

PENGELOLAAN LAHAN KERING BERKELANJUTAN



TIM PENULIS:

- Basuki
- Jesi Yardani
- Sukriming Sapareng
- Mahmudin
- Baso Daeng
- Zulzain Ilahude



PENGELOLAAN LAHAN KERING BERKELANJUTAN

Basuki
Jesi Yardani
Sukriming Sapareng
Mahmudin
Baso Daeng
Zulzain Ilahude



GET PRESS INDONESIA

PENGELOLAAN LAHAN KERING BERKELANJUTAN

Penulis :

Basuki
Jesi Yardani
Sukriming Sapareng
Mahmudin
Baso Daeng
Zulzain Ilahude

ISBN : 978-634-255-802-7

Editor : Mila Sari, M.Si.

Desain Sampul dan Tata Letak : Yuli Hardina, S.Si.

PENERBIT : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan* ini dapat diselesaikan. Isi buku ini mencakup pembahasan tentang konsep dasar dan ruang lingkup pengelolaan lahan kering, perspektif iklim dan teknik pembersihan lahan, teknologi mulsa dan sistem irigasi hemat air di lahan kering, peranan biota tanah sebagai regulator hara, dampak residu agrokimia terhadap lingkungan berkelanjutan, dan pengelolaan hara dan pertanian ekologi. Akhirnya, semoga buku ini dapat menjadi referensi dan dapat memberikan manfaat serta inspirasi bagi semua pembaca.

Padang, Agustus 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
BAB 1 KONSEP DASAR DAN RUANG LINGKUP	
PENGELOLAAN LAHAN KERING	1
1.1 Definisi, Karakteristik, dan Posisi Lahan Kering	2
1.2 Unsur-Unsur Dasar dalam Sistem Pengelolaan Lahan Kering.....	4
1.3 Tujuan dan Orientasi Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan	5
1.4 Indikator dan Parameter Penilaian Pengelolaan Lahan Kering.....	7
1.5 Kendala Utama pada Lahan Kering	9
1.6 Prinsip Dasar Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan	10
1.7 Ruang Lingkup Pengelolaan Lahan Kering.....	11
1.8 Relevansi Pengelolaan Lahan Kering terhadap Pembangunan Pertanian Berkelanjutan	13
DAFTAR PUSTAKA	16
BAB 2 PERSPEKTIF IKLIM DAN TEKNIK PEMBERSIHAN	
LAHAN	19
2.1 Perspektif Iklim dalam Pengelolaan Lahan Kering	19
2.1.1 Karakteristik Iklim Lahan Kering	21
2.1.2 Pengaruh Iklim terhadap Produktivitas Lahan	24
2.1.3 Adaptasi Pengelolaan Lahan terhadap Iklim.....	26
2.2 Teknik Pembersihan Lahan (<i>Land Clearing</i>) Berkelanjutan	27
2.2.1 Prinsip Gangguan Terhadap Tanah.....	28

