengaruh interaksi yang nyata terhadap parameter tersebut.

Perubahan pH perlu diperhatikan dalam pengelolaan tanah karena pH berkaitan dengan ketersediaan berbagai unsur hara. Namun, peningkatan pH tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator keberhasilan ameliorasi tanah. Perubahan pH perlu dipertimbangkan bersama dengan KPK, ketersediaan unsur hara, kandungan bahan organik, serta respons pertumbuhan tanaman.

3.5.4. Mengurangi Pelindian Unsur Hara

Pada tanah berpasir, biochar berperan sebagai penyerap sementara ion-ion hara sehingga unsur tersebut tetap berada di zona perakaran dan dapat dimanfaatkan tanaman secara lebih efisien. Peran biochar terhadap sifat kimia tanah berhubungan dengan permukaan aktif, gugus fungsi, dan kandungan mineral pada bahan. Permukaan tersebut dapat berinteraksi dengan kation sehingga sebagian unsur hara lebih lama berada dalam sistem tanah. Pada tanah pasir pantai, fungsi ini penting untuk mengurangi kehilangan unsur yang mudah tercuci.

3.6. PERAN BIOCHAR TERHADAP SIFAT BIOLOGI TANAH

Biochar dapat memengaruhi komunitas mikroorganisme melalui perubahan habitat dan kondisi lingkungan. Pori-pori mikro menyediakan permukaan yang dapat ditempati mikroba, sementara retensi air yang lebih baik membantu menjaga kelembapan pada skala mikro. Perubahan tersebut dapat menjadi lebih nyata ketika tersedia sumber karbon atau bahan organik yang dapat dimanfaatkan mikroba.

3.6.1. Menyediakan Habitat Mikroorganisme

Struktur berpori biochar menyediakan ruang yang terlindung bagi bakteri, fungi, aktinomiset, dan mikroorganisme tanah lainnya. Mikrohabitat ini membantu meningkatkan kelangsungan hidup mikroba, terutama pada kondisi lingkungan yang ekstrem.

3.6.2. Meningkatkan Aktivitas Mikroba Tanah

Peningkatan kelembapan, aerasi, dan ketersediaan karbon membentuk kondisi yang mendukung aktivitas mikroba. Aktivitas ini mempercepat penguraian bahan organik serta berlangsungnya siklus unsur hara.

3.6.3. Mendukung Simbiosis dengan Mikroba Menguntungkan

Pada tanaman legum, seperti kedelai, biochar dapat memperkuat hubungan simbiotik akar dengan bakteri Rhizobium. Perkembangan bintil akar yang optimal mendorong fiksasi nitrogen secara biologis sehingga penggunaan pupuk nitrogen dapat dikurangi. Biochar juga membantu kolonisasi fungi mikoriza arbuskular (Arbuscular Mycorrhizal Fungi/ AMF), sehingga penyerapan fosfor, air, serta unsur hara mikro menjadi lebih efektif.

3.6.4. Stimulasi Pertumbuhan Akar

Struktur pori memudahkan pertumbuhan rambut akar dan meningkatkan panjang akar primer hingga 20%, sehingga tanaman mampu menjangkau air dan hara lebih dalam (Herlambang et al., 2024) .

3.7. PERAN BIOCHAR PADA TANAH PASIR PANTAI (PASIR PANTAI)

Tanah pasir pantai merupakan salah satu tipe lahan yang paling responsif terhadap aplikasi biochar. Beberapa manfaat yang dapat diperoleh meliputi:

- meningkatkan kapasitas menahan air sehingga mengurangi stres kekeringan;
- menaikkan kapasitas pertukaran kation dan retensi unsur hara;
- memperbaiki agregasi dan stabilitas struktur tanah;
- meningkatkan kandungan karbon organik tanah;
- mengurangi kehilangan pupuk melalui pelindian;
- meningkatkan populasi mikroorganisme tanah;
- membenahi proses tumbuh akar dan efisiensi penyerapan unsur hara.

Dengan demikian, biochar menjadi salah satu teknologi yang sangat relevan untuk rehabilitasi tanah Pasir pantai dan optimalisasi pemanfaatan lahan pasir pantai sebagai kawasan produksi pertanian.

3.8. APLIKASI BIOCHAR PADA BUDIDAYA KEDELAI

Sebagai tanaman legum, kedelai memerlukan kondisi tanah yang mampu menyediakan air, fosfor, kalium, serta lingkungan yang mendukung pembentukan bintil akar. Hal tersebut sejalan dengan temuan Herlambang et al. (2022) pada tanah pasir pantai Samas, bahwa aplikasi biochar tempurung kelapa mengubah pola pertumbuhan akar pakcoy dari ke arah bawah menjadi menyebar secara horizontal dan mengelompok, karena biochar menyimpan hara sementara di sekitar zona perakaran. Penambahan biochar terbukti memberikan berbagai manfaat bagi budidaya kedelai, antara lain:

- Meningkatkan daya berkecambah dan vigor benih melalui perbaikan kelembapan tanah;
- Mempercepat perkembangan sistem perakaran;
- Meningkatkan jumlah dan bobot bintil akar akibat aktivitas *rhizobium* yang lebih optimal;
- Meningkatkan serapan nitrogen, fosfor, dan kalium;
- Memperbaiki pertumbuhan vegetatif dan pembentukan polong;
- Meningkatkan bobot biji dan hasil panen;
- Menaikkan efisiensi pemakaian pupuk untuk menekan biaya produksi.

Apabila biochar dikombinasikan dengan pupuk organik, kasgot (*Black Soldier Fly frass*), atau pupuk hayati, efek sinergis yang dihasilkan umumnya lebih besar dibandingkan penggunaan biochar secara tunggal. Kombinasi tersebut mempercepat perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sekaligus mendukung produktivitas tanaman secara berkelanjutan. Penelitian empiris menunjukkan bahwa perubahan sifat tanah setelah pemberian biochar dapat diikuti oleh perubahan respons tanaman.

3.9. BIOCHAR DALAM PERSPEKTIF PERTANIAN BERKELANJUTAN DAN MITIGASI PERUBAHAN IKLIM

Selain meningkatkan produktivitas tanah, biochar memiliki kontribusi penting terhadap pembangunan pertanian berkelanjutan. Karbon yang tersimpan dalam biochar relatif stabil sehingga dapat mengurangi emisi

karbon dioksida ke atmosfer (*carbon sequestration*). Pemanfaatan biochar juga mendukung prinsip ekonomi sirkular melalui konversi limbah biomassa menjadi produk yang bernilai guna.

Dalam kerangka **Sustainable Development Goals (SDGs)**, penggunaan biochar berkontribusi pada:

- **SDG 2 (Zero Hunger):** meningkatkan produktivitas dan ketahanan pangan melalui perbaikan kualitas tanah.
- **SDG 12 (Responsible Consumption and Production):** mendorong pemanfaatan limbah biomassa secara efisien dan berkelanjutan.
- **SDG 13 (Climate Action):** mendukung mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon jangka panjang.
- **SDG 15 (Life on Land):** memperbaiki kualitas tanah terdegradasi dan mendukung rehabilitasi lahan marginal.

3.10. KESIMPULAN

Biochar merupakan *soil ameliorant* yang memiliki peran strategis dalam meningkatkan kualitas tanah melalui perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi. Struktur berpori, kandungan karbon stabil, serta kapasitas pertukaran kation yang tinggi menjadikan biochar efektif dalam meningkatkan retensi air, efisiensi penggunaan unsur hara, dan aktivitas mikroorganisme tanah.

Pada tanah pasir pantai (Pasir pantai), aplikasi biochar mampu mengatasi berbagai faktor pembatas utama, seperti rendahnya kandungan bahan organik, rendahnya kapasitas menahan air, serta tingginya kehilangan unsur hara akibat pelindian. Dampak tersebut berimplikasi langsung pada peningkatan pertumbuhan dan produktivitas tanaman, termasuk kedelai, melalui perbaikan lingkungan perakaran dan peningkatan efisiensi pemupukan.

Dalam perspektif yang lebih luas, pemanfaatan biochar tidak hanya mendukung intensifikasi pertanian pada lahan marginal, tetapi juga

menjadi bagian dari strategi rehabilitasi lahan, pengelolaan limbah biomassa, mitigasi perubahan iklim, dan pembangunan pertanian berkelanjutan. Oleh karena itu, biochar layak diposisikan sebagai salah satu teknologi kunci dalam pengelolaan lahan marginal untuk mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan ekosistem pertanian.

BAB 4

ASAM HUMAT: TIMULASI PERTUMBUHAN DAN SINERGI DENGAN BIOCHAR

4.1. PENDAHULUAN

Asam humat merupakan salah satu komponen utama bahan humik (*humic substances*) yang terbentuk melalui proses dekomposisi dan humifikasi sisa-sisa organisme, baik tumbuhan maupun hewan, dalam jangka waktu yang panjang. Bersama dengan asam fulvat dan humin, asam humat berperan penting dalam menentukan kesuburan tanah karena mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sekaligus memberikan efek biostimulan terhadap pertumbuhan tanaman.



Gambar 4.1 Asam Humat Cair

Dalam beberapa dasawarsa terakhir, pemanfaatan asam humat semakin banyak dikaji sebagai salah satu pendekatan dalam pengelolaan lahan marginal. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pemberian asam humat dapat meningkatkan ketersediaan dan pemanfaatan hara, mendukung pertumbuhan akar, merangsang aktivitas mikroorganisme tanah, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan, termasuk kekeringan, salinitas, dan kesuburan tanah yang rendah. Atas dasar tersebut, asam humat berpotensi digunakan sebagai teknologi pendukung pertanian berkelanjutan, khususnya bila dipadukan dengan bahan amelioran lain, seperti biochar.

Pada tanah pasir pantai (Pasir pantai) yang umumnya rendah bahan organik, memiliki kapasitas pertukaran kation (KPK) rendah, serta daya simpan air terbatas, penggunaan biochar dan asam humat berpotensi memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan produktivitas tanaman.

4.2. KONSEP DAN KARAKTERISTIK ASAM HUMAT

Asam humat merupakan bagian dari bahan humik yang mempunyai struktur kimia kompleks dan banyak gugus fungsional. Kompleksitas tersebut membuat perilakunya berbeda dari satu senyawa organik sederhana. Gugus karboksil dan fenolik dapat berinteraksi dengan kation, mineral, dan molekul organik lain sehingga asam humat berperan dalam berbagai proses tanah.

4.2.1. Pengertian Asam Humat

Asam humat adalah fraksi bahan humik yang larut dalam larutan alkali tetapi mengendap pada kondisi asam (pH < 2). Senyawa ini tersusun atas molekul organik kompleks yang kaya gugus fungsi aktif, terutama gugus karboksil (-COOH), fenolik (-OH), karbonil, dan kuinon.

Keberadaan gugus fungsi tersebut menyebabkan asam humat memiliki kemampuan tinggi dalam:

- Mengikat ion logam dan unsur hara;
- Meningkatkan kapasitas pertukaran kation tanah;
- Membentuk kompleks organo-mineral yang stabil;
- Memperbaiki agregasi tanah;
- Meningkatkan aktivitas metabolisme tanaman.

Secara alami, asam humat banyak ditemukan pada tanah yang kaya bahan organik, gambut, kompos matang, leonardite, lignit, sedimen organik, serta hasil dekomposisi biomassa.

4.2.2. Sifat Kimia Asam Humat

Beberapa sifat penting asam humat meliputi:

- Kandungan karbon organik tinggi;
- Kapasitas pertukaran kation yang besar;
- Kemampuan mengompleks logam (*chelating agent*);
- Aktivitas penyangga (*buffering capacity*) terhadap perubahan ph;
- Stabil terhadap dekomposisi dibandingkan bahan organik segar.

Karena karakteristik tersebut, asam humat sering disebut sebagai "pengatur kesuburan tanah alami" (*natural soil fertility regulator*).

4.3. MEKANISME KERJA ASAM HUMAT DI DALAM TANAH

Efektivitas asam humat sebagai pembenah tanah tidak hanya berasal dari kandungan unsur haranya, tetapi terutama melalui mekanisme biokimia yang memengaruhi sistem tanah-tanaman secara menyeluruh.

4.3.1. Meningkatkan Kapasitas pertukaran kation

Gugus karboksil dan fenolik pada molekul asam humat mampu mengikat ion bermuatan positif, seperti: K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+, Fe^{2+}, Zn^{2+}.

Akibatnya unsur hara menjadi tidak mudah terlindi sehingga efisiensi pemupukan meningkat.

4.3.2. Membentuk Kompleks Organo-Mineral

Asam humat mampu membentuk ikatan dengan mineral liat maupun oksida besi dan aluminium sehingga meningkatkan stabilitas agregat tanah.

Agregat yang stabil memberikan manfaat berupa:

- Aerasi lebih baik;
- Infiltrasi meningkat;
- Perkembangan akar lebih optimal;
- Ketahanan terhadap erosi meningkat.

4.3.3. Meningkatkan Ketersediaan Unsur Hara

Asam humat meningkatkan kelarutan beberapa unsur hara yang sebelumnya sulit diserap tanaman, terutama: fosfor (P); besi (Fe); seng (Zn); mangan (Mn); tembaga (Cu).

Melalui proses khelasi (*chelation*), unsur mikro tetap berada dalam bentuk tersedia sehingga lebih mudah diserap akar tanaman.

4.4. ASAM HUMAT SEBAGAI BIOSTIMULAN PERTUMBUHAN TANAMAN

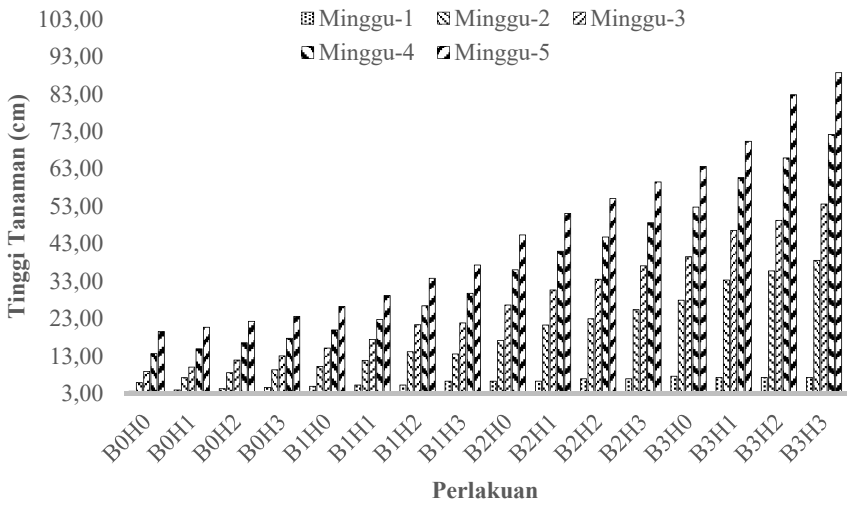
Berbeda dengan pupuk konvensional, asam humat lebih dikenal sebagai **biostimulan** karena mampu mengaktifkan proses fisiologis tanaman.

4.4.1. Merangsang Pertumbuhan Akar

Asam humat meningkatkan pembelahan dan pemanjangan sel akar. Akibatnya terjadi:

- ❖ Peningkatan panjang akar;
- ❖ Peningkatan jumlah akar lateral;
- ❖ Pembentukan rambut akar lebih banyak;
- ❖ Peningkatan luas permukaan serapan.

Perkembangan akar yang lebih baik memungkinkan tanaman memperoleh air dan unsur hara secara lebih efisien. Pengaruh tersebut juga terlihat pada pertumbuhan tanaman kedelai yang dibudidayakan pada tanah pasir pantai.



Gambar 4.2 Nilai Tinggi Tanaman Kedelai yang Diberi Perlakuan Biochar Sekam Padi dan Asam Humat

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa aplikasi biochar sekam padi dan asam humat menghasilkan perbedaan pertumbuhan tinggi tanaman pada setiap kombinasi perlakuan. Kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3) menghasilkan rata-rata tinggi tanaman tertinggi, yaitu 88,72 cm. Respons tersebut menunjukkan bahwa perbaikan

kondisi tanah melalui biochar dapat mendukung fungsi asam humat dalam merangsang pertumbuhan tanaman. Biochar membantu menciptakan lingkungan perakaran yang lebih baik, sedangkan asam humat berperan dalam mendukung proses fisiologis tanaman sehingga pertumbuhan vegetatif dapat berlangsung lebih optimal.

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa manfaat asam humat sebagai biostimulan tidak berdiri sendiri, tetapi dapat menjadi lebih nyata ketika kondisi lingkungan perakaran juga diperbaiki. Pada tanah pasir pantai yang memiliki kemampuan menahan air dan hara relatif rendah, kombinasi kedua bahan tersebut dapat memberikan lingkungan yang lebih mendukung bagi perkembangan akar dan pertumbuhan bagian atas tanaman.

4.4.2. Meningkatkan Fotosintesis

Penerapan asam humat berdasarkan hasil beberapa penelitian menunjukkan kemampuan untuk:

- Menaikkan kandungan klorofil;
- Memperbesar luas daun;
- Meningkatkan efisiensi penangkapan cahaya;
- Mempercepat pembentukan biomassa.

Kondisi tersebut menyebabkan akumulasi hasil fotosintesis meningkat sehingga mendukung pembentukan bunga, polong, maupun biji. Perkembangan vegetatif tanaman juga tercermin dari pembentukan daun. Pada penelitian menggunakan tanah pasir pantai, jumlah daun kedelai menunjukkan respons yang berbeda pada berbagai kombinasi dosis biochar sekam padi dan asam humat. Kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3) menghasilkan rata-rata jumlah daun tertinggi, yaitu 27 daun. Pembentukan daun yang lebih baik dapat memperluas permukaan fotosintesis sehingga mendukung akumulasi hasil fotosintesis dan pembentukan biomassa tanaman.

Hasil tersebut memperkuat peran asam humat sebagai biostimulan pertumbuhan, terutama ketika penggunaannya disertai dengan perbaikan lingkungan perakaran melalui biochar. Ketersediaan air dan unsur hara yang lebih terjaga dapat mendukung proses pembentukan dan perkembangan daun, sementara aktivitas fisiologis yang distimulasi oleh asam humat membantu tanaman memanfaatkan sumber daya tersebut secara lebih efektif.

4.4.3. Meningkatkan Aktivitas Enzim

Asam humat mampu mengaktifkan berbagai enzim metabolisme yang berperan dalam:

- Respirasi tanaman;
- Sintesis protein;
- Metabolisme nitrogen;
- Pembentukan hormon.

Dengan demikian pertumbuhan tanaman berlangsung lebih cepat dan lebih efisien.

4.4.4. Memacu Produksi Fitohormon

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa asam humat memiliki aktivitas menyerupai hormon tumbuhan (*auxin-like activity*).

Efek tersebut antara lain:

- Mempercepat pembentukan akar;
- Meningkatkan pembelahan sel;
- Mempercepat pertumbuhan vegetatif;
- Meningkatkan pembentukan bunga.

4.5. PERAN ASAM HUMAT DALAM MENINGKATKAN KETAHANAN TANAMAN TERHADAP CEKAMAN

Tanaman yang tumbuh pada lahan marginal sering mengalami berbagai bentuk cekaman lingkungan.

Aplikasi asam humat diketahui mampu meningkatkan toleransi terhadap: Cekaman lingkungan menyebabkan tanaman mengalokasikan energi untuk mempertahankan fungsi dasar sehingga pertumbuhan dan hasil dapat menurun. Asam humat berpotensi membantu tanaman melalui perbaikan lingkungan perakaran dan stimulasi respons fisiologis. Mekanismenya dapat berbeda tergantung jenis cekaman dan tingkat keparahan kondisi.

4.5.1. Cekaman Kekeringan

Asam humat meningkatkan:

- Efisiensi penggunaan air (*Water Use Efficiency*);
- Perkembangan akar yang lebih dalam;
- Kandungan air relatif daun.

  Dengan demikian tanaman lebih tahan terhadap periode kekeringan.

4.5.2. Cekaman Salinitas

Pada tanah yang mengandung garam tinggi, asam humat membantu:

- Mengurangi penyerapan ion Na^+ berlebihan;
- Meningkatkan penyerapan K^+;
- Mempertahankan keseimbangan ion tanaman.

4.5.3. Cekaman Logam Berat

Asam humat mampu mengikat logam berat seperti: Pb, Cd, Cr, dan Hg sehingga mengurangi toksisitas terhadap tanaman.

4.6. SINERGI ASAM HUMAT DENGAN BIOCHAR

Biochar dan asam humat merupakan dua bahan amelioran dengan perbedaan mekanisme kerja namun saling melengkapi. Biochar lebih dominan memperbaiki struktur fisik tanah, sedangkan asam humat lebih berperan dalam aktivitas kimia dan fisiologi tanaman.

Sinergi keduanya menghasilkan efek yang lebih besar dibandingkan aplikasi secara terpisah. Konsep sinergi tersebut juga terlihat pada hasil penelitian menggunakan tanah pasir pantai Samas. Pemberian biochar sekam padi dan asam humat secara kombinasi menghasilkan respons yang berbeda pada beberapa sifat tanah dan pertumbuhan tanaman. Kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3) menunjukkan nilai tertinggi pada beberapa parameter yang diamati, antara lain kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, fosfor tersedia, tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perbaikan kondisi tanah dan stimulasi pertumbuhan tanaman dapat berlangsung secara terpadu ketika kedua bahan digunakan secara bersamaan.

Respons tersebut tidak berarti bahwa seluruh perubahan hanya disebabkan oleh asam humat atau biochar secara terpisah. Biochar dan asam humat memiliki karakteristik serta mekanisme kerja yang berbeda, sehingga respons tanaman merupakan hasil interaksi antara perlakuan, kondisi awal tanah, dan lingkungan tumbuh. Dengan demikian, penggunaan keduanya perlu dipandang sebagai pendekatan terpadu dalam pengelolaan tanah pasir pantai.

4.6.1. Peningkatan Retensi Air

Biochar memiliki pori-pori yang mampu menyimpan air. Asam humat meningkatkan kemampuan tanah mengikat molekul air. Kombinasi keduanya meningkatkan ketersediaan air bagi tanaman dalam waktu lebih lama.

4.6.2. Peningkatan Efisiensi Unsur Hara

Biochar menahan unsur hara di dalam porinya. Asam humat menjaga unsur tersebut tetap berada dalam bentuk tersedia melalui mekanisme khelasi. Hal ini menyebabkan hilangnya unsur hara saat pelindian menjadi jauh lebih kecil.

Hasil penelitian pada tanah pasir pantai Samas memberikan gambaran empiris mengenai respons tanah terhadap kombinasi biochar dan asam humat. Kapasitas pertukaran kation tanah pada kondisi awal sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1}, sedangkan setelah perlakuan nilai tertinggi mencapai 1,72 cmol(+) kg^{-1} pada kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3). Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa penambahan bahan amelioran dapat memperbaiki kemampuan tanah dalam mempertahankan kation di dalam sistem tanah.

Respons serupa terlihat pada nitrogen total. Kandungan nitrogen total tanah pada kondisi awal sebesar 0,215%, sedangkan nilai tertinggi setelah perlakuan mencapai 0,44% pada kombinasi B3H3. Peningkatan nitrogen total menunjukkan adanya perubahan status nitrogen tanah setelah pemberian bahan amelioran. Dalam konteks tanah pasir pantai yang memiliki kemampuan mempertahankan unsur hara relatif rendah, kondisi tersebut penting karena nitrogen merupakan salah satu unsur yang mudah mengalami kehilangan melalui pelindian.

Ketersediaan fosfor juga menunjukkan peningkatan, dengan nilai tertinggi sebesar 79,80 ppm pada kombinasi B3H3. Hasil tersebut menunjukkan adanya respons positif status fosfor tersedia setelah pemberian kombinasi perlakuan. Namun, peningkatan fosfor tersedia dalam penelitian ini tidak dapat secara langsung digunakan untuk menyimpulkan bahwa fosfor yang berasal dari biochar seluruhnya menjadi sumber peningkatan P tersedia, karena perubahan ketersediaan P dapat dipengaruhi oleh berbagai proses di dalam tanah.

Secara keseluruhan, hasil tersebut memperlihatkan bahwa kombinasi biochar dan asam humat berpotensi memperbaiki kondisi hara tanah

pasir pantai. Biochar dapat menyediakan permukaan dan ruang untuk mempertahankan ion, sedangkan asam humat memiliki gugus fungsional yang dapat berinteraksi dengan unsur hara. Kombinasi keduanya dapat menciptakan kondisi yang lebih mendukung bagi keberadaan unsur hara di sekitar zona perakaran dan meningkatkan peluang tanaman memperoleh hara secara lebih efisien.

4.6.3. Meningkatkan Aktivitas Mikroba Tanah

Permukaan biochar menyediakan habitat bagi mikroorganisme. Asam humat menyediakan sumber karbon dan senyawa organik yang mendukung aktivitas metabolisme mikroba.

Kondisi tersebut meningkatkan:

- Populasi bakteri tanah;
- Fungi menguntungkan;
- Mikoriza;
- *Rhizobium*;
- Bakteri pelarut fosfat.

4.6.4. Pembentukan Agregat Tanah yang Lebih Stabil

Biochar menjadi kerangka fisik agregat. Asam humat bertindak sebagai perekat alami antarpartikel tanah. Hasilnya adalah struktur tanah yang lebih stabil, porositas seimbang, dan aerasi yang lebih baik.

4.7. APLIKASI PADA TANAH PASIR PANTAI (PASIR PANTAI)

Tanah Pasir pantai memiliki beberapa faktor pembatas utama:

- Tekstur sangat kasar;
- Rendahnya kemampuan menahan air;
- Rendahnya material organik terkandung;

- KPK rendah;
- Kehilangan unsur hara tinggi.

Pada kondisi tersebut, kombinasi biochar dan asam humat mampu:

- Meningkatkan kandungan karbon organik tanah;
- Meningkatkan retensi air;
- Menaikkan kapasitas pertukaran kation;
- Meningkatkan efisiensi pemupukan;
- Memperbaiki aktivitas mikroorganisme tanah;
- Meningkatkan pertumbuhan akar tanaman.

Pendekatan ini menjadikan tanah pasir pantai lebih produktif untuk budidaya tanaman pangan, termasuk kedelai. Penelitian Herlambang et al., 2026. menggunakan tanah pasir Pantai Samas, Bantul, dengan karakteristik awal berupa dominasi fraksi pasir sebesar 93%, C-organik 0,51%, dan kapasitas pertukaran kation 1,10 cmol(+) kg^{-1}. Karakteristik tersebut menggambarkan kondisi tanah dengan kemampuan relatif rendah dalam mempertahankan bahan organik dan kation hara.

Pemberian biochar sekam padi dan asam humat pada tanah tersebut menunjukkan adanya perubahan pada beberapa sifat kimia tanah. Nilai kapasitas pertukaran kation meningkat hingga 1,72 cmol(+) kg^{-1} pada kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1}. Kandungan nitrogen total juga mencapai 0,44%, sedangkan fosfor tersedia mencapai 79,80 ppm pada kombinasi perlakuan yang sama. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi bahan amelioran dapat digunakan sebagai salah satu pendekatan untuk mengurangi keterbatasan kesuburan kimia tanah pasir pantai.

Selain perubahan sifat tanah, respons juga terlihat pada pertumbuhan tanaman. Kombinasi B3H3 menghasilkan rata-rata tinggi tanaman sebesar 88,72 cm dan jumlah daun sebanyak 27 daun. Hal tersebut memperlihatkan keterkaitan antara perbaikan lingkungan tanah dengan respons pertumbuhan tanaman, meskipun hubungan tersebut tidak dapat

dipandang sebagai hubungan sebab-akibat tunggal karena pertumbuhan tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor.

Dengan demikian, aplikasi biochar dan asam humat pada tanah pasir pantai perlu ditempatkan sebagai bagian dari pengelolaan terpadu. Penggunaan bahan amelioran perlu disertai pengelolaan air, pemupukan berdasarkan kebutuhan tanaman, pengendalian gulma dan organisme pengganggu, serta pemilihan tanaman yang sesuai dengan kondisi lahan. Pendekatan tersebut lebih memungkinkan perbaikan produktivitas berlangsung secara berkelanjutan dibandingkan mengandalkan satu jenis input saja.

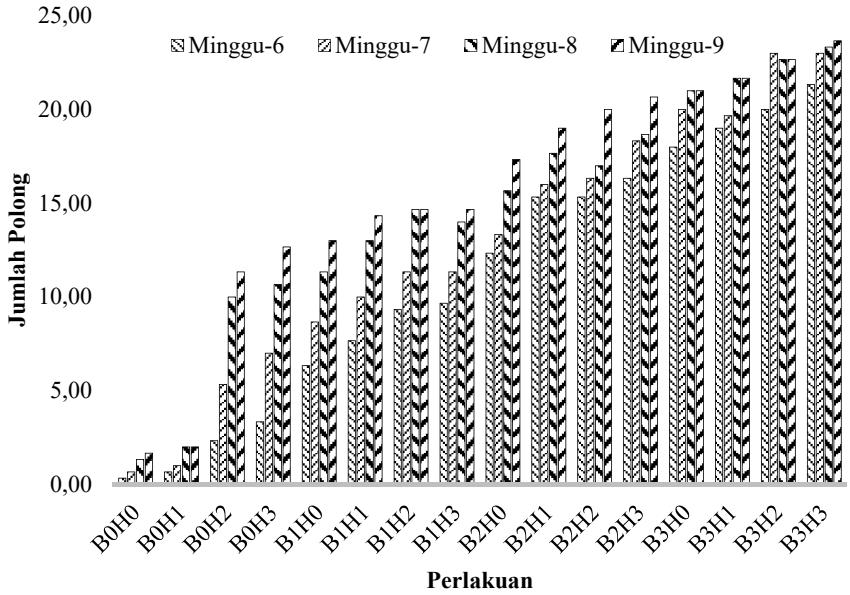
4.8. IMPLIKASI TERHADAP BUDIDAYA KEDELAI

Kedelai merupakan tanaman legum yang memerlukan kondisi tanah yang mampu mendukung pembentukan bintil akar, penyerapan fosfor, serta ketersediaan air yang memadai.

Aplikasi kombinasi biochar dan asam humat memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

- Meningkatkan persentase perkecambahan benih;
- Mempercepat pembentukan akar primer dan akar lateral;
- Meningkatkan jumlah bintil akar efektif melalui simbiosis dengan *rhizobium*;
- Meningkatkan serapan nitrogen, fosfor, dan kalium;
- Meningkatkan jumlah cabang produktif;
- Meningkatkan jumlah polong bernas;
- Meningkatkan bobot 100 biji dan hasil panen.

Perbaikan kondisi tanah dan pertumbuhan vegetatif pada akhirnya perlu dilihat dari respons tanaman pada fase generatif. Pada penelitian menggunakan tanah pasir pantai Samas, kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3) menghasilkan rata-rata jumlah polong tertinggi, yaitu 23,67 polong per tanaman.



Gambar 4.6. Jumlah Polong Tanaman Kedelai yang Diberi Perlakuan Biochar Sekam Padi dan Asam Humat

Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons positif terhadap kombinasi perlakuan tidak hanya terlihat pada pertumbuhan vegetatif, tetapi juga berlanjut hingga pembentukan organ generatif.

Pembentukan polong merupakan salah satu indikator penting dalam budidaya kedelai karena berkaitan langsung dengan komponen hasil. Kondisi tanah yang lebih mampu mempertahankan air dan unsur hara dapat membantu tanaman memenuhi kebutuhan sumber daya selama pertumbuhan, sedangkan peran asam humat sebagai biostimulan berpotensi mendukung proses fisiologis tanaman. Dalam konteks tersebut, kombinasi biochar dan asam humat dapat memberikan lingkungan yang lebih mendukung bagi perkembangan tanaman hingga fase pembentukan polong.

Meskipun demikian, jumlah polong tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator produktivitas kedelai. Hasil akhir tanaman juga

dipengaruhi oleh jumlah biji per polong, bobot biji, varietas, ketersediaan air, pemupukan, serta kondisi lingkungan selama fase pengisian biji. Oleh karena itu, hasil 23,67 polong per tanaman lebih tepat dipandang sebagai salah satu bukti respons generatif tanaman terhadap kombinasi perlakuan, bukan sebagai gambaran keseluruhan produktivitas.

4.9. PROSPEK PENGEMBANGAN DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Pemanfaatan asam humat bersama biochar sejalan dengan konsep **climate-smart agriculture** dan **sustainable soil management**. Kombinasi keduanya memberikan manfaat ekologis, agronomis, dan ekonomis melalui peningkatan kualitas tanah, pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku biochar, serta pengurangan ketergantungan pada pupuk kimia. Teknologi ini juga mendukung rehabilitasi lahan terdegradasi dan peningkatan produktivitas lahan marginal, sehingga berkontribusi terhadap ketahanan pangan dan konservasi sumber daya alam. Dalam konteks **Sustainable Development Goals (SDGs)**, penggunaan asam humat dan biochar mendukung:

- **SDG 2 (Zero Hunger)** melalui produktivitas pertanian;
- **SDG 12 (Responsible Consumption and Production)** melalui pemanfaatan biomassa dan pengelolaan sumber daya yang efisien;
- **SDG 13 (Climate Action)** melalui penyimpanan karbon dalam tanah dan efisiensi penggunaan input pertanian;
- **SDG 15 (Life on Land)** melalui perbaikan kualitas tanah dan rehabilitasi lahan terdegradasi.

4.10. KESIMPULAN

Asam humat merupakan salah satu bahan humik yang memiliki peran penting dalam pengelolaan tanah dan tanaman. Gugus fungsional yang

dimilikinya memungkinkan asam humat berinteraksi dengan unsur hara dan komponen tanah, sementara pengaruhnya terhadap proses fisiologis tanaman dapat mendukung perkembangan akar, pertumbuhan vegetatif, dan pembentukan hasil.

Penggunaan asam humat menjadi semakin relevan ketika dipadukan dengan biochar. Kedua bahan memiliki fungsi yang berbeda tetapi saling melengkapi. Biochar berperan dalam memperbaiki lingkungan fisik dan kimia tanah, sedangkan asam humat dapat mendukung ketersediaan hara dan proses fisiologis tanaman. Integrasi keduanya dapat menjadi pendekatan untuk mengatasi beberapa keterbatasan tanah pasir pantai.

Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menunjukkan bahwa kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} memberikan nilai tertinggi pada beberapa parameter yang diamati. Kombinasi tersebut menghasilkan kapasitas pertukaran kation sebesar 1,72 cmol(+) kg^{-1}, nitrogen total sebesar 0,44%, fosfor tersedia sebesar 79,80 ppm, tinggi tanaman sebesar 88,72 cm, jumlah daun sebanyak 27 daun, dan jumlah polong sebanyak 23,67 polong per tanaman.

Temuan tersebut memperlihatkan bahwa pengelolaan tanah dan tanaman perlu dilakukan secara terpadu. Perbaikan kondisi tanah tidak hanya ditujukan untuk meningkatkan ketersediaan hara, tetapi juga menciptakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan tanaman hingga fase generatif. Meskipun demikian, hasil suatu kombinasi perlakuan tetap perlu dipertimbangkan berdasarkan karakteristik tanah, kondisi lingkungan, bahan yang digunakan, dan tujuan budidaya sebelum diterapkan pada lokasi yang berbeda.

BAB 5

STRATEGI OPTIMALISASI BUDIDAYA KEDELAI: FORMULASI DAN TEKNIK APLIKASI

5.1. KEDELAI MERUPAKAN KOMODITAS PANGAN STRATEGIS

Kedelai (*Glycine max L. Merr.)* merupakan komoditas pangan strategis yang berperan penting dalam menunjang ketahanan pangan nasional sebagai sumber utama protein nabati. Walaupun kebutuhan kedelai di Indonesia terus bertambah, produktivitas nasional masih tergolong rendah dibandingkan potensi hasil varietas unggul. Keterbatasan lahan pertanian subur menjadi salah satu faktor utama rendahnya produktivitas tersebut, sehingga pengembangan kedelai mulai diarahkan ke lahan marginal, termasuk tanah pasir pantai (Pasir pantai).

Pengusahaan kedelai pada lahan marginal dihadapkan pada sejumlah kendala, antara lain kandungan bahan organik yang rendah, kapasitas pertukaran kation (KPK) terbatas, daya simpan air rendah, aktivitas mikroorganisme tanah yang lemah, serta kehilangan unsur hara yang tinggi akibat pelindian. Dengan demikian, upaya meningkatkan produktivitas kedelai tidak dapat hanya bertumpu pada varietas unggul dan pupuk anorganik, melainkan perlu didukung pengelolaan lahan secara terpadu melalui penyusunan amelioran dan penerapan metode aplikasi yang sesuai.



Gambar 5.1 Tanaman Kedelai

Optimalisasi budidaya kedelai diarahkan untuk membentuk kondisi tumbuh yang menunjang perkembangan perakaran, memperbaiki efisiensi pemanfaatan air dan hara, meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, serta mengoptimalkan proses fotosintesis agar pertumbuhan dan produksi tanaman mendekati potensi maksimal.

Penerapan strategi tersebut perlu disesuaikan dengan karakteristik lahan dan respons tanaman terhadap bahan yang digunakan. Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas, Bantul, menunjukkan bahwa kombinasi biochar sekam padi dan asam humat dapat memberikan respons positif terhadap beberapa sifat tanah dan pertumbuhan tanaman kedelai. Pada kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3), nilai kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, fosfor tersedia, tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong menunjukkan respons yang tinggi dibandingkan kombinasi perlakuan lainnya. Temuan tersebut memberikan contoh bahwa optimalisasi budidaya pada lahan marginal perlu dilakukan melalui pengelolaan tanah dan tanaman secara terpadu.

5.2. PRINSIP OPTIMALISASI BUDIDAYA KEDELAI PADA LAHAN MARGINAL

Optimalisasi budidaya kedelai merupakan pendekatan terpadu yang mengombinasikan pengelolaan tanah, pemupukan, penggunaan amelioran, pemanfaatan mikroorganisme hayati, serta pengelolaan air dan tanaman. Pendekatan ini bertujuan mengurangi faktor pembatas lahan sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya.

Prinsip utama yang perlu diperhatikan meliputi:

- Memperbaiki kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah;
- Menaikkan efisiensi penggunaan air dan unsur hara;
- Menciptakan lingkungan yang mendukung pembentukan bintil akar (*nodulasi*);
- Meningkatkan aktivitas fotosintesis dan metabolisme tanaman;
- Mempertahankan produktivitas tanah secara berkelanjutan.



Gambar 5.2 Tanaman Kedelai

Produktivitas tanaman dapat ditingkatkan tanpa meningkatkan tekanan terhadap lingkungan. Penerapan prinsip tersebut dapat dilihat pada pengelolaan tanah pasir pantai yang memiliki keterbatasan dalam mempertahankan air dan unsur hara. Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menunjukkan bahwa perbaikan kondisi tanah melalui kombinasi biochar dan asam humat diikuti oleh respons positif pada beberapa parameter pertumbuhan kedelai. Hal ini menunjukkan bahwa optimalisasi tidak hanya berkaitan dengan penambahan input, tetapi juga dengan pemilihan jenis bahan, dosis, dan cara aplikasi yang sesuai dengan faktor pembatas lahan.

5.3. FORMULASI AMELIORAN UNTUK BUDIDAYA KEDELAI

Formulasi amelioran merupakan kombinasi beberapa bahan yang memiliki fungsi saling melengkapi dalam memperbaiki kondisi tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Pada lahan pasir pantai (Pasir pantai), penggunaan satu jenis amelioran sering kali belum mampu mengatasi seluruh faktor pembatas, sehingga diperlukan formulasi terpadu.

5.3.1. Biochar sebagai Pembenah Tanah

Biochar berperan sebagai pembenah tanah (soil ameliorant) yang meningkatkan kualitas fisik dan kimia tanah melalui peningkatan kemampuan menahan air, kapasitas pertukaran kation, kestabilan agregat, serta retensi unsur hara. Struktur biochar yang berpori menyediakan ruang hidup bagi mikroorganisme bermanfaat sehingga mendorong aktivitas biologis tanah.

Salah satu contoh penerapan biochar pada tanah pasir pantai ditunjukkan melalui penggunaan biochar sekam padi. Biochar yang digunakan dalam penelitian memiliki kandungan karbon organik sebesar 37,06%, nitrogen total sebesar 0,15%, dan P_2O_5 sebesar 1,02%, dengan

pH 8,05. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa biochar sekam padi yang digunakan memiliki sifat relatif alkalis dan mengandung karbon serta sejumlah unsur hara yang dapat menjadi bagian dari sistem pengelolaan kesuburan tanah.

Dalam penelitian pada tanah pasir Pantai Samas, penggunaan biochar dengan dosis hingga 20 ton ha^{-1} memberikan respons terhadap beberapa sifat kimia tanah. Nilai pH tanah meningkat dari kondisi awal 6,31 hingga mencapai 7,37 pada perlakuan biochar 20 ton ha^{-1}. Kapasitas pertukaran kation juga menunjukkan respons positif ketika biochar dikombinasikan dengan asam humat. Hasil tersebut memberikan contoh bahwa pemilihan biochar perlu mempertimbangkan karakteristik bahan dan kondisi tanah yang akan diperbaiki.

5.3.2. Asam Humat sebagai Biostimulan

Asam humat berperan sebagai biostimulan yang meningkatkan pertumbuhan akar, efisiensi penyerapan unsur hara, aktivitas enzim, serta toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan. Selain itu, asam humat membantu meningkatkan ketersediaan fosfor dan unsur mikro melalui mekanisme khelasi.

Pada penerapannya, efektivitas asam humat perlu dilihat berdasarkan karakteristik bahan, dosis, serta kombinasi dengan bahan pembenah lainnya. Asam humat yang digunakan dalam penelitian pada tanah pasir Pantai Samas berasal dari bahan berbasis batu bara dan memiliki pH sebesar 9,5. Dalam penelitian tersebut, asam humat diaplikasikan pada beberapa dosis dan dikombinasikan dengan biochar sekam padi untuk melihat respons tanah dan tanaman.

Kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} menunjukkan respons yang tinggi pada beberapa parameter tanah dan pertumbuhan tanaman. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan asam humat dapat ditempatkan sebagai bagian dari formulasi amelioran,

bukan sebagai satu-satunya input untuk mengatasi seluruh faktor pembatas tanah pasir pantai.

5.3.3. Pupuk Organik

Kompos, pupuk kandang matang, dan kasgot (*Black Soldier Fly* frass), merupakan pupuk organik yang berfungsi meningkatkan kandungan karbon organik tanah, sumber unsur hara makro dan mikro, revitalisasi struktur tanah, serta menaikkan aktivitas mikroorganisme.

Kasgot memiliki keunggulan karena mengandung unsur hara, bahan organik stabil, kitin, mikroorganisme menguntungkan, serta senyawa yang dapat berperan sebagai pemacu pertumbuhan tanaman.

5.3.4. Pupuk Hayati

Penggunaan pupuk hayati seperti *Rhizobium*, bakteri pelarut fosfat (*Phosphate Solubilizing Bacteria/PSB*), dan fungi mikoriza arbuskular (*Arbuscular Mycorrhizal Fungi/AMF*) meningkatkan efisiensi penyerapan nitrogen dan fosfor serta memperkuat perkembangan sistem perakaran.

5.4. SINERGI ANTAR-KOMPONEN FORMULASI

Interaksi antara bahan yang digunakan akan menentukan keberhasilan formulasi.

1. Biochar
   - meningkatkan retensi air;
   - meningkatkan kapasitas pertukaran kation;
   - menyediakan habitat mikroba.
2. Asam humat
   - meningkatkan aktivitas fisiologi tanaman;
   - meningkatkan penyerapan unsur hara;

- mempercepat perkembangan akar.

3. Kasgot atau pupuk organik
   - menambah karbon organik;
   - menyediakan unsur hara;
   - meningkatkan aktivitas mikroorganisme.
4. Mikroorganisme hayati
   - meningkatkan fiksasi nitrogen;
   - meningkatkan pelarutan fosfat;
   - meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman.