2.2.2 Metode Pemberian Lahan	30
2.2.3 Teknik Pembersihan Lahan Berbasis Konservasi	34
2.2.4 Dampak Pembersihan Lahan Terhadap Lingkungan	35
2.3 Integrasi Perspektif Iklim dan Teknik Pembersihan Lahan	36
DAFTAR PUSTAKA	39
BAB 3 TEKNOLOGI MULSA DAN SISTEM IRIGASI HEMAT AIR DI LAHAN KERING	41
3.1 Karakteristik Biofisik Lahan Kering	42
3.2 Neraca Air dan Titik Intervensi Teknologi	43
3.3 Kedudukan dalam Sistem Pertanian Berkelanjutan	44
3.4 Teknologi Mulsa untuk Konservasi Air dan Tanah	45
3.4.1 Konsep dan Klasifikasi Mulsa	45
3.4.2 Mekanisme Kerja Mulsa dalam Menekan Kehilangan Air	46
3.4.3 Mulsa Organik: Jenis, Karakteristik, dan Aplikasi	47
3.4.4 Mulsa Plastik Hitam Perak	49
3.4.5 Pengaruh Mulsa terhadap Sifat Tanah dan Tanaman	50
3.4.6 Teknik Aplikasi pada Berbagai Kondisi Lahan	51
3.5 Sistem Irigasi Hemat Air di Lahan Kering	52
3.5.1 Prinsip Efisiensi Irigasi	52
3.5.2 Sistem Irigasi Tetes	54
3.5.3 Irigasi Curah dan Teknologi Sederhana Berbiaya Rendah	56
3.5.4 Pemanenan Air Hujan dan Bangunan Penyimpan Air	57
3.5.5 Penjadwalan Irigasi dan Irigasi Defisit Terkendali	57
3.6 Integrasi Teknologi Mulsa dan Irigasi Hemat Air	59
3.6.1 Landasan Sinergi	59
3.6.2 Rancangan Sistem Terpadu Menurut Tipologi Lahan	60
3.6.3 Fertigasi dan Indikator Kinerja Sistem	62

3.6.4 Penerapan pada Beberapa Komoditas.....	62
3.7 Tantangan, Strategi Adopsi, dan Prospek Pengembangan....	63
3.7.1 Kendala Teknis, Ekonomi, dan Kelembagaan	64
3.7.2 Isu Lingkungan Mulsa Plastik dan Alternatif Biodegradabel.....	64
3.7.3 Strategi Percepatan Adopsi	65
3.7.4 Prospek Pengembangan	67
DAFTAR PUSTAKA	68
BAB 4 PERANAN BIOTA TANAH SEBAGAI REGULATOR HARA.....	73
4.1 Pengertian dan Klasifikasi Biota Tanah	74
4.2 Peran Biota Tanah dalam Siklus Hara	77
4.3 Biota Tanah sebagai Regulator Nitrogen.....	80
4.4 Biota Tanah sebagai Regulator Fosfor	82
4.5 Peran Biota Tanah dalam Pembentukan Bahan	83
DAFTAR PUSTAKA	86
BAB 5 DAMPAK RESIDU AGROKIMIA TERHADAP LINGKUNGAN BERKELANJUTAN	87
5.1 Konsep dan Klasifikasi Residu Agrokimia dalam Sistem Pertanian.....	87
5.2 Dinamika dan Perilaku Residu Agrokimia dalam Tanah Lahan Kering.....	89
5.3 Dampak Residu Agrokimia terhadap Kualitas Tanah	93
5.4 Dampak terhadap Sumber Daya Air dan Lingkungan Sekitar	96
5.5 Risiko terhadap Kesehatan Tanaman, Hewan, dan Manusia.....	98
5.6 Indikator dan Metode Evaluasi Pencemaran Residu Agrokimia	100
5.7 Strategi Mitigasi dan Pengelolaan Residu menuju Pertanian Berkelanjutan.....	103

DAFTAR PUSTAKA	107
BAB 6 PENGELOLAAN HARA DAN PERTANIAN	
EKOLOGIKAL.....	111
6.1 Dinamika Fisiologis dan Peran Unsur Hara	112
6.2 Interaksi Air dan Ketersediaan Hara	112
6.3 Peran Multidimensi Bahan Organik Tanah	113
6.4 Degradasi Lahan Akibat Erosi dan Malapraktik Budidaya	114
6.5 Rekonseptualisasi Manajemen Hara dan Intervensi Konservasi.....	115
6.6 Implementasi Sistem Agroekologi Terintegrasi.....	116
6.7 Konsep Dasar Pengelolaan Hara.....	116
6.7.1 Klasifikasi Agronomis dan Prinsip Esensialitas Hara..	117
6.7.2 Karakteristik Fisiologis dan Pola Kehilangan Hara Makro	118
6.7.3 Peran Multidimensi Ca, Mg, S, dan Mikroelemen	119
6.7.4 Interaksi Matriks Tanah, Air, dan Mikrobioma	120
6.7.5 Prinsip Keseimbangan Hara.....	120
6.7.5 Aplikasi Taktis pada Sistem Monokultur dan Polikultur.....	121
6.7.6 Investasi Kesuburan Jangka Panjang dan Implementasi 5 Tepat.....	122
6.8 Bahan Organik dalam Pengelolaan Hara	123
6.8.1 Dinamika Fraksi Karbon Tanah dan Implikasi Fungsi Sifat Tanah.....	123
6.8.2 Diversifikasi dan Valuasi Sumber Biomassa Lokal	124
6.8.3 Optimalisasi Pupuk Kandang dan Dinamika Mineralisasi Internal	125
6.8.4 Mekanisme Pelepasan Hara dan Fenomena Imobilisasi.....	125

6.8.5 Peran Pembenah Tanah : Manajemen Tanah Pasiran vs Tanah Liat.....	126
6.8.6 Regulasi pH, Retensi Air, dan Arsitektur Perakaran	127
6.8.7 Stimulasi Indikator Biokimia dan Enzimatis	127
6.8.8 Strategi Implementasi 5 Fungsi Utama di Tingkat Lapangan.....	128
DAFTAR PUSTAKA	132
BIODATA PENULIS	137

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Lahan Kering Wilayah Vulkanik.....	3
Gambar 1. 2 Kerangka Ruang Lingkup Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan.....	4
Gambar 1. 3 Pertumbuhan dan Perkembangan Kacang Tanah di Lahan Kering.....	6
Gambar 1. 4 Ilustrasi Hubungan Antara Meningkatnya Variabilitas Hujan dan Menurunnya Efektivitas Penggunaan Air Tanaman.....	9
Gambar 1. 5 Lahan Kering dengan Pemulsaan	11
Gambar 1. 6 Skema Sederhana Proses Hidrologi Utama yang Menentukan Ketersediaan Air pada Lahan Kering.....	12
Gambar 1. 7 Tanam Padi di Lahan Kering.....	14
Gambar 2. 1Pembersihan Lahan dengan Metode Manual <i>Clearing</i>	31
Gambar 2. 2 Pembersihan Lahan dengan Metode Mekanis	32
Gambar 2. 3 Pembersihan Lahan dengan Metode Mekanis	33
Gambar 2. 4 Pembersihan Lahan dengan Metode Mekanis	34
Gambar 3. 1 Neraca Air Lahan Kering dan Titik Intervensi Teknologi Mulsa Serta Irigasi Hemat Air	44
Gambar 3. 2 Skema Komponen Jaringan Irigasi Tetes Terpadu dengan Lapisan Mulsa.....	54
Organik dan Humus	83
Gambar 5. 1 Dinamika dan Perilaku Residu Agrokimia di Lahan Kering	91
Gambar 5. 2 Strategi Mitigasi dan Pengelolaan Residu Menuju Pertanian Berkelanjutan.....	104
Gambar 6. 1 Peran Bahan Organik Tanah	114
Gambar 6. 2 Dinamika Hara Makro Primer	119
Gambar 6. 3 Implementasi Kesubutan Tanah dengan 5T.....	122
Gambar 6. 4 Lima Fungsi Utama Bahan Organik.....	129

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Dimensi Evaluasi dalam Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan	7
Tabel 3. 1 Karakteristik Beberapa Jenis Mulsa Organik untuk Lahan Kering.....	48
Tabel 3. 2 Perbandingan Karakteristik Beberapa Sistem Irigasi untuk Lahan Kering.....	53
Tabel 3. 3 Alternatif Paket Teknologi Mulsa dan Irigasi Menurut Tipologi Lahan Kering	61
Tabel 3. 4 Kendala Penerapan dan Strategi Percepatan Adopsi	66