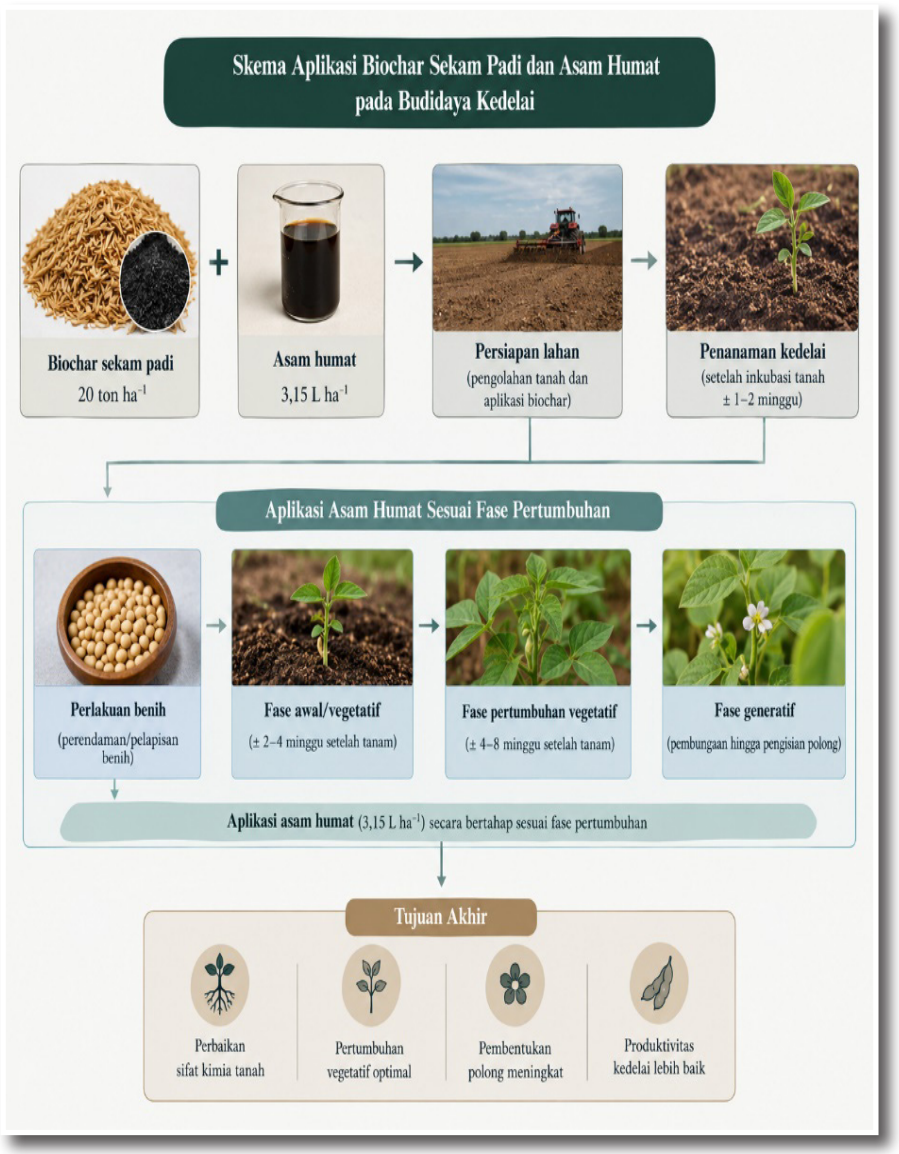
Penggunaan keempat komponen tersebut secara bersamaan akan menjadikan tanah lebih produktif dibandingkan penggunaan bahan secara terpisah. Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas memberikan contoh empiris mengenai penerapan kombinasi biochar dan asam humat dalam memperbaiki kondisi tanah dan mendukung pertumbuhan kedelai. Kombinasi biochar sekam padi 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} (B3H3) menghasilkan kapasitas pertukaran kation sebesar 1,72 cmol(+) kg^{-1}, dibandingkan nilai awal tanah sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1}. Pada kombinasi yang sama, nitrogen total mencapai 0,44% dan fosfor tersedia mencapai 79,80 ppm.

Respons tersebut juga terlihat pada pertumbuhan tanaman. Perlakuan B3H3 menghasilkan rata-rata tinggi tanaman sebesar 88,72 cm, jumlah daun sebanyak 27 daun, dan jumlah polong sebanyak 23,67 polong per tanaman. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa kombinasi kedua bahan tidak hanya berkaitan dengan perubahan sifat kimia tanah, tetapi juga diikuti oleh respons pertumbuhan vegetatif dan generatif tanaman.

Namun, hasil tersebut perlu dipahami sebagai respons terhadap kombinasi perlakuan, bukan sebagai bukti bahwa biochar atau asam humat secara tunggal menjadi penyebab seluruh perubahan yang diamati. Respons tanaman merupakan hasil interaksi antara bahan amelioran, kondisi awal tanah, dosis perlakuan, serta lingkungan tumbuh. Dengan demikian, formulasi perlu disusun berdasarkan karakteristik lahan dan tujuan pengelolaan yang ingin dicapai.

5.5. TEKNIK APLIKASI PADA BUDIDAYA KEDELAI

Keberhasilan formulasi sangat dipengaruhi oleh teknik aplikasi yang tepat. Pengaturan waktu, dosis, cara pemberian, dan kombinasi antar-input menentukan efektivitas perbaikan tanah dan respons tanaman.



Gambar 5.3 Skema Aplikasi Biochar Sekam Padi dan Asam Humat pada Budidaya Kedelai

5.5.1. Aplikasi Sebelum Tanam

Tahap pra-tanam merupakan fase penting untuk memperbaiki kondisi tanah. Kegiatan yang dilakukan meliputi:

- pengolahan tanah secara minimum atau sesuai kondisi lahan;
- pencampuran biochar ke lapisan olah tanah (±10–20 cm);
- pemberian pupuk organik atau kasgot secara merata;
- inkubasi tanah selama beberapa hari agar terjadi interaksi antara amelioran dan tanah.

Tahap ini bertujuan menciptakan media tumbuh yang lebih baik sebelum benih ditanam. Dalam penerapan biochar pada tanah pasir pantai, dosis perlu disesuaikan dengan kondisi awal tanah dan tujuan perbaikan yang ingin dicapai. Penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menggunakan biochar sekam padi dengan dosis 0, 10, 15, dan 20 ton ha^{-1} yang dikombinasikan dengan beberapa dosis asam humat. Kombinasi tersebut digunakan untuk melihat respons tanah dan tanaman terhadap peningkatan dosis bahan amelioran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi dosis 20 ton ha^{-1} biochar dan 3,15 L ha^{-1} asam humat memberikan respons tinggi pada beberapa parameter yang diamati.

Contoh tersebut menunjukkan bahwa dosis hasil penelitian dapat menjadi dasar dalam pengembangan teknologi, tetapi tidak dapat langsung dianggap sebagai dosis universal untuk seluruh tanah pasir pantai. Karakteristik tanah, kualitas biochar, sumber asam humat, serta kondisi lingkungan perlu dipertimbangkan sebelum penerapan pada lokasi yang berbeda.

5.5.2. Perlakuan Benih (*Seed Treatment*)

Benih kedelai dapat diberikan perlakuan awal menggunakan:

- Inokulan *Rhizobium*;
- Pupuk hayati;
- Larutan asam humat berkonsentrasi rendah.

Perlakuan tersebut bertujuan meningkatkan daya kecambah, mempercepat pembentukan akar, dan memperbaiki pembentukan bintil akar efektif.

5.5.3. Aplikasi Saat Penanaman

Pada saat tanam dilakukan:

- Penempatan pupuk dasar sesuai kebutuhan tanaman;
- Penempatan biochar atau pupuk organik di sekitar zona perakaran;
- Pengaturan jarak tanam sesuai karakter varietas.

Penempatan amelioran di sekitar perakaran meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh tanaman.

5.5.4. Aplikasi Selama Pertumbuhan Vegetatif

Pada fase vegetatif dilakukan:

- Pemupukan susulan apabila diperlukan berdasarkan kondisi tanah dan tanaman;
- Aplikasi asam humat melalui tanah atau penyemprotan daun;
- Pemeliharaan kelembapan tanah melalui irigasi atau mulsa;
- Pengendalian gulma secara terpadu.

Tahap ini bertujuan menjaga pertumbuhan vegetatif agar berlangsung optimal.

5.5.5. Pengelolaan Fase Generatif

Memasuki pembungaan hingga pengisian biji, perhatian difokuskan pada:

- Kecukupan air;
- Keseimbangan unsur hara, terutama fosfor dan kalium;
- Pengendalian hama dan penyakit secara terpadu;
- Pengurangan cekaman lingkungan.

- Pengelolaan yang baik pada fase ini menentukan jumlah polong, bobot biji, dan hasil akhir panen.

5.6. PENGELOLAAN AIR PADA TANAH PASIR PANTAI

Ketersediaan air merupakan faktor pembatas utama pada tanah Pasir pantai. Strategi pengelolaan meliputi:

- Penggunaan mulsa organik;
- Irigasi tetes (*drip irrigation*);
- Pemberian biochar untuk meningkatkan retensi air;
- Penambahan bahan organik secara berkala;
- Pengaturan waktu penyiraman berdasarkan kebutuhan tanaman.

Pengelolaan air menjadi semakin penting pada tanah pasir pantai karena dominasi fraksi pasir menyebabkan air lebih cepat bergerak melalui profil tanah. Kondisi awal tanah pasir Pantai Samas yang digunakan dalam penelitian memiliki fraksi pasir sebesar 93%. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa penggunaan amelioran perlu disertai strategi pengelolaan air agar perbaikan kondisi tanah dapat dimanfaatkan secara optimal oleh tanaman. Biochar dapat menjadi salah satu bagian dari strategi tersebut karena keberadaan pori-porinya berpotensi membantu mempertahankan air di sekitar zona perakaran, tetapi penggunaannya tetap perlu dikombinasikan dengan pengaturan waktu dan jumlah pemberian air.

5.7. PENGELOLAAN HARA TERPADU (*INTEGRATED NUTRIENT MANAGEMENT*)

Optimalisasi budidaya kedelai memerlukan pengelolaan hara secara terpadu dengan mengombinasikan berbagai sumber nutrisi. Komponen utama meliputi:

- Pupuk organik;
- Biochar;

- ❖ Asam humat;
- ❖ Pupuk hayati;
- ❖ Pupuk anorganik sesuai kebutuhan berdasarkan analisis tanah.

Penerapan pengelolaan hara terpadu perlu diawali dengan mengetahui kondisi tanah sebelum pemberian input. Pada tanah pasir Pantai Samas yang digunakan dalam penelitian, kandungan nitrogen total awal sebesar 0,215%, fosfor tersedia sebesar 44,98 ppm, dan kapasitas pertukaran kation sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1}. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan hara pada tanah pasir pantai perlu memperhatikan kemampuan tanah dalam mempertahankan unsur hara.

Setelah perlakuan biochar dan asam humat, kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} menghasilkan nitrogen total sebesar 0,44%, fosfor tersedia sebesar 79,80 ppm, dan kapasitas pertukaran kation sebesar 1,72 cmol(+) kg^{-1}. Respons tersebut memberikan contoh bahwa pengelolaan hara tidak hanya berkaitan dengan jumlah pupuk yang diberikan, tetapi juga dengan kemampuan tanah mempertahankan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman.

Dengan demikian, penggunaan biochar dan asam humat sebaiknya ditempatkan sebagai bagian dari sistem pengelolaan hara terpadu. Pemupukan tetap perlu didasarkan pada kebutuhan tanaman dan kondisi tanah, sedangkan bahan amelioran digunakan untuk membantu menciptakan lingkungan tanah yang lebih mendukung pemanfaatan unsur hara secara efisien.

5.8. EVALUASI KEBERHASILAN STRATEGI OPTIMALISASI

Keberhasilan strategi optimalisasi budidaya kedelai dapat dievaluasi melalui beberapa indikator agronomis dan lingkungan.

1. Indikator pertumbuhan
   - ➢ persentase daya tumbuh;
   - ➢ tinggi tanaman;

- jumlah daun;
- luas daun;
- panjang akar;
- jumlah bintil akar efektif.

2. Indikator hasil
   - jumlah polong;
   - jumlah biji per tanaman;
   - bobot 100 biji;
   - produktivitas per satuan luas.
3. Indikator kualitas tanah
   - kandungan karbon organik;
   - kapasitas pertukaran kation;
   - kelembapan tanah;
   - aktivitas mikroorganisme;
   - efisiensi penggunaan pupuk.

Evaluasi yang komprehensif memungkinkan penyesuaian strategi budidaya pada musim tanam berikutnya. Sebagai contoh penerapan evaluasi, penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menggunakan beberapa indikator sifat tanah dan pertumbuhan tanaman untuk melihat respons terhadap kombinasi biochar sekam padi dan asam humat. Parameter sifat tanah yang diamati meliputi pH, karbon organik, kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, dan fosfor tersedia. Sementara itu, respons tanaman diamati melalui tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} menghasilkan kapasitas pertukaran kation sebesar 1,72 cmol(+) kg^{-1}, nitrogen total sebesar 0,44%, dan fosfor tersedia sebesar 79,80 ppm. Pada tanaman, kombinasi yang sama menghasilkan tinggi tanaman sebesar 88,72 cm, jumlah daun sebanyak 27 daun, dan jumlah polong sebanyak 23,67 polong per tanaman.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa evaluasi strategi optimalisasi sebaiknya dilakukan dengan menggabungkan indikator tanah dan tanaman. Perubahan sifat tanah dapat digunakan untuk melihat respons

lingkungan perakaran, sedangkan parameter pertumbuhan dan hasil digunakan untuk melihat respons tanaman. Penggunaan beberapa indikator secara bersamaan memberikan gambaran yang lebih lengkap dibandingkan hanya menggunakan satu parameter.

Namun, tidak seluruh indikator yang tercantum dalam evaluasi harus digunakan pada setiap penelitian. Parameter seperti luas daun, panjang akar, jumlah bintil akar efektif, bobot 100 biji, produktivitas per satuan luas, kelembapan tanah, aktivitas mikroorganisme, dan efisiensi penggunaan pupuk memerlukan pengukuran tersendiri apabila hendak digunakan sebagai dasar evaluasi. Dengan demikian, indikator evaluasi perlu disesuaikan dengan tujuan penelitian dan data yang tersedia.

5.9. IMPLIKASI TERHADAP PERTANIAN BERKELANJUTAN

Strategi optimalisasi budidaya kedelai melalui formulasi biochar, asam humat, pupuk organik, dan pupuk hayati tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman, tetapi juga memperbaiki kualitas tanah secara bertahap. Pendekatan ini mendukung prinsip **pertanian konservasi** (*conservation agriculture*), **pengelolaan tanah berkelanjutan** (*sustainable soil management*), dan **pertanian cerdas iklim** (*climate-smart agriculture*).

Strategi ini berkontribusi pada **Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs)**, yaitu:

- **SDG 2 (Zero Hunger):** meningkatkan produksi kedelai.
- **SDG 12 (Responsible Consumption and Production):** mendorong pemanfaatan limbah biomassa sebagai biochar dan pupuk organik.
- **SDG 13 (Climate Action):** meningkatkan karbon dalam tanah dan efisiensi penggunaan input pertanian.
- **SDG 15 (Life on Land):** mendukung rehabilitasi lahan marginal dan menjaga fungsi ekosistem tanah.

Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas memberikan gambaran bahwa strategi optimalisasi dapat diarahkan tidak hanya

pada peningkatan respons tanaman, tetapi juga pada perbaikan kondisi tanah. Peningkatan kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, dan fosfor tersedia pada kombinasi perlakuan tertentu menunjukkan adanya perubahan pada kondisi kimia tanah, sedangkan peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong menunjukkan respons pada komponen tanaman. Integrasi kedua aspek tersebut menjadi dasar penting dalam mengembangkan sistem pengelolaan lahan marginal yang tidak hanya berorientasi pada hasil jangka pendek, tetapi juga pada perbaikan kualitas tanah.

5.10. Arah Pengembangan Formulasi Berbasis Biochar–Asam Humat–Kasgot

Penelitian menunjukkan bahwa formulasi berbasis biochar, asam humat, dan kasgot memiliki prospek sebagai teknologi pengelolaan lahan marginal. Masing-masing komponen memiliki mekanisme kerja yang saling melengkapi: biochar memperbaiki struktur dan retensi air, asam humat meningkatkan efisiensi fisiologis dan ketersediaan hara, sedangkan kasgot menyediakan BO, unsur hara, serta mikroorganisme yang mendukung tanah. Pengembangan formulasi terpadu yang diperkaya pupuk hayati dan disesuaikan dengan karakteristik lokasi diharapkan mampu menghasilkan teknologi budidaya yang lebih adaptif, efisien, dan mudah diterapkan oleh petani.

Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas dapat menjadi salah satu dasar dalam pengembangan formulasi berbasis biochar dan asam humat. Kombinasi biochar sekam padi 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} menunjukkan respons yang tinggi pada beberapa parameter sifat tanah dan pertumbuhan kedelai. Temuan tersebut dapat digunakan sebagai contoh awal dalam pengembangan formulasi, tetapi belum dapat digunakan untuk menetapkan dosis universal karena respons bahan dapat berbeda pada kondisi tanah dan lingkungan yang berbeda.

Pengembangan formulasi selanjutnya dapat diarahkan pada pengujian kombinasi biochar dan asam humat dengan bahan organik atau pupuk hayati lainnya. Penambahan komponen baru perlu diuji secara khusus

untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat tanah, pertumbuhan tanaman, hasil, efisiensi penggunaan input, serta kelayakan penerapannya pada skala lapangan. Dengan pendekatan tersebut, formulasi yang dikembangkan tidak hanya didasarkan pada potensi teoritis setiap bahan, tetapi juga pada hasil pengujian yang terukur.

5.11. KESIMPULAN

Strategi optimalisasi budidaya kedelai pada lahan marginal memerlukan pendekatan terpadu yang menggabungkan perbaikan kondisi tanah, pengelolaan air, pengelolaan hara, serta penggunaan bahan amelioran dan biostimulan. Biochar dan asam humat memiliki fungsi yang saling melengkapi dalam mendukung perbaikan lingkungan tumbuh, tetapi efektivitas penggunaannya tetap dipengaruhi oleh karakteristik tanah, dosis, kualitas bahan, dan teknik aplikasi.

Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menunjukkan bahwa kombinasi biochar sekam padi dan asam humat dapat memberikan respons positif pada beberapa sifat kimia tanah dan parameter pertumbuhan kedelai. Kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} menunjukkan nilai tinggi pada kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, fosfor tersedia, tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong. Temuan tersebut memberikan contoh empiris bahwa strategi optimalisasi perlu mempertimbangkan keterkaitan antara kondisi tanah dan respons tanaman.

Penerapan hasil penelitian di lokasi lain tetap memerlukan penyesuaian karena karakteristik tanah, bahan amelioran, kondisi iklim, varietas tanaman, dan sistem budidaya dapat berbeda. Oleh sebab itu, strategi optimalisasi sebaiknya tidak hanya berorientasi pada penggunaan dosis tertentu, tetapi juga pada proses evaluasi kondisi tanah, pemilihan bahan yang sesuai, teknik aplikasi, serta pemantauan respons tanaman selama pertumbuhan.

BAB 6

DAMPAK LINGKUNGAN DAN KEBERLANJUTAN (SDGS)

6.1. PERTANIAN PADA ABAD KE-21

Pertanian pada abad ke-21 tidak lagi semata-mata mengejar peningkatan hasil, melainkan juga ditujukan untuk mempertahankan kelestarian sumber daya alam, menekan dampak lingkungan, meningkatkan kesejahteraan masyarakat, dan memperkuat ketahanan pangan. Arah tersebut sesuai dengan prinsip pertanian berkelanjutan (sustainable agriculture), yakni sistem pertanian yang dapat memenuhi kebutuhan pangan masa kini tanpa mengurangi kesempatan generasi berikutnya untuk memenuhi kebutuhan serupa.

Pada pengembangan kedelai di lahan marginal, termasuk tanah pasir pantai (Pasir pantai), penggunaan bahan pembenah tanah seperti biochar, asam humat, pupuk organik, dan kasgot (Black Soldier Fly frass) tidak sekadar diarahkan pada peningkatan hasil tanaman, tetapi juga menghasilkan manfaat ekologis. Penerapan teknologi tersebut dapat memperbaiki kondisi tanah, meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, menekan penggunaan pupuk sintetis, serta membantu memulihkan lahan yang telah mengalami degradasi. Disamping manfaat agronomis, pendekatan tersebut berkaitan erat dengan pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs) atau Tujuan Pembangunan Berkelanjutan yang ditetapkan Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). SDGs merupakan kerangka global yang memadukan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan

dalam suatu pembangunan yang saling menunjang secara terpadu dalam jangka panjang.

Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas, Bantul, memberikan gambaran bahwa pengelolaan tanah menggunakan biochar dan asam humat tidak hanya berkaitan dengan respons pertumbuhan tanaman, tetapi juga dengan perubahan beberapa sifat kimia tanah. Kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} menunjukkan respons tinggi pada kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, fosfor tersedia, tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong. Temuan tersebut menjadi salah satu contoh bahwa pengelolaan lahan marginal dapat diarahkan pada pendekatan yang mengintegrasikan produktivitas tanaman dengan perbaikan kondisi tanah.

Namun, keberlanjutan suatu teknologi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan peningkatan respons tanaman dalam satu periode budidaya. Aspek penggunaan sumber daya, kualitas bahan, kebutuhan input, kondisi lingkungan, serta keberlanjutan fungsi tanah dalam jangka panjang juga perlu dipertimbangkan. Dengan demikian, hasil penelitian menjadi salah satu dasar untuk mengembangkan strategi pengelolaan lahan marginal yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

6.2. KONSEP KEBERLANJUTAN DALAM SISTEM PERTANIAN

Keberlanjutan (sustainability) adalah kemampuan suatu sistem untuk menjaga fungsi dan produktivitasnya dalam jangka panjang tanpa menimbulkan kerusakan lingkungan atau mengurangi kualitas sumber daya alam. Dalam bidang pertanian, keberlanjutan mencakup tiga aspek utama (triple bottom line), yakni lingkungan, ekonomi, dan sosial.

6.2.1. Keberlanjutan Lingkungan

Dimensi lingkungan menitikberatkan pada upaya mempertahankan kualitas tanah, air, udara, dan keanekaragaman hayati. Pertanian berkelanjutan perlu menekan degradasi lahan, mencegah pencemaran, mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya, serta mempertahankan keseimbangan fungsi ekosistem.

6.2.2. Keberlanjutan Ekonomi

Keberlanjutan ekonomi berkaitan dengan kemampuan sistem pertanian menghasilkan keuntungan yang layak bagi petani. Penggunaan teknologi yang meningkatkan efisiensi input, menurunkan biaya produksi, dan menaikkan hasil panen menjadi faktor penting dalam menjaga keberlangsungan usaha tani.

6.2.3. Keberlanjutan Sosial

Keberlanjutan sosial menitikberatkan pada peningkatan kesejahteraan petani, pemerataan akses terhadap teknologi, penguatan kelembagaan pertanian, serta peningkatan ketahanan pangan masyarakat. Sistem pertanian yang berkelanjutan harus mampu menciptakan manfaat yang adil bagi seluruh pemangku kepentingan.

Ketiga dimensi tersebut saling berkaitan dan menjadi dasar dalam pengembangan sistem budidaya kedelai pada lahan marginal.

6.3. DAMPAK LINGKUNGAN PENGELOLAAN LAHAN MARGINAL

Pengelolaan lahan marginal yang dilakukan secara tepat dapat menghasilkan berbagai manfaat lingkungan yang signifikan.

6.3.1. Perbaikan Kualitas Tanah

Pemanfaatan biochar, asam humat, pupuk organik, dan kasgot dapat meningkatkan karbon organik tanah, memperbaiki struktur tanah, menaikkan kapasitas pertukaran kation (KPK), serta memperkuat kemampuan tanah menyimpan air dan unsur hara. Kondisi tersebut menekan potensi degradasi tanah sekaligus mendukung peningkatan produktivitas lahan secara berkelanjutan.

Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menunjukkan bahwa perbaikan kualitas tanah dapat diamati melalui perubahan beberapa sifat kimia setelah pemberian biochar dan asam humat. Tanah awal memiliki kapasitas pertukaran kation sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1}, sedangkan nilai tertinggi setelah perlakuan mencapai 1,72 cmol(+) kg^{-1} pada kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1}. Nitrogen total juga meningkat dari 0,215% pada kondisi awal menjadi 0,44%, sedangkan fosfor tersedia mencapai 79,80 ppm pada kombinasi perlakuan yang sama.