BAB 1

KONSEP DASAR DAN RUANG LINGKUP PENGELOLAAN LAHAN KERING

Oleh Basuki

Lahan kering merupakan bentang lahan pertanian yang ketersediaan airnya terutama bergantung pada curah hujan, sehingga dinamika produksi di dalamnya sangat dipengaruhi oleh pola musim, sifat tanah, topografi, dan kemampuan pengelola memanfaatkan air secara efisien. Dalam konteks pertanian berkelanjutan, lahan kering tidak hanya dipahami sebagai ruang budidaya yang menghadapi keterbatasan air, melainkan sebagai ekosistem produksi yang memerlukan pengelolaan terpadu agar fungsi ekonomi, ekologi, dan sosialnya tetap terjaga (Mulyani and Suwanda, 2020; Basuki, Setiawati, *et al.*, 2026).

Istilah pengelolaan lahan kering berkelanjutan merujuk pada seperangkat prinsip, keputusan, dan tindakan teknis yang diarahkan untuk memanfaatkan sumber daya lahan tanpa menurunkan kapasitasnya dalam menopang produksi pada masa mendatang. Pendekatan ini menempatkan tanah, air, tanaman, dan manusia sebagai komponen yang saling berkaitan, sehingga keberhasilan pengelolaan tidak dapat dinilai hanya dari hasil panen sesaat, tetapi juga dari mutu tanah, efisiensi penggunaan air, kestabilan sistem produksi,

dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan iklim (Basuki, Rizaldi, *et al.*, 2026).

Bab ini menyajikan landasan konseptual mengenai lahan kering dan ruang lingkup pengelolaannya sebagai pijakan bagi pembahasan pada bab-bab berikutnya. Uraian difokuskan pada pengertian, karakteristik, unsur-unsur penyusun sistem, tujuan pengelolaan, indikator penilaian, kendala utama, prinsip dasar, serta relevansinya terhadap pembangunan pertanian berkelanjutan.

1.1 Definisi, Karakteristik, dan Posisi Lahan Kering

Secara umum, lahan kering dipahami sebagai lahan yang tidak digenangi secara permanen dan tidak dirancang untuk budidaya sawah, dengan pasokan air tanaman terutama berasal dari hujan. Dengan pengertian tersebut, lahan kering dapat mencakup berbagai bentuk penggunaan lahan, mulai dari tegalan, kebun campuran, padang penggembalaan, hingga kawasan budidaya tanaman tahunan pada daerah beriklim kering sampai sub lembap (Gambar 1.1). Karakter pokok yang membedakannya dari lahan sawah terletak pada ketiadaan genangan terkontrol dan tingginya ketergantungan terhadap neraca air musiman (Sirappa and Titahena, 2015; Basuki, *et al.*, 2023; Basuki *et al.*, 2025).



Gambar 1. 1 Lahan Kering Wilayah Vulkanik

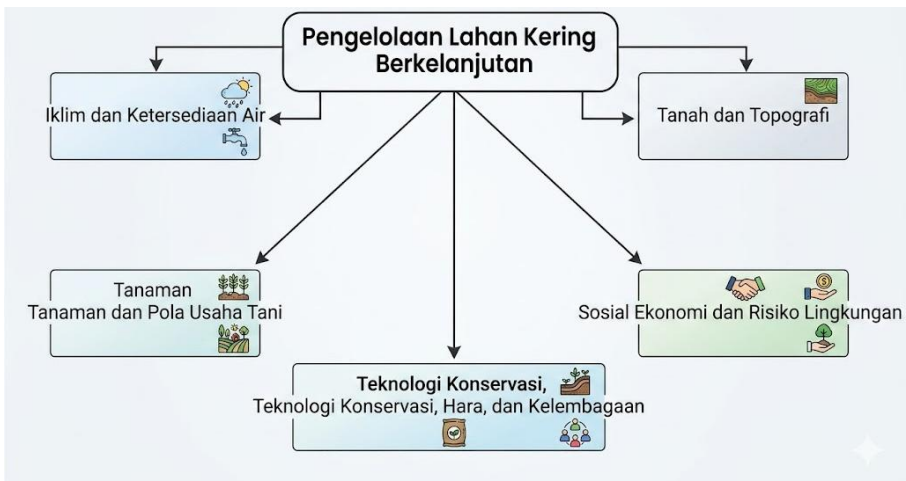
Karakteristik lahan kering tidak bersifat tunggal (Basuki and Sari, 2024). Pada wilayah tertentu, kendala utamanya adalah curah hujan yang rendah dan berfluktuasi; pada wilayah lain justru distribusi hujan yang tidak merata, infiltrasi yang rendah, kemiringan lereng, atau kedalaman efektif tanah yang dangkal. Karena itu, pengelolaan lahan kering harus berbasis lokasi. Setiap keputusan budidaya, seperti waktu tanam, jenis tanaman, intensitas olah tanah, penggunaan mulsa, atau teknik konservasi, perlu ditetapkan dengan mempertimbangkan kombinasi faktor biofisik dan sosial ekonomi setempat.