Perubahan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan bahan amelioran dapat memberikan respons positif terhadap kondisi kimia tanah pasir pantai. Perbaikan kapasitas tanah dalam mempertahankan kation dan meningkatnya status beberapa unsur hara dapat mendukung terciptanya lingkungan perakaran yang lebih baik. Meskipun demikian, perubahan sifat tanah tersebut merupakan respons terhadap kombinasi perlakuan dan tidak dapat digunakan untuk memisahkan pengaruh biochar dan asam humat secara tunggal.

6.3.2. Rehabilitasi Lahan Terdegradasi

Lahan marginal sering kali mengalami penurunan kualitas akibat erosi, pelindian unsur hara, atau eksploitasi yang berlebihan. Penerapan bahan amelioran mempercepat proses rehabilitasi melalui peningkatan aktivitas biologis tanah, pembentukan agregat yang lebih stabil, dan peningkatan kesuburan tanah. Dengan demikian, lahan yang sebelumnya kurang

produktif dapat dimanfaatkan kembali tanpa membuka kawasan hutan atau mengonversi lahan pertanian produktif.

Dalam konteks rehabilitasi tanah pasir pantai, perbaikan sifat kimia tanah dapat menjadi salah satu tahap dalam mengurangi faktor pembatas lahan. Namun, rehabilitasi lahan tidak hanya ditentukan oleh perubahan sifat kimia, melainkan juga oleh perbaikan kondisi fisik dan biologis tanah serta pengelolaan air dan vegetasi. Oleh sebab itu, penggunaan biochar dan asam humat lebih tepat ditempatkan sebagai bagian dari pendekatan rehabilitasi terpadu.

6.3.3. Konservasi Air

Tanah pasir pantai memiliki kapasitas menahan air yang rendah sehingga membutuhkan pengelolaan air yang efisien. Aplikasi biochar dan bahan organik meningkatkan retensi air, mengurangi limpasan permukaan (*runoff*), serta meningkatkan infiltrasi. Kondisi ini mendukung efisiensi penggunaan air, terutama pada wilayah yang rentan terhadap kekeringan.

Pada tanah pasir Pantai Samas yang digunakan dalam penelitian, fraksi pasir mencapai 93%. Kondisi tersebut memperlihatkan pentingnya pengelolaan air karena air relatif mudah bergerak melalui tanah. Dalam kondisi demikian, penggunaan biochar dapat menjadi salah satu bagian dari strategi untuk memperbaiki lingkungan perakaran, tetapi tetap perlu dikombinasikan dengan pengaturan irigasi dan teknik konservasi air yang sesuai. Dengan demikian, manfaat bahan amelioran dapat didukung oleh pengelolaan air yang tepat selama pertumbuhan tanaman.

6.3.4. Pengurangan Erosi dan Degradasi Tanah

Perbaikan struktur tanah melalui penambahan bahan organik dan biochar meningkatkan stabilitas agregat sehingga tanah lebih tahan terhadap erosi

oleh air maupun angin. Hal ini sangat penting pada kawasan pesisir yang memiliki risiko tinggi terhadap erosi angin (*wind erosion*).

6.4. KONTRIBUSI TERHADAP MITIGASI DAN ADAPTASI PERUBAHAN IKLIM

Perubahan iklim meningkatkan pentingnya sistem pertanian yang mampu menyimpan karbon dan menghadapi variabilitas lingkungan. Biochar mempunyai peran khusus karena sebagian karbon biomassa diubah menjadi bentuk yang relatif stabil. Ketika dikembalikan ke tanah, karbon tersebut dapat bertahan lebih lama dibandingkan karbon pada biomassa yang mudah terurai.

6.4.1. Penyimpanan Karbon (*Carbon Sequestration*)

Biochar merupakan bentuk karbon stabil yang dapat bertahan dalam tanah selama puluhan hingga ratusan tahun. Penggunaan biochar meningkatkan kandungan karbon organik tanah sekaligus menekan emisi karbon dioksida (CO_2) ke atmosfer. Oleh karena itu, biochar berperan dalam mitigasi perubahan iklim melalui proses *carbon sequestration*.

6.4.2. Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca

Pemanfaatan pupuk organik, pupuk hayati, serta biochar mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan nitrogen sehingga menekan potensi pelepasan dinitrogen oksida (N_2O), gas rumah kaca dengan daya pemanasan global yang jauh lebih besar daripada CO_2. Di samping itu, pengolahan limbah biomassa menjadi biochar turut menghindari pembakaran terbuka yang dapat memicu emisi karbon.

6.4.3. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Perubahan iklim menyebabkan kejadian cuaca ekstrem semakin sering, termasuk kekeringan, curah hujan tinggi, dan kenaikan suhu. Biochar dan asam humat meningkatkan kemampuan tanah menahan air, mendukung pertumbuhan akar, serta mengoptimalkan penggunaan air sehingga tanaman lebih mampu menghadapi tekanan iklim. Teknologi ini memperkuat upaya adaptasi pertanian.

Potensi biochar dan asam humat dalam mendukung mitigasi maupun adaptasi perubahan iklim perlu dibedakan dari hasil pengamatan langsung pada penelitian budidaya. Penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menunjukkan adanya perubahan sifat tanah dan respons pertumbuhan tanaman, tetapi tidak melakukan pengukuran emisi gas rumah kaca, penyimpanan karbon jangka panjang, atau ketahanan tanaman terhadap kejadian iklim ekstrem. Oleh karena itu, manfaat terhadap mitigasi dan adaptasi perubahan iklim dalam konteks penelitian tersebut lebih tepat dipandang sebagai potensi yang memerlukan pengujian lebih lanjut.

6.5. EFISIENSI PEMANFAATAN SUMBER DAYA ALAM

Salah satu prinsip utama pembangunan berkelanjutan adalah penggunaan sumber daya secara efisien. Efisiensi dalam konteks pertanian berarti memperoleh hasil yang optimal dari setiap unit lahan, air, hara, energi, dan tenaga kerja yang digunakan, tanpa menimbulkan pemborosan maupun kerusakan lingkungan. Sumber daya pertanian bersifat terbatas dan sebagian tidak dapat diperbarui, sehingga pemanfaatan yang berlebihan akan menurunkan kualitas lahan, menipiskan cadangan air tanah, dan mengurangi kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan pangannya.

Efisiensi penggunaan air diwujudkan melalui irigasi tetes, pemanenan air hujan, dan penggunaan mulsa yang menekan penguapan. Efisiensi hara dicapai melalui pemupukan berimbang sesuai kebutuhan tanaman dan

kondisi tanah, dengan dukungan pupuk organik, pupuk hayati, dan bahan pembenah tanah seperti biochar yang mengurangi kehilangan hara akibat pencucian. Efisiensi lahan ditingkatkan melalui sistem tanam tumpang sari, rotasi tanaman, dan pemanfaatan lahan marginal secara tepat guna. Efisiensi energi diperoleh dari mekanisasi hemat bahan bakar, penggunaan energi terbarukan, dan teknologi presisi berbasis sensor yang mengatur pemberian input sesuai kondisi aktual lahan.

Prinsip ini juga mencakup pemanfaatan kembali limbah pertanian, seperti sekam padi, jerami, dan kotoran ternak, yang diolah menjadi biochar, kompos, atau pakan sehingga limbah berubah menjadi sumber daya baru dalam siklus produksi yang tertutup. Penerapan prinsip efisiensi secara konsisten menekan biaya produksi, mengurangi emisi gas rumah kaca dan beban pencemaran, serta menjaga daya dukung lingkungan. Dengan demikian, efisiensi sumber daya menjadi penghubung antara tiga dimensi pembangunan berkelanjutan, yaitu keuntungan ekonomi bagi petani, kelestarian lingkungan, dan keadilan antargenerasi dalam akses terhadap pangan dan sumber daya alam.

6.5.1. Pemanfaatan Limbah Biomassa

Produksi biochar dari limbah pertanian, kehutanan, maupun agroindustri mengolah bahan yang semula tidak bernilai menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi. Pendekatan tersebut sejalan dengan konsep ekonomi sirkular (*circular economy*), yaitu sistem yang mengoptimalkan pemanfaatan kembali sumber daya sekaligus mengurangi timbulan limbah.

Penggunaan sekam padi sebagai bahan baku biochar memberikan contoh penerapan pemanfaatan biomassa dalam pengelolaan lahan. Dalam penelitian pada tanah pasir Pantai Samas, biochar sekam padi digunakan sebagai salah satu bahan amelioran dan menunjukkan respons positif ketika dikombinasikan dengan asam humat. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa biomassa pertanian yang tersedia di sekitar wilayah

produksi dapat diarahkan menjadi bahan pembenah tanah dengan nilai guna yang lebih tinggi.

Pemanfaatan biomassa tetap perlu memperhatikan kualitas bahan baku dan proses produksinya. Karakteristik biochar dapat berbeda bergantung pada jenis biomassa dan kondisi pirolisis, sehingga efektivitasnya tidak dapat disamakan untuk seluruh jenis biochar.

6.5.2. Pengurangan Ketergantungan terhadap Input Kimia

Perbaikan efisiensi penggunaan unsur hara melalui biochar dan asam humat memungkinkan pengurangan penggunaan pupuk anorganik tanpa menurunkan produktivitas. Selain mengurangi biaya produksi, strategi ini juga menekan risiko pencemaran tanah dan air akibat residu pupuk.

Penggunaan biochar dan asam humat dapat diarahkan sebagai bagian dari strategi efisiensi input, tetapi pengurangan dosis pupuk anorganik perlu didasarkan pada hasil pengujian yang membandingkan kebutuhan tanaman pada berbagai tingkat pemupukan. Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas menunjukkan perubahan status beberapa unsur hara dan kapasitas pertukaran kation setelah pemberian amelioran, tetapi belum secara langsung mengukur penghematan pupuk atau efisiensi penggunaan pupuk. Dengan demikian, aspek tersebut masih memerlukan evaluasi tersendiri pada penelitian lanjutan.

6.5.3. Peningkatan Efisiensi Penggunaan Air

Pada lahan bertekstur pasir, retensi air yang rendah menjadi kendala utama. Penggunaan biochar, mulsa organik, dan sistem irigasi hemat air meningkatkan efisiensi penggunaan air sehingga kebutuhan irigasi dapat ditekan dan produktivitas tanaman tetap terjaga. Tanah pasir memiliki porositas makro yang dominan dengan luas permukaan partikel yang kecil, sehingga air mudah hilang melalui perkolasi dan hara ikut tercuci

keluar dari zona perakaran. Biochar mengatasi persoalan ini melalui struktur porinya yang halus dan luas permukaannya yang besar, sehingga mampu menahan air dalam pori mikro serta mengikat kation hara yang sebelumnya mudah tercuci. Pemberian biochar juga meningkatkan Kapasitas Pertukaran Kationdan kadar bahan organik tanah, sehingga perbaikan retensi air berjalan seiring dengan perbaikan kesuburan. Mulsa organik bekerja pada permukaan tanah dengan menekan evaporasi, menurunkan suhu tanah, dan melindungi permukaan dari benturan air hujan maupun irigasi. Seiring proses dekomposisi, mulsa menyumbang bahan organik yang memperkuat agregasi dan aktivitas biologi tanah. Sistem irigasi hemat air seperti irigasi tetes melengkapi kedua perlakuan tersebut dengan menyalurkan air dalam jumlah kecil dan frekuensi tinggi tepat pada zona perakaran, sehingga air tidak sempat bergerak melewati batas perakaran akibat laju infiltrasi yang tinggi. Kombinasi ketiganya menciptakan sistem yang saling menguatkan: biochar memperbesar kapasitas simpan air, mulsa menjaga air tetap berada di dalam tanah, dan irigasi hemat air memastikan pasokan air sesuai kebutuhan tanaman. Pendekatan terpadu ini menurunkan volume dan frekuensi irigasi, menekan kehilangan hara, serta menjaga kelembapan tanah pada kisaran yang mendukung pertumbuhan akar, terutama pada musim kemarau. Penerapannya sangat relevan bagi pengembangan pertanian di lahan pasir pantai, karena keterbatasan air dan rendahnya kesuburan alami menjadi dua faktor yang saling berkaitan dan perlu ditangani secara bersamaan.

6.6. KONTRIBUSI TERHADAP KEANEKARAGAMAN HAYATI TANAH

Tanah merupakan habitat bagi berbagai organisme yang berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Penambahan biochar, asam humat, dan pupuk organik meningkatkan populasi bakteri, fungi, aktinomiset, mikoriza, serta mikroorganisme pelarut fosfat yang berperan dalam siklus unsur hara dan pembentukan struktur tanah. Peningkatan keanekaragaman hayati tanah menciptakan ekosistem yang lebih stabil

dan mendukung produktivitas pertanian dalam jangka panjang. Bakteri dan aktinomiset berperan utama dalam dekomposisi bahan organik dan mineralisasi nitrogen, sedangkan fungi menguraikan senyawa kompleks seperti lignin dan selulosa sekaligus membentuk hifa yang mengikat partikel tanah menjadi agregat mantap. Mikoriza memperluas jangkauan sistem perakaran melalui jaringan hifa eksternalnya, sehingga penyerapan air dan hara, terutama fosfor, meningkat pada tanaman inang. Mikroorganisme pelarut fosfat mengubah fosfor yang terikat dalam bentuk tidak tersedia menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman melalui produksi asam organik dan enzim fosfatase. Peran biochar dalam proses ini terletak pada porinya yang berfungsi sebagai tempat berlindung bagi mikroorganisme dari kekeringan dan predator, sementara asam humat merangsang aktivitas metabolisme mikroba dan memperbaiki ketersediaan hara di sekitar zona perakaran. Pupuk organik menyediakan sumber karbon dan energi yang menopang pertumbuhan populasi mikroba secara berkelanjutan. Aktivitas mikroorganisme tersebut menghasilkan eksudat dan senyawa perekat seperti polisakarida dan glomalin, yang memperbaiki agregasi, porositas, serta kemampuan tanah menyimpan air dan hara. Komunitas mikroba yang beragam juga memiliki redundansi fungsional, sehingga proses penting seperti siklus hara tetap berjalan ketika sebagian populasi terganggu oleh perubahan cuaca atau pengelolaan lahan. Keragaman ini turut menekan perkembangan patogen tular tanah melalui kompetisi ruang dan nutrisi serta produksi senyawa antagonis. Pada lahan marginal seperti tanah pasir, peningkatan kehidupan biologi tanah menjadi fondasi pemulihan kesuburan karena mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik dan menjaga produktivitas lahan tetap stabil dari musim ke musim.

6.7. KONTRIBUSI TERHADAP SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGS)

Pengembangan budidaya kedelai berbasis pengelolaan lahan marginal secara berkelanjutan memiliki keterkaitan langsung dengan beberapa tujuan dalam **Sustainable Development Goals (SDGs)**.

6.7.1. SDG 2: Zero Hunger (Tanpa Kelaparan)

Optimalisasi budidaya kedelai meningkatkan produksi pangan, memperkuat ketahanan pangan nasional, dan menyediakan sumber protein nabati yang terjangkau bagi masyarakat. Peningkatan produktivitas pada lahan marginal juga memperluas kapasitas produksi tanpa harus membuka lahan baru.

6.7.2. SDG 6: Clean Water and Sanitation (Air Bersih dan Sanitasi Layak)

Peningkatan efisiensi penggunaan air serta pengurangan pencemaran akibat pelindian pupuk mendukung pengelolaan sumber daya air yang lebih berkelanjutan. Kemampuan menahan air yang baik dari tanah akan membantu mengurangi limpasan permukaan dan kehilangan unsur hara ke badan air.

6.7.3. SDG 12: Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab (*Responsible Consumption and Production*)

Penggunaan limbah biomassa sebagai bahan baku biochar dan kasgot sebagai pupuk organik merupakan contoh penerapan ekonomi sirkular. Pendekatan ini mengurangi limbah, meningkatkan nilai tambah biomassa, dan memacu pemanfaatan sumber daya yang lebih efisien.

6.7.4. *SDG 13: Climate Action* (Penanganan Perubahan Iklim)

Efek pengaplikasian teknologi biochar dan asam humat terhadap aksi iklim diantaranya meningkatan penyimpanan karbon dalam tanah, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan menaikkan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim.

6.7.5. SDG 15: Life on Land (Menjaga Ekosistem Daratan)

Perbaikan kualitas tanah, rehabilitasi lahan terdegradasi, peningkatan keanekaragaman hayati tanah, serta pengurangan degradasi lahan mendukung perlindungan dan pemulihan ekosistem daratan secara berkelanjutan.

6.7.6. SDG 8: *Decent Work and Economic Growth* (Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi)

Peningkatan produktivitas kedelai melalui teknologi pengelolaan lahan marginal dapat meningkatkan pendapatan petani, menciptakan peluang usaha berbasis biomassa, dan memperkuat ekonomi pedesaan.

6.7.7. SDG 9: *Industry, Innovation and Infrastructure* (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur)

Pengembangan teknologi produksi biochar, formulasi amelioran, dan inovasi pengelolaan lahan marginal mendorong lahirnya inovasi di bidang pertanian, memperkuat kolaborasi antara perguruan tinggi, lembaga penelitian, pemerintah, dan sektor swasta. Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas dapat ditempatkan sebagai salah satu contoh empiris yang mendukung kerangka tersebut, khususnya melalui upaya memperbaiki kondisi tanah dan mendukung pertumbuhan kedelai pada lahan dengan faktor pembatas. Respons positif pada kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, fosfor tersedia, tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong menunjukkan adanya potensi keterkaitan antara pengelolaan lahan marginal dengan tujuan peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan. Namun, kontribusi terhadap SDGs memiliki cakupan yang lebih luas daripada hasil satu penelitian, sehingga aspek ekonomi, sosial, lingkungan, dan dampak jangka panjang tetap memerlukan evaluasi tersendiri.

6.8. TANTANGAN IMPLEMENTASI

Meskipun memiliki banyak manfaat, implementasi teknologi pengelolaan lahan marginal masih menghadapi beberapa tantangan, antara lain:

- keterbatasan akses petani terhadap biochar, asam humat, dan pupuk hayati;
- variasi kualitas bahan amelioran akibat perbedaan bahan baku dan proses produksi;
- perlunya rekomendasi dosis yang spesifik berdasarkan karakteristik tanah dan tanaman;
- rendahnya tingkat adopsi teknologi akibat keterbatasan pengetahuan dan pendampingan;
- perlunya dukungan kebijakan untuk pengembangan industri biochar dan pemanfaatan limbah organik.

Mengatasi tantangan tersebut memerlukan sinergi antara pemerintah, perguruan tinggi, lembaga penelitian, sektor swasta, penyuluh pertanian, dan kelompok tani agar inovasi dapat diterapkan secara luas dan berkelanjutan.

6.9. PROSPEK PENGEMBANGAN

Ke depan, strategi pengelolaan lahan marginal diperkirakan akan berkembang menuju pendekatan yang lebih presisi dan berbasis data. Integrasi teknologi seperti analisis kesuburan tanah, sistem informasi geografis (SIG), sensor kelembapan tanah, dan pertanian presisi (*precision agriculture*) dapat digunakan untuk menentukan dosis amelioran dan pengelolaan input secara lebih efisien. Di sisi lain, pengembangan formulasi biochar yang diperkaya asam humat, kasgot, pupuk hayati, dan unsur hara spesifik berpotensi menghasilkan produk pembenah tanah multifungsi yang sesuai dengan kebutuhan berbagai agroekosistem di Indonesia.

6.10. KESIMPULAN

Pengelolaan lahan marginal melalui pemanfaatan biochar, asam humat, bahan organik, dan teknologi pendukung memiliki potensi untuk meningkatkan fungsi tanah sekaligus mendukung produktivitas tanaman. Pendekatan tersebut perlu ditempatkan dalam kerangka keberlanjutan yang mempertimbangkan keterkaitan antara aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial.

Hasil penelitian pada tanah pasir Pantai Samas memberikan contoh bahwa penggunaan biochar sekam padi dan asam humat dapat memberikan respons positif terhadap beberapa sifat kimia tanah dan pertumbuhan tanaman kedelai. Kombinasi biochar 20 ton ha^{-1} dan asam humat 3,15 L ha^{-1} menunjukkan nilai tinggi pada kapasitas pertukaran kation, nitrogen total, fosfor tersedia, tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah polong. Temuan tersebut memperkuat pentingnya pendekatan terpadu dalam mengelola tanah pasir pantai yang memiliki keterbatasan dalam mempertahankan air dan unsur hara.

Meskipun demikian, keberlanjutan teknologi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan respons satu periode penelitian. Dampak terhadap penyimpanan karbon, emisi gas rumah kaca, biodiversitas tanah, efisiensi penggunaan air dan pupuk, kelayakan ekonomi, serta dampak sosial memerlukan pengukuran dan evaluasi tersendiri. Demikian pula, dosis yang memberikan respons tinggi pada suatu lokasi belum tentu berlaku secara langsung pada lokasi lain.

Dengan demikian, pengembangan biochar dan asam humat untuk budidaya kedelai perlu diarahkan pada teknologi yang spesifik lokasi, berbasis data, dan dievaluasi secara jangka panjang. Integrasi penelitian, inovasi teknologi, pendampingan petani, serta pemanfaatan sumber daya lokal menjadi bagian penting untuk memastikan bahwa peningkatan produktivitas lahan marginal dapat berjalan seiring dengan pemeliharaan kualitas lingkungan dan keberlanjutan sistem pertanian.

BAB 7

BIOCHAR DAN ASAM HUMAT UNTUK KETAHANAN PANGAN

7.1. PERAN BIOCHAR DAN ASAM HUMAT DALAM PENGEMBANGAN KEDELAI PADA LAHAN MARGINAL PASIR PANTAI

Pengembangan kedelai di lahan marginal menjadi salah satu langkah strategis untuk memperkuat ketahanan pangan nasional, meningkatkan produktivitas pertanian, dan memanfaatkan sumber daya lahan yang selama ini belum dikelola secara optimal. Kedelai merupakan komoditas pangan yang memiliki peranan penting sebagai sumber protein nabati dan bahan baku industri pengolahan pangan. Namun, keterbatasan lahan pertanian produktif, perubahan penggunaan lahan, serta tingginya kebutuhan kedelai dalam negeri menuntut adanya alternatif pengelolaan lahan yang mampu mendukung peningkatan produksi secara berkelanjutan. Salah satu alternatif yang dapat dikembangkan adalah pemanfaatan lahan marginal, termasuk tanah pasir pantai, dengan menerapkan teknologi pembenah tanah yang sesuai.

Tanah pasir pantai memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai lahan budidaya kedelai, tetapi pemanfaatannya menghadapi sejumlah kendala. Dominasi fraksi pasir menyebabkan tanah memiliki kemampuan terbatas dalam mempertahankan air dan unsur hara. Rendahnya kandungan bahan organik dan kapasitas pertukaran kation (KPK) juga menyebabkan unsur hara yang diberikan melalui pemupukan lebih mudah hilang melalui proses pelindian. Kondisi tersebut dapat menghambat perkembangan akar, penyerapan unsur hara, pembentukan biomassa, hingga pembentukan polong dan biji. Oleh karena itu, peningkatan

produktivitas kedelai pada tanah pasir pantai perlu dilakukan melalui perbaikan lingkungan tumbuh, bukan hanya dengan meningkatkan jumlah pupuk yang diberikan.

Biochar dan asam humat merupakan dua bahan yang memiliki potensi untuk mendukung perbaikan kondisi tanah tersebut. Biochar merupakan bahan kaya karbon yang dihasilkan melalui proses pemanasan biomassa dalam kondisi oksigen terbatas. Bahan ini memiliki struktur berpori dan karakteristik permukaan yang dapat memengaruhi kemampuan tanah dalam menyimpan air serta mempertahankan unsur hara. Sementara itu, asam humat merupakan fraksi bahan humat yang memiliki gugus fungsional aktif dan berpotensi memengaruhi proses kimia tanah serta respons fisiologis tanaman. Penggunaan kedua bahan tersebut dapat diarahkan untuk menciptakan lingkungan perakaran yang lebih mendukung pertumbuhan kedelai pada lahan dengan tingkat kesuburan rendah.

Peran biochar dalam memperbaiki kualitas tanah berkaitan dengan karakteristik fisik dan kimianya. Struktur pori biochar dapat membantu menahan sebagian air di dalam tanah, meskipun besarnya pengaruh bergantung pada jenis bahan baku, suhu produksi, ukuran partikel, dosis aplikasi, dan karakteristik tanah yang digunakan. Pada tanah pasir pantai, keberadaan biochar berpotensi meningkatkan kemampuan tanah mempertahankan air di sekitar zona perakaran. Kondisi tersebut penting karena kedelai membutuhkan ketersediaan air yang relatif memadai selama fase perkecambahan, pertumbuhan vegetatif, pembungaan, pembentukan polong, dan pengisian biji. Kekurangan air pada fase-fase tersebut dapat mengganggu proses fisiologis tanaman dan menurunkan potensi hasil.

Selain memperbaiki pengelolaan air, biochar dapat berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan tanah dalam mempertahankan unsur hara. Permukaan biochar yang memiliki gugus fungsional tertentu dapat berinteraksi dengan ion hara sehingga mengurangi kehilangan sebagian

unsur hara melalui pelindian. Pengaruh tersebut menjadi penting pada tanah pasir pantai yang umumnya memiliki KPK rendah. Meskipun demikian, kemampuan biochar dalam menahan unsur hara tidak selalu sama pada setiap kondisi karena dipengaruhi oleh karakteristik biochar, tingkat kematangan bahan, pH tanah, dan bentuk unsur hara yang tersedia. Oleh karena itu, pemanfaatan biochar perlu disertai dengan pengelolaan pemupukan yang mempertimbangkan kebutuhan tanaman dan kondisi tanah.

Biochar juga dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan kandungan karbon organik tanah. Karbon yang relatif stabil di dalam biochar berpotensi bertahan lebih lama dibandingkan sebagian bahan organik yang mudah terdekomposisi. Dalam sistem pertanian, karakteristik tersebut menjadikan biochar berpotensi mendukung penyimpanan karbon sekaligus meningkatkan pemanfaatan limbah biomassa. Sekam padi, misalnya, dapat diolah menjadi biochar sehingga memiliki nilai guna sebagai bahan pembenah tanah. Pemanfaatan biomassa lokal ini dapat mendukung penerapan ekonomi sirkular melalui pengubahan bahan sisa menjadi produk yang bermanfaat bagi kegiatan pertanian.

Asam humat memiliki fungsi yang berbeda, tetapi dapat melengkapi peran biochar. Senyawa ini dapat berinteraksi dengan unsur hara melalui gugus karboksil dan fenolik yang terdapat dalam strukturnya. Interaksi tersebut berpotensi memengaruhi retensi dan ketersediaan unsur hara di dalam tanah. Pada tanaman, asam humat juga dapat memengaruhi perkembangan sistem perakaran, aktivitas fisiologis, dan efisiensi pemanfaatan sumber daya. Perkembangan akar yang lebih baik dapat memperluas wilayah jelajah tanaman dalam memperoleh air dan unsur hara, terutama pada tanah yang memiliki distribusi hara tidak merata.

Kombinasi biochar dan asam humat dapat dikembangkan melalui pendekatan yang mengintegrasikan perbaikan kondisi tanah dengan dukungan terhadap proses pertumbuhan tanaman. Biochar berperan dalam memperbaiki lingkungan fisik dan kimia tanah, sedangkan asam

humat berpotensi mendukung ketersediaan hara dan respons fisiologis tanaman. Namun, kombinasi tersebut tidak secara otomatis menghasilkan pengaruh yang lebih besar dalam setiap kondisi. Efektivitasnya tetap dipengaruhi oleh dosis, mutu bahan, karakteristik tanah, metode aplikasi, dan kebutuhan tanaman. Oleh sebab itu, penggunaan kedua bahan perlu mempertimbangkan kesesuaian formulasi serta keseimbangan antara perbaikan tanah dan kebutuhan nutrisi kedelai.

Pengelolaan tanah juga dapat diperkuat melalui pemanfaatan pupuk organik dan pupuk hayati. Kasgot atau frass Black Soldier Fly dapat menjadi salah satu sumber bahan organik dan unsur hara, bergantung pada bahan asal serta proses pengolahannya. Sementara itu, mikroorganisme yang menguntungkan dapat mendukung proses transformasi unsur hara dan fungsi biologis tanah. Pada tanaman kedelai, keberadaan bakteri Rhizobium yang sesuai berperan penting dalam pembentukan bintil akar dan fiksasi nitrogen secara biologis. Namun, keberhasilan proses tersebut dipengaruhi oleh kompatibilitas mikroorganisme, kondisi lingkungan perakaran, ketersediaan unsur hara, serta kelembapan tanah. Oleh karena itu, penggunaan biochar, asam humat, pupuk organik, dan pupuk hayati perlu ditempatkan dalam sistem pengelolaan yang terpadu.

Gambaran penerapan pendekatan tersebut dapat dilihat pada pengelolaan tanah pasir Pantai Samas, Bantul, yang memiliki fraksi pasir sebesar 93%, fraksi debu 6%, dan fraksi lempung 1%. Tanah tersebut memiliki KPK awal sebesar 1,10 cmol(+) kg^{-1} dan kandungan C-organik sebesar 0,51%. Karakteristik tersebut memperlihatkan pentingnya upaya memperbaiki kemampuan tanah dalam mempertahankan unsur hara dan mendukung lingkungan perakaran. Kombinasi biochar sekam padi sebanyak 20 ton ha^{-1} dan asam humat sebanyak 3,15 L ha^{-1} menunjukkan respons tinggi pada sejumlah parameter tanah dan pertumbuhan kedelai dalam kajian yang dibahas pada buku ini. Hasil tersebut memberikan gambaran mengenai potensi pemanfaatan bahan pembenah tanah untuk mendukung pengelolaan lahan pasir pantai.

Meskipun demikian, dosis yang menunjukkan respons tinggi pada kondisi tersebut tidak dapat langsung ditetapkan sebagai rekomendasi universal bagi seluruh lahan pasir pantai. Perbedaan sifat tanah, kualitas biochar, sumber asam humat, varietas kedelai, kondisi iklim, dan sistem pengelolaan air dapat menghasilkan respons yang berbeda. Penerapan pada skala usaha tani perlu mempertimbangkan kondisi awal tanah, ketersediaan bahan, biaya pengangkutan, kebutuhan pemupukan, serta kemampuan petani dalam menerapkan teknologi. Dengan demikian, keberhasilan pengembangan kedelai pada lahan marginal tidak hanya ditentukan oleh penggunaan bahan pembenah tanah, tetapi juga oleh kesesuaian teknologi dengan kondisi setempat dan pengelolaan budidaya secara menyeluruh.

Ditinjau dari perspektif ketahanan pangan, pemanfaatan biochar dan asam humat membuka peluang untuk meningkatkan fungsi lahan marginal tanpa selalu bergantung pada perluasan lahan pertanian produktif. Perbaikan kualitas tanah yang disertai pengelolaan air, pemupukan berimbang, penggunaan varietas adaptif, dan pemeliharaan tanaman secara tepat dapat mendukung peningkatan kapasitas produksi kedelai. Pendekatan tersebut perlu tetap memperhatikan fungsi ekologis kawasan pesisir sehingga pengembangan pertanian tidak mengorbankan kawasan lindung, vegetasi pantai, maupun sumber daya alam yang memiliki fungsi perlindungan lingkungan.Ditinjau dari aspek lingkungan, penggunaan biochar, asam humat, dan pupuk organik dapat memberikan manfaat berupa rehabilitasi lahan terdegradasi, peningkatan karbon organik tanah, konservasi air, penguatan keanekaragaman hayati tanah, serta penurunan emisi gas rumah kaca melalui peningkatan penyimpanan karbon (carbon sequestration). Pendekatan tersebut sekaligus memperkuat fungsi ekologis tanah dan ketahanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim.

Ditinjau dari aspek lingkungan, penggunaan biochar, asam humat, dan pupuk organik dapat memberikan manfaat berupa rehabilitasi lahan terdegradasi, peningkatan karbon organik tanah, konservasi air, penguatan keanekaragaman hayati tanah, serta penurunan emisi gas rumah kaca

melalui peningkatan penyimpanan karbon (carbon sequestration). Pendekatan tersebut sekaligus memperkuat fungsi ekologis tanah dan ketahanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim.

Selain itu, pengelolaan lahan marginal dengan teknologi ameliorasi berkontribusi pada pencapaian sejumlah Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya SDG 2 (Zero Hunger), SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), SDG 13 (Climate Action), dan SDG 15 (Life on Land). Oleh karena itu, strategi tersebut tidak hanya meningkatkan hasil pertanian, tetapi juga mendukung pertanian berkelanjutan yang lebih tangguh terhadap perubahan iklim dan berorientasi pada kesejahteraan masyarakat.

Keberhasilan pendekatan ini juga sangat dipengaruhi oleh penyesuaian teknologi dengan kondisi setempat, ketersediaan bahan amelioran, kemampuan petani, serta dukungan kebijakan dan pendampingan yang berkesinambungan di tingkat lapangan agar penerapannya tetap efektif, efisien, dan mudah dikembangkan pada skala luas.

Pada akhirnya, pengembangan kedelai di lahan marginal melalui integrasi biochar, asam humat, pupuk organik, dan teknik budidaya yang sesuai merupakan pendekatan ilmiah, aplikatif, dan berkelanjutan. Penerapannya membutuhkan kerja sama antara peneliti, perguruan tinggi, pemerintah, penyuluh pertanian, sektor swasta, dan petani agar inovasi dapat diadopsi secara luas serta memberikan manfaat nyata bagi ketahanan pangan Indonesia.

7.2. PENGUNAAN BAHAN PEMBENAH TANAH BIOCHAR DAN ASAM HUMAT UNTUK LAHAN MARGINAL

Penggunaan biochar dan asam humat merupakan salah satu strategi untuk memperbaiki fungsi tanah marginal, baik pada lahan pasir pantai maupun

pada lahan terdegradasi lainnya. Tanah marginal umumnya memiliki satu atau beberapa faktor pembatas yang menyebabkan produktivitasnya rendah, seperti kandungan bahan organik yang terbatas, kemampuan menahan air yang rendah, ketidakseimbangan unsur hara, atau aktivitas biologis tanah yang belum mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.

Pengelolaan tanah pada kondisi tersebut memerlukan pendekatan yang mampu mengurangi faktor pembatas tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Biochar dapat digunakan sebagai bahan pembenah tanah karena karakteristik pori dan permukaannya berpotensi memperbaiki retensi air serta memengaruhi pertukaran ion di dalam tanah. Sementara itu, asam humat dapat membantu proses interaksi antara unsur hara dan komponen tanah serta mendukung respons pertumbuhan tanaman. Kedua bahan tersebut memiliki fungsi yang saling melengkapi, tetapi tidak dapat menggantikan seluruh kebutuhan pupuk, pengelolaan air, maupun praktik budidaya yang baik. Pemulihan fungsi tanah tetap membutuhkan penyediaan unsur hara yang seimbang, pengelolaan bahan organik, dan pemeliharaan aktivitas biologis tanah.

Keberhasilan penggunaan bahan pembenah tanah juga bergantung pada kualitas bahan yang diaplikasikan. Biochar yang berasal dari bahan baku berbeda dapat memiliki karakteristik fisik dan kimia yang tidak sama. Suhu produksi, lama pemanasan, ukuran partikel, kandungan abu, pH, serta karakteristik permukaan dapat memengaruhi respons biochar setelah dicampurkan dengan tanah. Oleh karena itu, pemilihan biochar perlu mempertimbangkan bahan baku, proses produksi, keamanan bahan, dan kesesuaiannya dengan kondisi tanah yang akan dikelola.

Asam humat juga perlu digunakan dengan memperhatikan konsentrasi, bentuk formulasi, metode aplikasi, dan dosis yang sesuai. Pemberian asam humat secara berlebihan tidak selalu meningkatkan pertumbuhan tanaman karena responsnya dipengaruhi oleh karakteristik

produk dan kondisi lingkungan. Demikian pula, penggunaan biochar dengan dosis tinggi tanpa mempertimbangkan sifat tanah dan kebutuhan tanaman dapat menimbulkan perubahan kondisi tanah yang tidak diharapkan. Dengan demikian, pengelolaan bahan pembenah tanah perlu berorientasi pada ketepatan penggunaan, efisiensi input, dan keberlanjutan fungsi tanah.

Pemanfaatan biochar dan asam humat pada lahan pasir pantai sebaiknya diintegrasikan dengan pengelolaan air, pemupukan berimbang, penggunaan bahan organik, serta perlindungan permukaan tanah. Pengelolaan tersebut membantu menciptakan lingkungan perakaran yang lebih mendukung pertumbuhan kedelai. Pada lahan pascatambang atau lahan terdegradasi lainnya, penerapan bahan pembenah tanah perlu disesuaikan dengan faktor pembatas dominan, termasuk kemungkinan adanya masalah kemasaman, salinitas, atau kontaminasi. Biochar dan asam humat tidak dapat dianggap sebagai solusi tunggal untuk seluruh jenis lahan marginal.

Pengembangan teknologi, kebijakan pemanfaatan lahan, dan praktik budidaya perlu diarahkan pada penggunaan bahan pembenah tanah yang berbasis kebutuhan dan kondisi setempat. Pendekatan tersebut dapat mendukung peningkatan produktivitas lahan sekaligus menjaga efisiensi penggunaan sumber daya. Pengembangan lebih lanjut dapat difokuskan pada aspek-aspek berikut..

7.2.1. Pengembangan Teknologi kedepan pada Biochar dan Asam Humat

Pengembangan teknologi biochar dan asam humat perlu diarahkan pada penyediaan bahan pembenah tanah yang berkualitas, aman, ekonomis, dan mudah diterapkan oleh petani. Pemanfaatan teknologi tidak hanya berkaitan dengan proses produksi, tetapi juga mencakup pengendalian

mutu, formulasi bahan, metode aplikasi, dan evaluasi hasil penerapan di lapangan.

a. Pengembangan teknologi produksi biochar skala rumah tangga maupun skala industri perlu ditingkatkan agar tersedia produk biochar yang berkualitas, seragam, dan ekonomis. enggunaan limbah biomassa lokal, seperti sekam padi, dapat menjadi alternatif untuk menyediakan bahan baku yang mudah diperoleh di wilayah sentra pertanian. Proses produksi perlu memperhatikan kondisi pemanasan dan ketersediaan oksigen agar menghasilkan biochar dengan karakteristik yang sesuai. Selain itu, pengendalian emisi selama produksi perlu menjadi perhatian untuk menghindari pencemaran udara dan menjaga keselamatan operator. Pengembangan alat produksi yang efisien dan mudah dioperasikan dapat membantu meningkatkan ketersediaan biochar sekaligus mengurangi biaya pengolahan biomassa.
b. Formulasi biochar dan asam humat, disertai dengan pemberian nutrisi yang bersumber dari: kasgot, mikroorganisme hayati, dan unsur hara spesifik perlu dikembangkan menjadi produk pembenah tanah multifungsi yang mudah diaplikasikan oleh masyarakat. Formulasi dapat diarahkan pada kombinasi bahan pembenah tanah dengan pupuk organik, kasgot, pupuk hayati, atau sumber unsur hara tertentu. Namun, setiap komponen harus memiliki fungsi yang jelas dan tidak menimbulkan ketidaksesuaian ketika dicampurkan. Karakteristik bahan, kestabilan formulasi, kemudahan penyimpanan, serta metode aplikasi perlu diperhatikan agar produk dapat digunakan secara efektif. Pengembangan formulasi multifungsi sebaiknya tetap mengutamakan kesesuaian dosis dan keamanan bagi tanah, tanaman, serta lingkungan.
c. Pemanfaatan biochar perlu diintegrasikan dengan teknologi pengelolaan air yang efisien. Pada tanah pasir pantai, penggunaan irigasi tetes, mulsa, dan pemanenan air hujan dapat membantu menjaga ketersediaan air selama pertumbuhan kedelai. Sensor kelembapan tanah juga dapat digunakan untuk menentukan waktu pemberian air berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Integrasi teknologi tersebut berpotensi mengurangi

pemborosan air dan membantu mempertahankan kelembapan pada zona perakaran. Meskipun demikian, penerapannya perlu disesuaikan dengan ketersediaan infrastruktur, kemampuan petani, dan biaya operasional.

d. Pengembangan teknologi pemanfaatan limbah biomassa lokal sebagai bahan baku biochar perlu didorong untuk mendukung ekonomi sirkular dan mengurangi limbah pertanian. Biomassa yang sebelumnya tidak dimanfaatkan dapat diolah menjadi produk bernilai guna, termasuk biochar, selama bahan baku dan proses pengolahannya memenuhi persyaratan yang sesuai. Pendekatan ini dapat memperkuat keterkaitan antara kegiatan pertanian, pengolahan biomassa, dan penyediaan bahan pembenah tanah. Pengelolaan tersebut juga berpotensi membuka peluang usaha baru di tingkat lokal serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan yang harus didatangkan dari luar wilayah.
e. pengendalian mutu perlu menjadi bagian penting dalam pengembangan teknologi biochar dan asam humat. Informasi mengenai bahan baku, proses produksi, karakteristik kimia, ukuran partikel, konsentrasi produk, dan petunjuk penggunaan perlu tersedia secara jelas. Pengujian mutu diperlukan untuk memastikan bahwa bahan yang dipasarkan memiliki karakteristik yang sesuai dengan tujuan penggunaannya. Dengan adanya pengendalian mutu, petani dapat memperoleh informasi yang lebih memadai dalam memilih produk serta menentukan metode aplikasi yang sesuai dengan kondisi lahannya.

7.2.2. Kebijakan Pengunaan Lahan marginal untuk Ketahanan Pangan

Pemanfaatan lahan marginal untuk mendukung ketahanan pangan memerlukan kebijakan yang mampu menyeimbangkan peningkatan produksi, perlindungan lingkungan, dan kesejahteraan masyarakat. Pengembangan kedelai pada lahan pasir pantai tidak cukup dilakukan melalui penyediaan teknologi budidaya, tetapi juga membutuhkan

kepastian mengenai kesesuaian lahan, akses terhadap bahan pembenah tanah, dukungan infrastruktur, dan pendampingan kepada petani.

a. Pemerintah perlu menyusun kebijakan yang mendorong pemanfaatan lahan marginal sebagai bagian dari strategi nasional peningkatan produksi kedelai. kebijakan pemanfaatan lahan marginal perlu didasarkan pada evaluasi kesesuaian lahan dan kondisi ekologis setempat. Tidak seluruh kawasan pesisir dapat diarahkan menjadi lahan pertanian karena sebagian wilayah memiliki fungsi penting dalam perlindungan pantai, konservasi ekosistem, dan pengendalian abrasi. Oleh karena itu, pengembangan kedelai perlu diprioritaskan pada lahan yang sesuai dan tidak bertentangan dengan ketentuan perlindungan lingkungan. Pemetaan potensi lahan dapat membantu menentukan lokasi yang layak dikembangkan serta mengidentifikasi faktor pembatas yang harus diatasi.
b. Insentif bagi produksi dan penggunaan biochar, pupuk organik, dan pupuk hayati perlu diperluas untuk meningkatkan adopsi teknologi di tingkat petani. dukungan terhadap produksi dan pemanfaatan biochar perlu diarahkan pada penyediaan bahan baku, pengembangan fasilitas produksi, pengendalian mutu, dan kemudahan akses bagi petani. Insentif dapat diberikan secara terarah untuk mendorong pemanfaatan biomassa lokal dan pengembangan usaha pengolahan bahan pembenah tanah. Dukungan tersebut perlu mempertimbangkan kelayakan ekonomi agar teknologi yang dikembangkan tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga dapat diterapkan secara berkelanjutan.
c. Program rehabilitasi lahan terdegradasi sebaiknya mengintegrasikan penggunaan amelioran organik sebagai bagian dari upaya konservasi tanah dan air. Pendekatan terpadu diperlukan karena kerusakan atau penurunan fungsi tanah umumnya tidak disebabkan oleh satu faktor saja. Pada lahan pasir pantai, misalnya, perbaikan kemampuan menahan air perlu disertai dengan pengaturan irigasi dan perlindungan permukaan tanah. Pada lahan dengan faktor

pembatas berbeda, strategi pemulihan harus disesuaikan dengan kondisi yang ditemukan.

d. Penguatan sistem penyuluhan pertanian perlu diarahkan pada peningkatan kapasitas petani dalam menerapkan teknologi pengelolaan lahan marginal berbasis bukti ilmiah. Informasi mengenai dosis, cara aplikasi, waktu pemberian, serta pengelolaan air perlu disampaikan melalui pelatihan dan demonstrasi lapangan. Pendampingan semacam ini dapat membantu petani menghindari penggunaan bahan yang tidak sesuai dan meningkatkan kemampuan dalam mengevaluasi hasil penerapan teknologi.
e. Kolaborasi antara pemerintah, perguruan tinggi, lembaga penelitian, dunia usaha, dan kelompok tani perlu diperkuat untuk mempercepat hilirisasi hasil menjadi teknologi yang siap diterapkan. Perguruan tinggi dapat berkontribusi melalui penyediaan informasi teknis dan pengembangan teknologi, sedangkan pemerintah berperan dalam penyusunan kebijakan dan fasilitasi program. Dunia usaha dapat mendukung penyediaan bahan serta pengembangan rantai pasok, sementara petani menjadi pelaku utama dalam penerapan teknologi di lapangan. Sinergi tersebut penting agar pengembangan biochar dan asam humat tidak berhenti pada tahap pengenalan teknologi, tetapi dapat diterapkan secara tepat dan berkelanjutan.

7.2.3. Strategi Pengelolaan Kedelai pada Lahan Marginal Pasir Pantai

Pengembangan kedelai pada tanah pasir pantai memerlukan strategi budidaya yang disesuaikan dengan keterbatasan air, rendahnya kandungan bahan organik, dan kemampuan tanah mempertahankan unsur hara. Biochar dan asam humat dapat menjadi bagian dari strategi tersebut, tetapi keberhasilannya bergantung pada keterpaduan antara pengelolaan tanah, air, nutrisi, varietas, dan pemeliharaan tanaman.



a. Budidaya kedelai pada lahan pasir pantai sebaiknya menggunakan pendekatan pengelolaan tanah secara terpadu dengan mengombinasikan biochar, asam humat, pupuk organik, dan pupuk hayati.
b. Melakukan evaluasi kondisi awal tanah. Informasi mengenai tekstur, pH, kandungan bahan organik, KPK, unsur hara, dan salinitas apabila relevan dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor pembatas utama. Hasil evaluasi tersebut menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan bahan pembenah tanah dan pemupukan. Pendekatan ini penting karena lahan yang secara umum tergolong marginal dapat memiliki permasalahan yang berbeda sehingga membutuhkan strategi pengelolaan yang sesuai.

c. Persiapan lahan dan mengaplikasikan biochar secara tepat. Biochar perlu dicampurkan pada zona tanah yang akan mendukung perkembangan akar agar manfaatnya dapat dirasakan tanaman. Penentuan dosis sebaiknya mempertimbangkan karakteristik biochar, kondisi tanah, ketersediaan bahan, dan biaya aplikasi. Apabila digunakan bersama asam humat, metode pemberian kedua bahan perlu disesuaikan dengan karakteristik formulasi dan petunjuk penggunaan. Pengaplikasian yang tepat membantu mengurangi kehilangan bahan dan meningkatkan efisiensi pemanfaatannya.
d. Penerapkan pemupukan berimbang. Kedelai memerlukan unsur hara makro dan mikro untuk mendukung pertumbuhan vegetatif, pembentukan bunga, perkembangan polong, dan pengisian biji. Biochar dan asam humat tidak dapat menggantikan seluruh kebutuhan nutrisi tanaman. Oleh sebab itu, pemberian pupuk tetap perlu disesuaikan dengan kondisi tanah dan kebutuhan tanaman. Penggunaan bahan organik dapat membantu memperbaiki kualitas tanah, sedangkan pupuk hayati yang sesuai dapat mendukung proses biologis tertentu, termasuk fiksasi nitrogen pada kedelai melalui hubungan simbiotik dengan Rhizobium.
e. Pengelolaan air secara efisien pada tanah pasir pantai. Tanah pasir pantai memiliki kemampuan menahan air yang terbatas sehingga kelembapan tanah dapat menurun dengan cepat setelah hujan atau irigasi. Penggunaan mulsa dapat membantu mengurangi evaporasi, sedangkan irigasi yang diberikan sesuai kebutuhan tanaman dapat menjaga ketersediaan air pada zona perakaran. Pengelolaan air perlu mendapat perhatian khusus pada fase perkecambahan, pembungaan, pembentukan polong, dan pengisian biji karena kekurangan air pada fase tersebut berpotensi memengaruhi hasil kedelai.
f. Pemilihan varietas yang sesuai dengan kondisi lingkungan setempat. Penggunaan varietas adaptif perlu mempertimbangkan kemampuan tumbuh, umur panen, potensi hasil, serta toleransi terhadap cekaman yang dominan. Penggunaan varietas unggul tetap perlu diimbangi

dengan pengelolaan tanah dan air yang memadai agar potensi genetik tanaman dapat dimanfaatkan secara optimal.

g. Pemeliharaan tanaman secara terpadu seperti pengendalian gulma, pemantauan serangan hama dan penyakit, serta pengamatan pertumbuhan perlu dilakukan selama fase vegetatif dan generatif. Perkembangan tinggi tanaman, jumlah daun, kondisi perakaran, pembentukan bintil akar, jumlah polong, dan kondisi biji dapat digunakan sebagai indikator untuk menilai respons tanaman terhadap pengelolaan yang diterapkan. Namun, penilaian produktivitas tidak cukup hanya didasarkan pada pertumbuhan vegetatif atau jumlah polong. Hasil akhir juga dipengaruhi oleh jumlah biji per polong, bobot biji, tingkat kehampaan polong, dan kondisi lingkungan selama pengisian biji.Analisis tanah sebelum penanaman perlu dilakukan untuk menentukan kebutuhan amelioran dan pemupukan yang sesuai dengan kondisi lahan. Informasi mengenai tekstur, pH, kandungan bahan organik, KPK, unsur hara, dan salinitas apabila relevan dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor pembatas utama. Hasil evaluasi tersebut menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan bahan pembenah tanah dan pemupukan. Pendekatan ini penting karena lahan yang secara umum tergolong marginal dapat memiliki permasalahan yang berbeda sehingga membutuhkan strategi pengelolaan yang tidak selalu sama.

h. Evaluasi kondisi tanah dan tanaman secara berkala. Evaluasi dapat mencakup perubahan sifat kimia tanah, kelembapan, pertumbuhan tanaman, hasil panen, penggunaan input, dan biaya produksi. Informasi tersebut dapat digunakan untuk memperbaiki strategi pengelolaan pada musim tanam berikutnya. Apabila respons tanaman belum sesuai dengan harapan, penyesuaian dapat dilakukan berdasarkan faktor pembatas yang ditemukan, bukan semata-mata dengan menambah dosis bahan pembenah tanah atau pupuk.

7.2.4 Keberhasilan Pengembangan Biochar dan Asam Humat

Keberhasilan pengembangan biochar dan asam humat tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan teknologi, tetapi juga oleh kemampuan masyarakat dalam memahami dan menerapkannya. Informasi mengenai karakteristik bahan, manfaat, keterbatasan, dosis, serta teknik aplikasi perlu disampaikan dengan cara yang mudah dipahami dan sesuai dengan kebutuhan pengguna. Penggunaan biochar dan asam humat sebagai pembenah tanah (*soil ameliorant*) memberikan dampak positif signifikan terhadap produktivitas pertanian dan pemulihan kualitas lahan. Berikut adalah penjabaran keberhasilan pengembangannya berdasarkan beberapa parameter utama:

a. Perbaikan Fungsi dan Kualitas Tanah
   Tanah yang dipakai terus menurus untuk proses produksi akan memberikan dampak kemerosotan kualitasnya sehingga kurang optimum dalam menyediakan nutrisi tanah terserap tanaman. Pengunaan biochar dan asam humat sebagai baham pembenah tanah akan memperbaiki dalam berbagai hal, misalnya pada:
   1) Struktur dan Sifat Fisik Tanah: Biochar memiliki void sehingga porositas tinggi yang berfungsi memperbaiki aerasi, drainase, dan kemampuan tanah menahan air (water holding capacity).
   2) Kapasitas Pertukaran Kation (KPK): Asam humat dan biochar meningkatkan KPK tanah secara tinggi, sehingga nutrisi tanah tidak mudah terlindi oleh air hujan atau irigasi.
   3) Reaksi pH: Biochar yang bersifat basa sehingga dapat secara efektif menetralkan tanah asam dan meningkatkan ketersediaan unsur hara makro seperti fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg).
b. Efisiensi Penggunaan Pupuk dan Hasil Panen
   1) Pengurangan Dosis Pupuk Kimia: Kombinasi biochar dan asam humat mampu memperlambat pelepasan hara (slow-release mechanism), sehingga efisiensi pemupukan meningkat 20% hingga 40%.

2) Peningkatan Produktivitas: Peningkatan produksi hasil panen pada tanaman pangan padi, jagung dan tanaman sayuran dapat meningkat hingga 15%–30% dibandingkan dengan tanpa bahan pembenah tanah biochar dan asam humat.

c. Pemulihan Lahan Marjinal dan Tercemar
   1) Rehabilitasi Tanah Rusak: Biochar dan asam humat berhasil diterapkan pada lahan-lahan marginal seperti bekas tambang, tanah pasiran, dan lahan gambut terdegradasi untuk mengembalikan fungsi hayati tanah.
   2) Imobilisasi Logam Berat: Biochar dan asam humat dapat meng-adsorbtion logam berat. Peranan bahan pembenah tanah adalah gugus fungsi aktif pada asam humat dan struktur berpori biochar mampu mengikat logam berat seperti Pb, Cd, dan Cu, sehingga mengurangi penyerapan logam berat yang bersifat racun bagi tanaman.

d. Mitigasi Perubahan Iklim (Sekuestrasi Karbon)
   1) Penyimpanan Karbon Jangka Panjang: Biochar mengandung bentuk karbon yang stabil di dalam tanah bersama mineral tanah hingga 10 sd 20 tahun, dapat menjadikan salah satu teknologi sekuestrasi karbon paling efektif dalam tanah.
   2) Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca: Penggunaan biochar terbukti menekan emisi gas nitrus oksida () dan metana () dari lahan pertanian.

e. Stimulasi Aktivitas Mikrobia Tanah

   Fungsi biochar dan asam humat dalam tanah secara bersamaan atau terpisah memberikan dampak sinergis yang sangat kuat dalam meningkatkan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah: bakteri, fungi, dan actinomycetes.

   Mekanisme biochar dan asam humat dalam mineral tanah dapat menstimulasi aktivitas mikrobio tanah secara hayati sebagai berikut:

   1) Mekanisme Biochar dalam Menstimulasi Organisme Tanah

Biochar adalah arang hayati active berpori hasil pirolisis bahan organic yang kaya lignin. Perannya terhadap mikrobia tanah terutama bersifat fisik dan strukturnya:

- Menyediakan "Habitat bagi mikro-organisme tanah" fungsi void sebagai ruang tempat bagi mikrobia tanah: Biochar memiliki struktur pori (*void*) yang sangat luas. Pori-pori ini menjadi tempat tinggal aman bagi mikrobia tanah dari ancaman predator seperti protozoa dan nematoda serta dari kondisi ekstrem temperature tanah meningkat.
- Retensi Air dan Nutrisi: Rongga bahan biochar berupa banyaknya void dapat meningkatkan kapasitas menahan air (*water holding capacity*) dan mengikat nutrisi (, ,) di area perakaran (rizosfer). Ketersediaan air dan nutrisi yang stabil ini memperpanjang masa aktif mikroba.
- Aerasi dan Porositas Tanah: Penambahan biochar memperbaiki struktur tanah sehingga dapat menurunkan bobot isi tanah, menyediakan pasokan oksigen yang cukup bagi mikro-organisme tanah yang bersifat aerob (memerlukan oksigen) dan meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan perakaran tumbuhan .
- Fasilitator Transfer Elektron: Biochar mengandung gugus fungsional redoks aktif yang berfungsi sebagai perantara transfer elektron (*electron shuttle*), membantu metabolisme respirasi mikrobia pengurai dan bakteri pembawa reaksi redoks tanah.

2) Mekanisme Asam Humat dalam Menstimulasi Mikroba

Asam humat adalah senyawa organik kompleks hasil dekomposisi humifikasi lanjut. Perannya terhadap mikroba terutama bersifat kimiawi dan biokimiawi:

- Sumber Karbon Organik Terlarut: Asam humat menyediakan fraksi karbon organik yang dapat dimanfaatkan langsung oleh

mikroba heterotrof sebagai sumber energi dan bahan bakar metabolisme.

- Stimulasi Biokimia & Enzimatik: Asam humat memicu aktivitas molekuler pada sel mikroba, menstimulasi sintesis protein, respirasi seluler, dan pelepasan enzim ekstraseluler (seperti urease, fosfatase, dan dehidrogenase).
- Meningkatkan Kelarutan Nutrisi (Khelasi): Asam humat mengkelat mikronutrisi esensial seperti Besi (), Seng (), dan Mangan () serta melarutkan Fosfat () yang terikat di tanah. Mikroba membutuhkan hara mikro ini untuk aktivitas enzimatisnya.
- Agen Pendapar pH (Buffering Agent): Asam humat membantu menetralkan pH tanah yang terlalu asam atau basa, menciptakan lingkungan fisiologis yang ideal bagi pertumbuhan sebagian besar populasi mikroba.

3) Efek Sinergis (Kombinasi Biochar + Asam Humat)
Fungsi campuran bahan pembenah tanah berupa biochar dan asam humat memberikan dampak positip saling bersinergi dalam tanah mineral:

Komponen	Biochar	Asam Humat	Hasil Sinergis
Fungsi Utama	Matriks fisik/rumah & retensi	Nutrisi kimiawi & stimulator biokimia	Rumah berfasilitas makanan lengkap
Dampak Mikroba	Kelangsungan hidup jangka panjang	Lonjakan pertumbuhan populasi awal	Populasi mikroba tinggi & stabil
Kapasitas Pertukaran Kation (KPK)	Meningkatkan KPK fisik secara bertahap	Menyediakan KPK kimia tinggi seketika	Memaksimalkan penyerapan hara oleh mikroba & akar

Dampak Utama pada Aktivitas Mikroba Spesifik

- Bakteri Penambat Nitrogen (misal: *Azotobacter, Rhizobium*): Ketersediaan , molibdenum/besi yang dikhelat asam humat, serta habitat biochar meningkatkan laju fiksasi bebas maupun simbiotik.
- Bakteri Pelarut Fosfat (BPF): Kombinasi ini meningkatkan ekskresi asam organik oleh BPF untuk melepaskan ikatan fosfat tanah.
- Mikoriza (Fungi Mikoriza Arbuskular / FMA): Hifa jamur mikoriza dapat tumbuh merambat ke dalam pori-pori biochar, terlindung dari stres lingkungan, serta mendapatkan stimulasi pertumbuhan dari senyawa asam humat.

f. Aplikasi kombinasi biochar dan asam humat pada tanah mineral bekerja secara terpadu untuk memodifikasi ekosistem tanaman secara menyeluruh dan memperbaikan Iklim Mikro (Lingkungan Perakaran & Kanopi Bawah)

Iklim mikro merujuk pada kondisi lingkungan di sekitar perakaran (*rizosfer*) dan permukaan tanah di bawah kanopi tanaman meliputi:

1) Stabilisasi Suhu dan Kelembaban Tanah:
   - Biochar: Memiliki struktur makropori dan mikropori yang sangat luas. Pori-pori ini berfungsi layaknya "spons" yang menyimpan air (*water holding capacity*) dalam jumlah besar dan melepaskannya secara perlahan. Hal ini menjaga kelembaban tanah tetap stabil meskipun cuaca di luar kering.
   - Asam Humat: Meningkatkan agregasi partikel tanah mineral (membentuk struktur remah). Struktur ini menahan penguapan air berlebih dan memperbaiki sifat termal tanah, sehingga fluktuasi suhu tanah ekstrem antara siang dan malam dapat diredam.

2) Perbaikan Aerasi dan Struktur Tanah Mineral:
   - Tanah mineral yang padat sering kali kekurangan oksigen. Biochar meningkatkan porositas total tanah, mempermudah sirkulasi oksigen () ke zona perakaran.
   - Aerasi yang baik mencegah kondisi anaerob yang merusak akar dan memastikan respirasi akar berjalan optimal.

3) Modifikasi pH dan Ketersediaan Kimia Rizosfer:
   Asam humat kaya akan gugus fungsional karboksil dan fenolik yang bertindak sebagai agen pendapar pH (buffering agent). Ini menetralkan tanah mineral yang terlalu asam atau alkalis, menciptakan lingkungan fisiologis mikro yang ideal bagi aktivitas enzimatik dan mikroba menguntungkan.

g. Perbaikan Iklim Makro (Lingkungan Atmosfer & Global)
Iklim makro merujuk pada dampak lingkungan dalam skala luas, termasuk respons atmosfer dan pengurangan jejak karbon.

1) Sekuestrasi Karbon Jangka Panjang (Carbon Sink):
   Biochar mengandung karbon rekalsitran (sangat stabil dan tahan terhadap dekomposisi biologis). Mengaplikasikan biochar ke dalam tanah mineral sama dengan mengunci karbon di dalam tanah selama ratusan hingga ribuan tahun, memindahkannya dari siklus aktif atmosfer ().
2) Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK):
   - Penekanan Emisi Dinitrogen Oksida (): Tanah mineral padat dengan pemupukan nitrogen tinggi sering memicu denitrifikasi anaerobik yang menghasilkan gas (gas rumah kaca yang jauh lebih kuat dari). Aerasi tinggi dari biochar menekan proses anaerobik ini.
   - Retensi Nitrogen oleh Asam Humat: KPK (Kapasitas Pertukaran Kation) yang tinggi dari asam humat mengikat ammonium (NH^+_4), mencegah pencucian (leaching) dan konversi berlebih menjadi gas emisi.

3) Peningkatan Bioma dan Mikroklimat Lokal:
   - Tanaman yang tumbuh subur akibat kondisi tanah yang optimal akan membentuk kanopi daun yang lebih lebat dan sehat.
     1) Kanopi yang luas ini meningkatkan laju evapotranspirasi alami, yang berkontribusi pada pendinginan suhu udara lokal, pembentukan awan, dan pengaturan kelembaban udara regional.

Fungsi dan Manfaat Sinergi antara Biochar & Asam Humat dalam Tanah

Parameter	Peran Biochar	Peran Asam Humat	Hasil Sinergis pada Tanah Mineral
Fisika Tanah	Menyediakan struktur pori & retensi air	Merekatkan agregat tanah	Matriks tanah remah, lembab, & berudara lancar
Kimia & Hara	Menyimpan hara dalam pori-pori	Mengkelat hara mikro & menaikkan KPK	Ketersediaan nutrisi stabil tanpa risiko terbilas
Dampak Iklim	Mengunci karbon () jangka panjang	Efisiensi pupuk & menekan emisi gas	Lingkungan perakaran sejuk & emisi GRK rendah

Sinergi hubungan antara biochar dan asam humat dapat menciptakan kombinasi pembenah tanah (*soil conditioner*) yang sangat baik dan efektif. Biochar berperan sebagai struktur fisik yang stabil, sedangkan asam humat menyediakan reaktivitas kimia dan biologi secara langsung

7.3. PEMBANGUNAN PERTANIAN KEDELAI PADA LAHAN MARGINAL YANG RAMAH LINGKUNGAN UNTUK KETAHANAN PANGAN

Pembangunan pertanian kedelai untuk ketahanan pangan pada lahan marginal menghadapi tantangan berat berupa tingkat kesuburan yang rendah, pH asam, daya simpan air yang buruk, serta risiko erosi hara. Pemanfaatan kombinasi biochar dan asam humat menjadi solusi pembenah tanah (*soil conditioner*) memliki potensi yang positip dalam memperbaiki kualitas tanah dan menyediakan unsur hara tanah yang efektif, ramah lingkungan, dan mendukung ketahanan pangan secara berkelanjutan.

Pembangunan pertanian kedelai yang berkelanjutan memerlukan pendekatan yang mengintegrasikan peningkatan produksi, pemulihan kualitas lahan, efisiensi pemanfaatan sumber daya, dan perlindungan lingkungan. Pemanfaatan lahan marginal merupakan salah satu peluang untuk memperluas kapasitas produksi pangan, tetapi penerapannya perlu mempertimbangkan karakteristik lahan dan fungsi ekologis kawasan. Oleh karena itu, pengembangan kedelai pada lahan marginal sebaiknya tidak hanya berorientasi pada peningkatan hasil panen, tetapi juga pada pemeliharaan kemampuan tanah untuk mendukung kegiatan pertanian dalam jangka panjang.

Penggunaan biochar dan asam humat dapat menjadi bagian dari pendekatan tersebut. Biochar berpotensi memperbaiki kemampuan tanah dalam mempertahankan air dan unsur hara, sedangkan asam humat dapat mendukung proses kimia tanah dan respons fisiologis tanaman. Keduanya dapat diintegrasikan dengan pupuk organik, pupuk hayati, pengelolaan air, dan teknik budidaya yang sesuai dengan kondisi setempat. Namun, penerapan bahan pembenah tanah tetap perlu disesuaikan dengan karakteristik tanah, kualitas bahan, kebutuhan tanaman, dan kemampuan petani. Penggunaan dosis yang sama pada seluruh lokasi tidak selalu menghasilkan respons yang setara.

Manfaat Teknologi yang bersinergi antara Biochar dan asam Humat di Tanah terhadap Ketahanan Pangan & Lingkungan

Parameter	Manfaat Teknologi Sinergi	Dampak terhadap Ketahanan Pangan
Produktivitas Hasil	Meningkatkan jumlah dan bobot biji kedelai per tanaman pada lahan berpotensi rendah.	Membantu pencapaian swasembada kedelai nasional tanpa mengalihfungsikan lahan subur.
Efisiensi Pupuk Kimia	Menekan penggunaan pupuk anorganik (N, P, K) hingga 20–30%.	Mengurangi biaya produksi petani dan ketergantungan pada pupuk bersubsidi.
Sekuestrasi Karbon	Biochar mengunci karbon di dalam tanah secara permanen (ratusan tahun).	Membantu mitigasi perubahan iklim dan penurunan emisi gas rumah kaca.
Pemulihan Lahan	Mengurangi keracunan aluminium (Al) dan merehabilitasi struktur tanah jangka panjang.	Memperluas Area Tanam Baru (ATB) pada lahan bekas tambang atau tanah sub-optimal.

Prinsip pertanian ramah lingkungan juga dapat diterapkan melalui pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber bahan baku biochar. Sekam padi dan biomassa pertanian lainnya memiliki potensi untuk diolah menjadi produk yang bernilai guna apabila tersedia teknologi produksi yang sesuai. Pendekatan tersebut mendukung prinsip ekonomi sirkular karena mengurangi limbah sekaligus menghasilkan bahan yang dapat dimanfaatkan kembali dalam sistem pertanian. Meskipun demikian, proses produksi harus memperhatikan efisiensi energi, pengendalian emisi, keselamatan kerja, dan mutu produk agar manfaat lingkungan yang diharapkan dapat tercapai.

Selain pemanfaatan biochar, pengelolaan pertanian yang berorientasi pada efisiensi sumber daya memerlukan pengaturan air dan nutrisi secara tepat. Pada tanah pasir pantai, air yang bergerak cepat melalui profil tanah dapat mengurangi ketersediaannya bagi tanaman. Oleh karena

itu, penggunaan mulsa, irigasi hemat air, dan pemanenan air hujan dapat dipertimbangkan sesuai dengan kondisi setempat. Pemupukan berimbang juga diperlukan agar unsur hara tersedia sesuai kebutuhan tanaman dan kehilangan hara dapat ditekan. Pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan input sekaligus membantu menjaga kualitas lingkungan.

Pembangunan pertanian yang berkelanjutan juga perlu memperhatikan aspek ekonomi dan sosial. Teknologi yang efektif secara agronomis belum tentu mudah diterapkan apabila biaya bahan, transportasi, tenaga kerja, dan peralatan terlalu tinggi. Oleh karena itu, pengembangan biochar dan asam humat perlu disertai dengan penilaian kelayakan ekonomi serta upaya memperluas akses petani terhadap bahan dan informasi. Pemanfaatan bahan baku lokal, pengembangan unit produksi bersama, dan pendampingan kelompok tani dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan keterjangkauan teknologi.

Dari sisi sosial, pengembangan kedelai pada lahan marginal dapat membuka peluang diversifikasi usaha tani dan memperkuat kegiatan ekonomi masyarakat. Peningkatan produktivitas yang disertai efisiensi biaya berpotensi mendukung pendapatan petani dan keberlanjutan usaha tani. Namun, manfaat tersebut memerlukan dukungan pasar, ketersediaan sarana produksi, akses informasi, dan kelembagaan pertanian yang berfungsi dengan baik. Dengan demikian, pengembangan teknologi perlu ditempatkan sebagai bagian dari sistem pertanian yang melibatkan petani, pemerintah, perguruan tinggi, penyuluh, dan pelaku usaha.

Dalam konteks ketahanan pangan nasional, optimalisasi lahan marginal dapat berkontribusi terhadap peningkatan ketersediaan kedelai domestik. Akan tetapi, peningkatan produksi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menghasilkan panen, melainkan juga oleh kesinambungan produksi, efisiensi distribusi, keterjangkauan harga, dan keberlanjutan sumber daya yang digunakan. Oleh karena itu, pengembangan kedelai pada lahan marginal perlu diintegrasikan dengan strategi pembangunan

pertanian yang lebih luas, termasuk penguatan rantai pasok, pengolahan hasil, dan peningkatan kapasitas petani.

Keberhasilan penerapan pendekatan ini membutuhkan kerja sama antara berbagai pemangku kepentingan. Pemerintah berperan dalam penyusunan kebijakan dan penyediaan dukungan infrastruktur, perguruan tinggi berkontribusi melalui pengembangan teknologi dan diseminasi pengetahuan, sedangkan dunia usaha dapat mendukung penyediaan bahan serta pengembangan pasar. Petani tetap menjadi pelaku utama dalam penerapan teknologi sehingga kebutuhan, pengalaman, dan kemampuan mereka perlu menjadi pertimbangan dalam setiap program pengembangan.

Pertanian berkelanjutan dalam ketahanan pangan yang berorientasi zero waste yang bersifat untuk pelestarian lingkungan memerlukan pendekatan holistik, mulai dari hulu hingga hilir. Strategi utama difokuskan pada pemulihan kualitas lahan, efisiensi sumber daya, peningkatan kesejahteraan petani, dan adopsi teknologi tepat guna. Optimalisasi budidaya kedelai pada lahan marginal merupakan tantangan sekaligus peluang bagi pembangunan pertanian Indonesia. Pendekatan yang mengintegrasikan biochar, asam humat, kasgot, pupuk hayati, serta teknik budidaya yang adaptif menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas tidak harus dicapai melalui eksploitasi sumber daya alam, tetapi dapat diwujudkan melalui inovasi teknologi yang memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya.

Ke depan, keberhasilan strategi ini memerlukan sinergi antara inovasi ilmiah, dukungan kebijakan, investasi teknologi, serta partisipasi aktif petani dan masyarakat. Dengan kolaborasi yang kuat, lahan marginal dapat bertransformasi menjadi sumber produksi pangan yang produktif, berdaya saing, dan ramah lingkungan. Upaya tersebut tidak hanya memperkuat ketahanan pangan nasional, tetapi juga mendukung tercapainya sistem pertanian yang tangguh, inklusif, dan berkelanjutan bagi generasi sekarang maupun generasi yang akan datang.

7.4. Kerangka Strategis untuk Mewujudkan Pembangunan Pertanian Ramah Lingkungan

Strategi Penerapan Biochar dan asam Humat di lahan marginal untuk meningkatkan produksi yang ramah lingkungan dan bersifat berkelanjutan:

Aplikasi Terpadu (Pengayaan Biochar): Biochar tidak dianjurkan diaplikasikan secara tunggal tanpa nutrisi. Campurkan biochar dengan larutan asam humat dan kompos sebelum disebar ke tanah (*aktivasi biochar*).

a. Dosis Optimal: Berikan campuran pada alur tanam atau lubang tanam kedelai untuk efisiensi bahan dan hasil yang maksimal.
b. Integrasi Inokulan: Tambahkan inokulan Bradyrhizobium saat penanaman untuk mempercepat pembentukan bintil akar efektif pada media tanah yang telah diperbaiki

Strategi produksi untuk menjaga ketahanan pangan memerlukan kerangka kerja yang terstruktur agar program yang dirancang tepat sasaran dan memberikan dampak nyata untuk pembangunan ketahanan pangan. Setiap pilar menjadi dasar dalam menentukan jenis kegiatan, arah program, serta intervensi perbaikan yang dibutuhkan

Pilar Utama dan Menentukan Kegiatan Program dan Perbaikan Ketahanan Pangan

Pilar Utama	Fokus Kebijakan & Program	Output yang Diharapkan
Pengelolaan/ Manajemen Tanah	Pemulihan tanah dengan bahan pembenah tanah Biochar dan Asam Humat terdegradasi melalui pupuk organik, pupuk hayati, dan kapur pertanian (liming). Penghentian pemakaian pestisida sintetis berlebihan.	Berat Volume atau Bobot Isi membaik, Struktur tanah membaik, keanekaragaman hayati mikroba meningkat, dan emisi gas rumah kaca menurun.

Pilar Utama	Fokus Kebijakan & Program	Output yang Diharapkan
Efisiensi Irigasi	Pemberian air yang tepat dan Penerapan sistem irigasi hemat air seperti drip irrigation, sprinkler, dan pemanenan air hujan (rainwater harvesting).	Penghematan penggunaan air tanah dan ketahanan panen saat musim kemarau.
Diversifikasi Pangan	Pemanfatan komoditas lokal non-beras (singkong, sagu, jagung, sorgum) serta sistem tanam tumpang sari (intercropping).	Ketergantungan pangan nasional pada beras dan gandum berkurang.
Pengendalian Hama Terpadu (PHT)	Mengutamakan musuh alami, pestisida nabati, dan rotasi tanaman daripada bahan kimia berbahan aktif tinggi.	Ekosistem sawah/kebun lebih seimbang dan produk pangan bebas residu racun.
Penerapan Teknologi Hijau	Mekanisasi berbahan bakar ramah lingkungan, elektrifikasi alat pertanian, dan pemanfaatan smart farming (sensor kelembapan & nutrisi).	Efisiensi biaya produksi dan penurunan jejak karbon sektor pertanian.

Teknik Menggunakan Pilar Ini untuk Evaluasi & Perbaikan Program dalam Ketahanan Pangan yang Ramah Lingkungan meliputi:

a. Diagnosis Masalah: Tentukan pilar mana yang terganggu di suatu wilayah.
b. Penetapan Skala Prioritas: Jika terjadi masalah dalam suatu sektor, adakah keterkaitan dengan sektor lain, maka harus ditentukan terlebih dahulu yang menjadi dasar perbaikannya.
c. Monitoring & Evaluasi: Ukur keberhasilan program berdasarkan indikator pilar masing-masing.

7.4.1 Pengelolaan/Manajemen Tanah

Manajemen atau pengelolaan tanah adalah serangkaian tindakan terencana untuk memelihara, memulihkan, dan meningkatkan kualitas serta produktivitas tanah secara berkelanjutan. Pengelolaan yang baik

memastikan fungsi tanah mulai dari media tumbuh tanaman, penyaring air, hingga penyimpan karbon dapat berjalan optimal tanpa merusak ekosistem.

Pengelolaan tanah menjadi fondasi utama pertanian ramah lingkungan karena tanah merupakan media tumbuh yang menentukan keberhasilan budidaya dan keberlanjutan produksi jangka panjang. Tanah yang terdegradasi akibat pengolahan intensif, penggunaan pupuk kimia berlebihan, dan rendahnya input bahan organik umumnya memiliki struktur yang padat, daya simpan air dan hara yang rendah, serta aktivitas biologi yang menurun. Pemulihan kondisi tersebut dilakukan melalui pemberian bahan pembenah tanah berupa biochar dan asam humat, serta pemanfaatan pupuk organik, pupuk hayati, dan kapur pertanian (liming) untuk memperbaiki kemasaman tanah.

a. Pengelolaan tanah efektif bertumpu pada perbaikan dan pemeliharaan tiga sifat utama tanah:
   1) Pengelolaan Sifat Fisik
      Fokus pada struktur tanah agar akar tanaman memperoleh kecukupan oksigen, menembus tanah dengan mudah, dan mengakses air.
      - Pengolahan Tanah Minimum (Minimum/No-Tillage): Mengurangi pembalikan tanah agar struktur dan rongga alami tidak hancur.
      - Pengaturan Aerasi & Drainase: Membuat saluran pembuangan air agar tanah tidak tergenang (*anaerob*) yang dapat merusak akar.
      - Pengendalian Pemadatan: Membatasi penggunaan alat berat di atas tanah basah untuk menjaga porositas.
   2) Pengelolaan Sifat Kimia
      Fokus pada ketersediaan hara dan tingkat keasaman tanah agar nutrisi dapat diserap optimal oleh tanaman.

- Pengaturan Keasaman (pH): Pemberian kapur pertanian (calcite dan atau dolomit) pada tanah masam atau belerang/ sulfur pada tanah alkalis.
- Peningkatan Kapasitas pertukaran kation (KPK: Menambah bahan pembenah tanah (seperti asam humat atau biochar) agar hara tidak mudah tercuci.
- Manajemen Nutrisi Terpadu: Kombinasi pemupukan anorganik berimbang (N, P, K) dan organik sesuai hasil analisis laboratorium tanah.

3) Pengelolaan Sifat Biologi

Fokus pada kehidupan organisme tanah yang berperan dalam dekomposisi dan daur ulang hara.

- Penambahan Bahan Organik: Pemberian pupuk kandang, komposting, dan sisa panen untuk memberi makan mikroorganisme.
- Konservasi Fauna Tanah: Menghindari pestisida kimia berlebih yang dapat membunuh cacing tanah dan jamur mikoriza.

b. Kendala dan Solusi Pengelolaan Tanah Mengunakan Bahan Pembenah Tanah Biochar

Tantangan Tanah	Penyebab Utama	Strategi / Solusi Pengelolaan
Erosi & Degradasi	Lereng curam, curah hujan tinggi, deforestasi.	Terasering, penanaman tanaman penutup tanah (cover crops), reboisasi.
Keasaman Tinggi & Keracunan Al/Fe	Pelapukan intensif pada lahan Ultisol/Latosol.	Pengapuran (dolomit), aplikasi asam humat untuk mengikat (kelat) aluminium.
Kekeringan / Daya Simpan Air Rendah	Tekstur pasiran, bahan organik sangat rendah.	Aplikasi biochar sebagai "spons" penampung air dan penambahan pupuk organik.

Tantangan Tanah	Penyebab Utama	Strategi / Solusi Pengelolaan
Defisiensi Bahan Organik	Eksploitasi lahan terus-menerus tanpa pengembalian sisa panen.	Praktik mulching (pemulsaan), penanaman pupuk hijau (legume).

c. Tahapan Implementasi Manajemen Tanah di Lapangan
   1) Pemeriksaan & Analisis Uji Tanah:Prasarat utama sebelum menentukan tindakan.
   2) Pengambilan sampel tanah untuk menguji pH, kandungan N-P-K, tingkat bahan organik (C-organik), serta KPK di laboratorium atau menggunakan Perangkat Uji Tanah Lapangan (PUTL).
   3) Perbaikan Dasar (*Soil Conditioning*):Fase remediasi media tumbuh.
   4) Melakukan koreksi pH (pengapuran/pengasaman) dan pengaplikasian pembenah tanah dasar seperti biochar, asam humat, atau kompos untuk memperbaiki struktur dan sifat kimia awal.
   5) Pengolahan & Konservasi Lahan:Penataan fisik area tanam.
   6) Membuat bedengan, alur drainase, serta struktur konservasi erosi (seperti guludan atau terasering pada lahan miring).
   7) Pemupukan Presisi & Penanaman:Manajemen nutrisi berkala.
   8) Pemberian nutrisi berimbang berdasarkan kebutuhan spesifik tanaman dan pola rotasi tanam untuk menjaga keseimbangan hara tanah jangka panjang.
   9) Monitoring & Evaluasi Berkelanjutan:Pemeliharaan kualitas hara.
   10) Pemantauan tingkat kepadatan, kesehatan akar, dan analisis tanah berkala setiap 1–2 musim tanam untuk penyesuaian dosis intervensi.

d. Dampak Pengelolaan Tanah terhadap Berbagai Sektor
   1) Ketahanan Pangan: Meningkatkan indeks pertanaman (IP) dan produktivitas hasil panen pada lahan yang sebelumnya terdegradasi.

2) Ekonomi Petani: Menghemat biaya pembelian pupuk anorganik karena efisiensi penyerapan hara yang lebih tinggi.
3) Lingkungan & Iklim: Tanah yang dikelola dengan bahan organik tinggi berfungsi sebagai penyimpan karbon (carbon sink), menurunkan emisi gas rumah kaca serta mencegah polusi air akibat leaching pupuk.

Biochar bersifat stabil dan berpori sehingga meningkatkan kemampuan tanah menahan air dan hara, sekaligus menyediakan habitat bagi mikroorganisme tanah. Asam humat membantu meningkatkan kapasitas tukar kation, memperbaiki ketersediaan hara, dan merangsang pertumbuhan akar. Pupuk organik menambah pasokan bahan organik tanah, pupuk hayati mendukung aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam siklus hara, dan liming menetralkan kemasaman sehingga hara lebih tersedia bagi tanaman. Pembatasan penggunaan pestisida sintetis secara berlebihan juga diperlukan agar organisme tanah yang bermanfaat, seperti bakteri, jamur, dan cacing tanah, tetap lestari. Rangkaian upaya ini berdampak pada perbaikan berat volume (bobot isi) dan struktur tanah, peningkatan keanekaragaman hayati mikroba, serta penurunan emisi gas rumah kaca dari lahan pertanian.

7.4.2 Efisiensi Irigasi

Efisiensi irigasi merupakan strategi untuk mengoptimalkan penggunaan air dalam kegiatan pertanian, khususnya dalam menghadapi keterbatasan sumber daya air dan perubahan iklim. Penerapannya dilakukan melalui pemberian air sesuai dengan kebutuhan tanaman, kondisi tanah, dan fase pertumbuhan tanaman. Penggunaan sistem irigasi hemat air, seperti irigasi tetes (*drip irrigation*) dan irigasi sprinkler, dapat membantu mengurangi kehilangan air selama proses distribusi dan pemberian air. Selain itu, pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*) dapat dilakukan dengan menampung air hujan untuk dimanfaatkan sebagai sumber air alternatif

bagi kegiatan budidaya. Pengelolaan irigasi yang efisien membantu mengurangi penggunaan air tanah secara berlebihan serta menjaga ketersediaan air untuk kebutuhan pertanian. Pengaturan jadwal dan volume irigasi berdasarkan kebutuhan tanaman juga dapat mengurangi pemborosan air dan menjaga kondisi kelembapan tanah, terutama selama musim kemarau.

7.4.3 Diversifikasi Pangan

Diversifikasi pangan merupakan upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap jenis pangan tertentu dengan mengembangkan pemanfaatan berbagai komoditas pangan lokal. Konsumsi pangan yang didominasi oleh beras dan gandum dapat diseimbangkan melalui pengembangan komoditas nonberas, seperti singkong, sagu, jagung, dan sorgum. Pengembangan komoditas tersebut perlu disesuaikan dengan potensi sumber daya lokal, kondisi agroekosistem, serta kebiasaan konsumsi masyarakat. Diversifikasi juga dapat diterapkan melalui sistem tanam tumpang sari (intercropping), yaitu penanaman dua atau lebih jenis tanaman pada lahan yang sama dalam periode tertentu. Sistem ini memungkinkan pemanfaatan ruang tumbuh, cahaya matahari, air, dan unsur hara secara lebih optimal, bergantung pada kombinasi tanaman yang digunakan. Selain meningkatkan keragaman hasil pertanian, diversifikasi tanaman dapat mengurangi ketergantungan petani terhadap satu komoditas dan membantu menyebarkan risiko kegagalan panen. Pemanfaatan pangan lokal juga mendukung pengembangan sumber pangan alternatif dan memperkuat ketahanan pangan masyarakat. Strategi ini mampu menurunkan ketergantungan pangan nasional pada beras dan gandum serta memperkuat keragaman sumber pangan yang mendukung ketahanan pangan berkelanjutan.

7.4.4 Pengendalian Hama Terpadu (PHT)

Pengendalian Hama Terpadu (PHT) merupakan pendekatan perlindungan tanaman yang mengombinasikan berbagai metode pengendalian dengan mempertimbangkan keseimbangan ekosistem pertanian. Metode yang digunakan meliputi pemanfaatan musuh alami, penggunaan pestisida nabati, rotasi tanaman, serta penerapan teknik budidaya yang dapat menekan perkembangan organisme pengganggu tanaman. Musuh alami, seperti predator dan parasitoid, berperan dalam mengendalikan populasi hama secara biologis. Rotasi tanaman dapat membantu memutus siklus hidup hama dan penyakit tertentu, sedangkan pestisida nabati dapat digunakan sebagai salah satu alternatif pengendalian sesuai dengan jenis organisme pengganggu dan kondisi pertanaman. Penggunaan pestisida sintetis tetap dimungkinkan apabila diperlukan, tetapi harus didasarkan pada hasil pemantauan populasi hama, ambang kendali, serta petunjuk penggunaan yang tepat. Pendekatan ini juga memperhatikan perlindungan organisme bukan sasaran, kesehatan manusia, dan kondisi lingkungan. Penggunaan berbagai metode pengendalian secara terpadu dapat menekan ketergantungan terhadap pestisida sintetis sekaligus mempertahankan keseimbangan ekosistem lahan pertanian.

7.4.5 Penerapan Teknologi Hijau

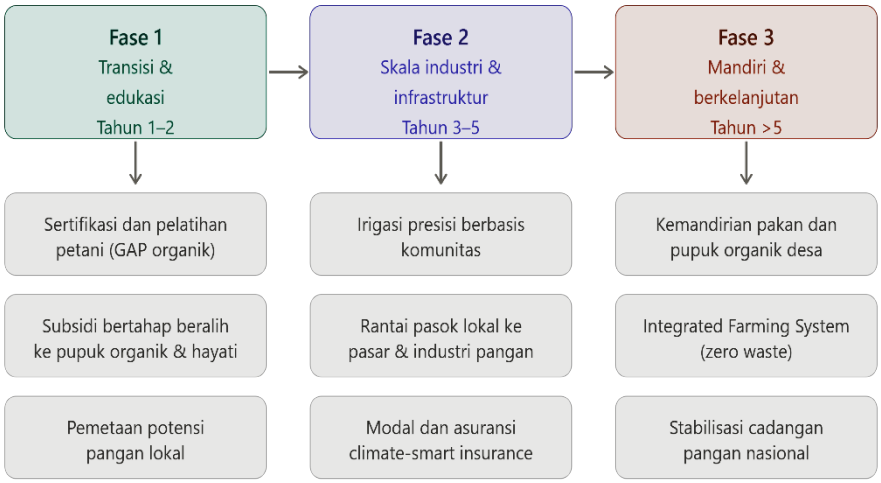
Penerapan teknologi hijau dalam sektor pertanian berfokus pada penggunaan teknologi dan sumber energi yang lebih efisien serta memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah. Strategi ini mencakup penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan, elektrifikasi alat dan mesin pertanian, serta pemanfaatan teknologi pertanian presisi. Elektrifikasi peralatan pertanian dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, terutama apabila sumber listrik berasal dari energi rendah emisi. Sementara itu, penerapan smart farming memungkinkan petani memanfaatkan sensor kelembapan tanah,

suhu, dan unsur hara untuk memantau kondisi lahan serta kebutuhan tanaman secara lebih akurat. Data yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pemberian air, pemupukan, dan pengelolaan tanaman. Teknologi pertanian presisi juga memungkinkan penggunaan input pertanian secara lebih terukur berdasarkan variasi kondisi lahan. Pemanfaatan teknologi tersebut berkaitan dengan efisiensi biaya produksi, pengurangan pemborosan sumber daya, serta pengendalian emisi karbon dari kegiatan pertanian.

7.5. TAHAPAN IMPLEMENTASI JANGKA PANJANG

Pembangunan pertanian ramah lingkungan merupakan transformasi sistem yang menyentuh aspek teknis, sosial, ekonomi, dan kelembagaan sekaligus, sehingga tidak dapat dicapai dalam waktu singkat. Perubahan pola budidaya dari sistem konvensional menuju sistem yang berkelanjutan membutuhkan waktu bagi petani untuk belajar dan beradaptasi, bagi tanah untuk pulih, serta bagi pasar dan infrastruktur untuk berkembang. Penerapan yang tergesa-gesa tanpa perencanaan bertahap berisiko menurunkan produktivitas, membebani petani secara ekonomi, dan pada akhirnya menggagalkan tujuan program itu sendiri.

Oleh karena itu, diperlukan tahapan implementasi jangka panjang yang tersusun secara berurutan, terukur, dan saling menopang. Tahapan ini memberikan arah yang jelas mengenai apa yang harus dikerjakan lebih dahulu, dukungan apa yang perlu disiapkan pada setiap masa, dan capaian apa yang menjadi tolok ukur keberhasilan. Dengan pembagian waktu yang jelas, pemangku kepentingan, mulai dari pemerintah, petani, pelaku usaha, hingga lembaga pendidikan, dapat membagi peran dan menyelaraskan sumber daya secara lebih efektif.



Implementasi dirancang dalam tiga fase. Fase pertama, yaitu transisi dan edukasi pada tahun 1-2, menyiapkan petani dan data dasar potensi daerah sebagai fondasi perubahan. Fase kedua, yaitu skala industri dan infrastruktur pada tahun 3-5, memperluas skala usaha dengan dukungan infrastruktur, akses pasar, dan perlindungan risiko. Fase ketiga, yaitu mandiri dan berkelanjutan pada tahun di atas 5, mewujudkan sistem pertanian yang berdaya secara mandiri, minim limbah, dan mampu menopang ketahanan pangan nasional. Ketiga fase ini diuraikan pada subbab

7.5.1 Fase 1: Transisi & Edukasi (Tahun 1–2)

Sertifikasi dan pelatihan masif bagi petani mengenai praktik pertanian yang baik (*Good Agricultural Practices*/GAP) organik menjadi langkah awal untuk mengubah pola budidaya konvensional menuju sistem organik. Pelatihan mencakup standar budidaya, pengelolaan pupuk dan pengendalian hama berbahan alami, pengelolaan air, penanganan pascapanen, hingga pencatatan kegiatan usaha tani yang rapi. Pencatatan ini penting karena menjadi bukti penelusuran asal produk yang diperiksa oleh lembaga sertifikasi. Pelatihan sebaiknya dilaksanakan dengan

pendekatan praktik langsung di lahan, misalnya melalui sekolah lapang dan demonstrasi plot, agar petani dapat melihat sendiri perbedaan hasil antara cara lama dan cara baru. Sertifikasi memberikan pengakuan formal atas mutu produk organik sehingga petani memiliki posisi tawar yang lebih baik di pasar dan peluang menjual dengan harga yang lebih tinggi. Pelaksanaan secara masif diperlukan agar perubahan praktik terjadi merata, bukan hanya pada kelompok tani tertentu, sehingga manfaatnya dirasakan oleh seluruh lapisan petani, termasuk petani kecil yang selama ini sulit mengakses pendampingan teknis.

Pemberian subsidi terarah yang bertahap digeser dari pupuk kimia ke pupuk organik dan mikroba hayati dimaksudkan untuk meringankan beban biaya petani selama masa peralihan. Pada tahun-tahun awal, hasil panen pada lahan yang baru beralih ke input organik berpotensi lebih rendah karena tanah belum pulih dan populasi mikroorganisme belum terbentuk optimal. Penggeseran secara bertahap menjaga produktivitas tetap stabil karena tanah dan petani membutuhkan waktu beradaptasi terhadap input organik yang respons kesuburannya lebih lambat dibandingkan pupuk kimia. Skema ini juga mencegah guncangan ekonomi akibat penghentian subsidi secara mendadak, yang dapat mendorong petani kembali ke pola lama. Subsidi yang tepat sasaran memastikan bantuan benar-benar diterima oleh petani yang menerapkan praktik ramah lingkungan, dengan dukungan data kepemilikan lahan, luas garapan, dan jenis komoditas yang dibudidayakan. Penyaluran yang transparan dan mudah diawasi turut menjaga kepercayaan petani terhadap program.

Pemetaan potensi pangan lokal di setiap daerah dilakukan untuk mengenali komoditas unggulan, kesesuaian lahan, dan ketersediaan bahan baku pupuk organik di masing-masing wilayah. Setiap daerah memiliki karakteristik tanah, iklim, dan budaya pangan yang berbeda sehingga program yang seragam secara nasional berisiko kurang efektif. Lahan pasir pantai, lahan gambut, lahan kering masam, dan sawah irigasi, misalnya,

menuntut pendekatan pengelolaan yang berbeda satu sama lain. Pemetaan mencakup data jenis tanah, curah hujan, ketersediaan air, produksi limbah pertanian dan peternakan, serta kebiasaan konsumsi masyarakat setempat. Hasil pemetaan menjadi dasar perencanaan program pada fase berikutnya, mulai dari pemilihan komoditas, penentuan lokasi infrastruktur, hingga penyusunan strategi pemasaran yang sesuai dengan potensi daerah. Data yang terkumpul juga berguna sebagai tolok ukur awal untuk menilai kemajuan program pada tahun-tahun selanjutnya.

7.5.2 Fase 2: Skala Industri & Infrastruktur (Tahun 3–5)

Pembangunan infrastruktur irigasi presisi berbasis komunitas memungkinkan pengelolaan air dilakukan secara kolektif, adil, dan efisien. Sistem irigasi presisi seperti tetes dan sprinkler membutuhkan investasi yang sulit dijangkau petani berlahan sempit secara perorangan, baik untuk pengadaan jaringan pipa dan pompa maupun untuk perawatannya. Pengelolaan oleh komunitas, misalnya kelompok tani atau perkumpulan petani pemakai air, membagi biaya pembangunan dan perawatan sekaligus menjamin pembagian air yang merata antaranggota. Aturan jadwal pemakaian, iuran perawatan, dan penunjukan petugas pengelola disepakati bersama agar sistem tetap berfungsi dalam jangka panjang. Sumber air dapat berasal dari sungai, embung, sumur, maupun hasil pemanenan air hujan, yang disalurkan dengan tekanan dan volume sesuai kebutuhan tanaman. Infrastruktur ini menjadi penopang utama peningkatan produktivitas ketika skala usaha mulai diperluas, terutama pada musim kemarau saat ketersediaan air menjadi faktor pembatas.

Penguatan rantai pasok lokal bertujuan menghubungkan petani organik langsung ke pasar modern dan industri pengolahan pangan. Rantai distribusi yang panjang kerap membuat petani menerima bagian harga yang kecil, sedangkan keuntungan lebih banyak diterima oleh pelaku perantara. Hubungan langsung dengan pasar modern dan industri

pengolahan memperpendek rantai tersebut, menstabilkan harga jual, dan memberikan kepastian penyerapan hasil panen. Penguatan ini didukung oleh pembangunan fasilitas pascapanen seperti gudang, pengemasan, dan penyimpanan dingin, serta kemitraan berbasis kontrak antara kelompok tani dan pembeli. Standar mutu, volume, dan jadwal pasokan yang jelas membantu pembeli merencanakan kebutuhan dan membantu petani merencanakan pola tanam. Kepastian pasar mendorong petani untuk mempertahankan praktik organik secara konsisten karena produk yang dihasilkan memiliki jaminan penjualan.

Penyediaan modal dan asuransi pertanian berbasis iklim (climate-smart insurance) menjawab tingginya risiko usaha tani akibat cuaca ekstrem dan perubahan iklim. Kekeringan, banjir, dan serangan hama dapat menyebabkan gagal panen yang menghapus seluruh hasil kerja satu musim tanam. Asuransi berbasis iklim memberikan perlindungan finansial sehingga petani tidak jatuh dalam kerugian besar, sedangkan akses modal memungkinkan petani berinvestasi pada sarana produksi, alat, dan teknologi yang lebih berkelanjutan. Skema asuransi indeks iklim, yang pembayaran klaimnya didasarkan pada data curah hujan atau suhu, mempercepat proses pencairan karena tidak memerlukan penilaian kerugian lahan satu per satu. Pembiayaan dengan bunga rendah dan tenor yang disesuaikan dengan siklus tanam meringankan beban cicilan petani. Kedua dukungan ini menumbuhkan keberanian petani untuk mengembangkan usahanya dan meningkatkan minat lembaga keuangan untuk menyalurkan pembiayaan ke sektor pertanian.

7.5.3 Fase 3: Mandiri & Berkelanjutan (Tahun >5)

Kemandirian pakan dan pupuk organik di tingkat desa atau kecamatan dicapai dengan memanfaatkan sumber daya lokal seperti jerami, sisa panen, dan kotoran ternak yang selama ini kurang termanfaatkan. Bahan-bahan tersebut diolah menjadi kompos, pupuk organik cair, biochar,

maupun pakan fermentasi melalui unit pengolahan yang dikelola oleh kelompok tani atau badan usaha desa. Produksi pakan dan pupuk secara mandiri menurunkan ketergantungan terhadap pasokan dari luar daerah yang harganya berfluktuasi. Biaya produksi dapat ditekan, sedangkan nilai tambah dan perputaran ekonomi tetap berada di wilayah setempat, bahkan membuka lapangan kerja baru di pedesaan. Kemandirian ini juga memperkuat ketahanan masyarakat desa terhadap gangguan pasokan input pertanian, baik akibat kenaikan harga maupun hambatan distribusi.

Integrasi total sektor pertanian dengan peternakan (*Integrated Farming System*) membentuk siklus hara yang tertutup. Limbah tanaman menjadi pakan ternak, sedangkan kotoran ternak diolah menjadi pupuk organik atau biogas yang dikembalikan ke lahan pertanian. Ampas biogas yang tersisa dapat dimanfaatkan sebagai pupuk dengan kandungan hara yang sudah lebih mudah diserap tanaman, sementara gasnya menjadi sumber energi rumah tangga. Setiap keluaran dari satu subsistem menjadi masukan bagi subsistem lainnya sehingga limbah dapat ditekan hingga mendekati nol (*zero waste*). Sistem terpadu ini meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, menambah sumber pendapatan petani dari beragam komoditas, dan mengurangi pencemaran lingkungan yang selama ini timbul dari limbah ternak dan sisa tanaman yang dibuang atau dibakar.

Stabilisasi cadangan pangan nasional dari beragam sumber karbohidrat dan protein lokal memperkuat ketahanan pangan karena pasokan tidak bertumpu pada satu komoditas atau satu wilayah produksi. Gangguan pada satu komoditas, misalnya akibat gagal panen atau lonjakan harga, dapat diimbangi oleh komoditas lain yang tersedia. Ragam sumber karbohidrat seperti singkong, sagu, jagung, dan sorgum, serta protein dari kedelai, ikan, dan ternak, menjadikan cadangan pangan lebih tangguh dan mendukung terpenuhinya kebutuhan gizi masyarakat secara

berkelanjutan. Pengelolaan cadangan yang tersebar di tingkat daerah, melalui lumbung pangan desa dan kabupaten, mempercepat penyaluran saat terjadi bencana atau kelangkaan pasokan. Cadangan yang beragam dan tersebar ini juga mengurangi tekanan terhadap impor pangan serta menjaga stabilitas harga di tingkat konsumen.

Penerapan perencanaan untuk mewujudkan ketahanan yang ramah lingkungan dan bersifat berkelanjutan secara konsisten dapat menjaga produktivitas hasil panen sekaligus merawat daya dukung lingkungan. Tantangan kemandirian pangan merupakan tantangan untuk generasi mendatang dalam ketahanan pangan.

DAFTAR PUSTAKA

Anwar, K., & Alwi, M. (2014). *Ameliorasi dan pemupukan tanaman kedelai di lahan rawa pasang surut*. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Badan Pusat Statistik (BPS). (2025). *Statistik kedelai Indonesia 2025*. Jakarta: BPS.

Brennan, J., & Sheehan, C. (2020). Biochar and soil properties: A critical review. *Soil Use and Management, 36*(3), 368–381. https://doi.org/10.1111/sum.12640

Cahyadi, E. R., & Hidayati, N. (2021). Peramalan dan penentuan target produksi kedelai nasional. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan, 9*(1). https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v9i1.28035

Ende, S., Salawati, S., Kadekoh, I., Fathurrahman, F., Darman, S., & Lukman, L. (2022). Aktivitas nitrat reduktase (ANR) tanaman jagung pada pola tumpangsari yang diberi serasah jagung-kedelai serta biochar di lahan suboptimal Sidondo Sulawesi Tengah. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 27*(4), 528–535. https://doi.org/10.18343/jipi.27.4.544

Faozi, K., Yudono, P., Indradewa, D., & Ma'as, A. (2019). Serapan hara N, P, K dan hasil biji kedelai (*Glycine max* L. Merrill) pada pemberian bokashi pelepah pisang pada tanah pasir pantai. *Vegetalika*. https://doi.org/10.22146/veg.45316

Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. Rome: FAO.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). *Climate-smart agriculture sourcebook*. Rome: FAO.

Harsono, E. S. (2008). *Pengaruh pemberian pupuk kandang dan NPK terhadap pertumbuhan dan produksi kedelai pada tanah pasir pantai Samas Bantul* [Tesis magister, Universitas Gadjah Mada].

Hartatik, W., & Purwani, J. (n.d.). Peningkatan produktivitas kedelai (*Glycine max* L.) pada *Typic Kanhapludults* dengan aplikasi pembenah tanah dan pupuk NPK. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Hartatik, W., Haryati, U., & Irawan. (2023). *Pengelolaan lahan untuk pertanaman kedelai di lahan kering suboptimal*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Hartawan, B., Suharyatun, S., Amien, E. R., & Tusi, A. (2026). Pengaruh dosis penambahan biochar sekam padi pada tanah pasir terhadap infiltrasi dan kemampuan tanah menahan air (*water holding capacity*). *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering, 5*(1), 1–9. https://doi.org/10.23960/jabe.v5i1.12377

Herlambang, S. (2019). *Strategi Pemanfaatan Biochar untuk Pertanian Lahan Terdegradasi*. Yogyakarta: UPN "Veteran" Yogyakarta Press.

Herlambang, S., Budi, S., Rina, S., & Trisetiono. (2023). *The Application of Biochar and Organic Matter for Proper Cultivation on Paddy Soil*. Jurnal Tanah Tropis, 18(3), 89–101.

Herlambang, S., Gomareuzzaman, M., Perwitasari, P., Azalikha, A. S., & Muhardi, W. T. (2026). Biochar and humic acid effects on soil properties and soybean growth in coastal sandy soil. *RSF Conference Series: Engineering and Technology, 5*(1), 175–185. https://doi.org/10.31098/cset.v5i1.1183

Herlambang, S., Purwono, A. Z., Budi, S., Gomareuzzaman, M., & Wibowo, A. W. A. (2023). *Penggunaan Bahan Organik dan Biochar Menuju Good Agricultural Practices*. Jurnal Agronomi Indonesia, 12(4), 210–225.

Herlambang, S., Purwono, A. Z., Gomareuzzaman, M., & Wibowo, A. W. A. 2020. Biochar: Salah Satu Alternatif Untuk Perbaikan Lahan Dan Lingkungan. Yogyakarta: LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta.

Herlambang, S., Yudhiantoro, D., Gomareuzzaman, M., Lestari, I., Wibowo, A. W. A., & Utami, A. (2022). The effect of biochar on root growth in sustainable agriculture. *KnE Life Sciences, 7*(3), 521–530. https://doi.org/10.18502/kls.v7i3.11158

Herlambang, S., Yudhiantoro, D., & Wibowo, A. W. A. 2021. Pemanfaatan Pekarangan Untuk Budidaya Anggur Dengan Media Campuran Biochar. DHARMA: Jurnal Pengabdian Masyarakat, 2(2), 116–125. https://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=3018210&title=PEMANFAATAN+PEKARANGAN+UNTUK+BUDIDAYA+ANGGUR+DENGAN+MEDIA+CAMPURAN+BIOCHAR&val=27268&utm

Herlambang, S., Yudhiantoro, D., Gomareuzzaman, M., Riansyah, D. A., & Kurniawati, I. O. 2025, August. Peranan Briket Biochar untuk Ketahanan Pangan pada Entisol Potorono, Banguntapan, Yogyakarta. In Prosiding Seminar Nasional Fakultas Pertanian UNS (Vol. 9, No. 1). https://proceeding.uns.ac.id/index.php/semnasfp/article/view/998?utm

Hizbi, M. S., & Ghulamahdi, M. (2019). Pertumbuhan dan produksi kedelai hitam dengan pemberian jenis biomassa dan dosis pemupukan kalsium pada budidaya jenuh air di lahan pasang surut. *Buletin Agrohorti, 7*(2), 153–161. https://doi.org/10.29244/agrob.7.2.153-161

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Istiqomah, F. N., Budi, S. W., & Wulandari, A. S. (2017). Peran fungi mikoriza arbuskula (FMA) dan asam humat terhadap pertumbuhan balsa (*Ochroma bicolor* Rowlee.) pada tanah terkontaminasi timbal (Pb). *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, 7*(1), 72–78. https://doi.org/10.29244/jpsl.7.1.72-78

Lagiman, Suryawati, A., & Widayanto, B. (2022). *Budidaya tanaman kedelai di lahan pasir pantai*. LPPM Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta. ISBN 978-623-389-174-5.

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). London: Routledge.

Müller, A., & Aubert, P. M. (2019). Organic agriculture and food security: Pathways towards sustainable food systems. *Global Food Security, 21*, 100–107. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.07.002

Ningrum, S. M., Tohari, T., & Respatie, D. W. (2018). Pengaruh tingkat naungan dan takaran pupuk kandang kambing Etawa terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill) di lahan pasir pantai. *Vegetalika*. https://doi.org/10.22146/veg.34876

Nugroho, N. C., & Caturatmi, A. (2017). Inovasi spesifik lokasi dalam pengembangan lahan pasir pantai sebagai lahan pertanian. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Mewujudkan Kedaulatan Pangan pada Lahan Sub Optimal Melalui Inovasi Teknologi Pertanian Spesifik Lokasi*. Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian.

Nurida, N. L., Dariah, A., & Sutono, S. (2014). Pembenah tanah alternatif untuk meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman kedelai di lahan kering masam. *Jurnal Tanah dan Iklim*. Balai Penelitian Tanah, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 43 Tahun 2019 tentang Penggunaan Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenah Tanah.

Prasetya, A. (2023). Pemanfaatan bioarang pada beragam cekaman air untuk ketersediaan fosforus guna meningkatkan produktivitas kedelai Anjasmoro (*Glycine max* L. Merrill.). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 29*(1), 99–110. https://doi.org/10.18343/jipi.29.1.99

Prayoga, K., & Suryanto, A. (2021). Potensi biochar sekam padi untuk perbaikan sifat tanah dan peningkatan hasil tanaman pangan. *Jurnal Tanah dan Lingkungan, 23*(1), 25–35. https://doi.org/10.29244/jtl.23.1.25-35

Purnamasari, E. T., Yudono, P., & Rogomulyo, R. (2017). Pertumbuhan gulma dan hasil kedelai hitam (*Glycine max* (L.) Merrill) 'Mallika' terhadap pengolahan tanah dan jarak tanam di lahan pasir pantai. *Vegetalika*. https://doi.org/10.22146/veg.24652

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, 16*(2). https://doi.org/10.31315/jta.v16i2.3985

Saptiningsih, E. (2012). Peningkatan produktivitas tanah pasir untuk pertumbuhan tanaman kedelai dengan inokulasi mikorhiza dan *Rhizobium*. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi, 9*(2), 58–61. https://doi.org/10.14710/bioma.9.2.58-61

Saputra, R. R., Purwanti, S., & Rogomulyo, R. (2012). Pengaruh takaran pupuk kascing terhadap pertumbuhan dan hasil dua varietas kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill). *Vegetalika, 1*(1). https://doi.org/10.22146/veg.1388

Setiawan, F., & Setiawan, F. (2019). Pengaruh SP-36 dan asam humat terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman kedelai (*Glycine max* L.). *Jurnal Buana Sains, 19*(2), 1–6. https://doi.org/10.33366/bs.v19i2.1742

Taufiq, A., & Kristiono, A. (2018). Pengelolaan lahan dan pemupukan untuk peningkatan produktivitas kedelai pada lahan suboptimal.

Buletin Palawija. Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2012 tentang Pangan.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York: United Nations.

Utami, S. N. H., Prasetya, A., Rizqi, F. A., Nuraini, Y. W., & Pradani, M. (2023). Pemanfaatan bioarang pada beragam cekaman air untuk ketersediaan fosforus guna meningkatkan produktivitas kedelai Anjasmoro (*Glycine max* L. Merrill.). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 29*(1), 99–110.

World Bank. (2022). *Food security update*. Washington, DC: World Bank.

Yudono, P., Indradewa, D., & Ma'as, A. (2019). Pengelolaan bahan organik dan hara pada budidaya kedelai di lahan pasir pantai. *Vegetalika*. Universitas Gadjah Mada.

GLOSARIUM

Hara	Bermacam-macam mineral yang terdapat di dalam tanah yang dibutuhkan oleh tumbuhan untuk melakukan fotosintesis.
Kapasitas Tukar Ation (KTA)	Kapasitas lempung untuk menjerap dan menukar ation. Proses pertukaran anion berperan penting dalam kaitannya dengan ketersediaan 3 anion hara makro yang diserap tanaman, yaitu nitrat, fosfat, dan sulfat, yang secara alami dihasilkan dari dekomposisi bahan organic dan pelapukan mineral tanah.
Kapasitas pertukaran kation (KPK)	Kapasitas lempung untuk menyerap dan menukar kation. KPK dipengaruhi berbagai faktor, seperti: kandungan liat, tipe liat, dan kandungan bahan organik.
Lahan kering Podsolik Merah Kuning (PMK)	Tanah yang terbentuk karena curah hujan yang tinggi dan suhu yang sangat rendah dan juga merupakan jenis tanah mineral tua yang memiliki warna kekuningan atau kemerahan.
Lahan marginal	Lahan yang rapuh, mudah rusak kelestariannya kalau pengelolaannya tidak tepat.
Pembenah tanah	bahan-bahan sintetis dan/atau alami, organik dan/ atau mineral berbentuk padat dan/atau cair yang mampu memperbaiki sifat fisik, kimia dan/atau biologi tanah.
Soil ameliorant	bahan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas tanah dengan tujuan meningkatkan produksi tanaman
Tanah masam	Tanah dengan pH kurang dari 6,5 (pH rendah). Nilai pH menunjukkan jumlah konsentrasi ion hidrogen (H+) di dalam tanah. Semakin tinggi kadar ion hidrogen di dalam tanah maka semakin rendah nilai pH tanah tersebut dan tanah semakin masam.

TENTANG PENULIS



Prof. Dr. Ir. Susila Herlambang, M.Si menyelesaikan Pendidikan S1 Ilmu Tanah di Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyalarta pada tahun 1989. Sudi S2 diselesaikan selama 2 tahun, beliau memperoleh gelar master pada tahun 1999 dengan bidang Ilmu Tanah di Insitut Pertanian Bogor. Dan untuk gelar doktor diselesaikan selama 3 tahun dan lulus pada 2014 dengan bidang ilmu yang sama di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Beliau dikukuhkan sebagai guru besar dalam bidang Sumber Daya Lahan pada tahun 2025.

Penulis memiliki banyak karya seperti jurnal ilmiah terindek scopus, Jurnal Nasional, prosiding dan banyak buku tentang biochar dan ketahanan pangan serta lahan marginal telah terbit. Buku terakhir oleh penulis berjudul: Biochar untuk mengatasi lahan terdegradai dalam ketahanan pangan tahun2025. Penulis juga memperoleh Hak Kekayaan Intelektual berupa Paten granted tentang Biochar dan energi baru terbarukan sebanyak 3 kali pertama pada tahun 2019 Alat Pembuatan Biochar dengan Sistem Selongsong Putar No. Paten IDS000002403, tahun 2025 Alat Pembuatan Biochar Dengan Sistem Kotak Ganda No. Paten IDS000010321 dan Alat Pembakar Untuk Pembuatan Biochar Sebagai Energi Baru Dan Terbarukan No. Paten IDS000009772 , Di tahun 2017 Beliau juga



mendapatkan penghargaan Satya Lancana Karya Satya 20 Tahun oleh Presiden Republik Indonesia.

Muammar Gomareuzzaman, S.Si. menempuh 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.



Perwitasari, S.T., M.Eng. menempuh Pendidikan S1 Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta dan beliau menyelesaikan pendidikan Magister (S2) di Magister Teknik, Universitas Gadjah Mada. Bergabung menjadi Dosen Jurusan Teknik Kimia UPN "Veteran" Yogyakarta Tahun 2019. Kegiatan yang pernah diikuti adalah seminar nasional dan internasional, menulis publikasi bidang Keahlian: *Process System Engineering* (Sistem Rekayasa Proses).



Amara Seva Azalikha, S.P. menempuh pendidikan S1 Ilmu Tanah di Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta dan menyelesaikan pendidikan pada tahun 2026 dengan predikat sangat memuaskan. Selama masa pendidikan, beliau aktif dalam kegiatan akademik, organisasi, serta berbagai kegiatan laboratorium dan lapangan di bidang ilmu tanah dan lingkungan. Amara juga terlibat dalam project dari Prof. Susila Herlambang, mengenai optimalisasi biochar dan asam humat pada budidaya kedelai di tanah pasir pantai. Memiliki



ketertarikan pada pengelolaan tanah, rehabilitasi lahan, pertanian berkelanjutan, serta isu lingkungan.

Wahyu Tri Muhardi, S.P. menempuh pendidikan S1 Ilmu Tanah di Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta dan menyelesaikan pendidikan pada tahun 2026. Selama masa pendidikan, beliau aktif dalam kegiatan akademik, organisasi, serta berbagai kegiatan di bidang ilmu tanah dan lingkungan. Wahyu terlibat dalam project dari Prof. Susila Herlambang, mengenai optimalisasi biochar dan asam humat pada budidaya kedelai di tanah pasir pantai.