Posisi lahan kering dalam pembangunan pertanian sangat strategis. Pertama, luas arealnya pada banyak daerah lebih besar dibanding lahan sawah irigasi sehingga berpotensi menopang diversifikasi produksi. Kedua, lahan kering menyediakan ruang pengembangan komoditas pangan, hortikultura, perkebunan, dan pakan ternak. Ketiga,

dalam situasi perubahan iklim dan tekanan konversi lahan, optimalisasi lahan kering menjadi salah satu pilihan penting untuk memperkuat ketahanan pangan sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya alam.

1.2 Unsur-Unsur Dasar dalam Sistem Pengelolaan Lahan Kering

Sistem pengelolaan lahan kering dibangun oleh interaksi lima unsur utama, yakni iklim, tanah, tanaman, teknologi pengelolaan, dan pelaku atau kelembagaan. Iklim menentukan masuknya air ke dalam sistem dan membentuk risiko cekaman kekeringan. Tanah berperan sebagai media tumbuh sekaligus penyimpan air dan hara. Tanaman bertindak sebagai komponen biologis yang mengubah air, hara, dan radiasi menjadi biomassa. Teknologi pengelolaan berfungsi mengatur proses fisik, kimia, dan biologis tersebut agar lebih efisien (Basuki *et al.*, 2021; Basuki *et al.*, 2023). Sementara itu, pelaku dan kelembagaan menentukan apakah teknologi yang tersedia dapat diterapkan secara konsisten.



Gambar 1. 2 Kerangka Ruang Lingkup Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan

Dalam pendekatan sistem, lahan kering perlu dinilai sebagai suatu kesatuan proses (Gambar 1.2). Curah hujan yang jatuh ke permukaan tidak seluruhnya tersedia bagi tanaman. Sebagian hilang sebagai limpasan, sebagian menguap, sebagian tersimpan di dalam tanah, dan sebagian lagi bergerak ke lapisan yang lebih dalam (Dunkerley, 2021; Romshoo *et al.*, 2021; Gizawu Garbaba and Negasa Wolteji, 2024). Karena itu, pengelolaan lahan kering pada dasarnya merupakan seni dan ilmu untuk memperbesar bagian air hujan yang dapat dimanfaatkan tanaman sambil menekan kehilangan melalui limpasan, evaporasi, dan erosi.

Selain aliran air, pengelolaan lahan kering juga terkait erat dengan aliran bahan organik dan unsur hara. Pengolahan tanah yang intensif, pembakaran residu, dan penutupan tanah yang rendah dapat mempercepat kehilangan karbon organik serta menurunkan stabilitas agregat. Sebaliknya, penambahan biomassa, pemulsaan, pengurangan gangguan mekanis, dan penggunaan tanaman penutup dapat memperbaiki kondisi fisik tanah dan memperkuat daya simpan air. Dengan demikian, pengelolaan lahan kering harus memadukan perspektif hidrologi, ekologi tanah, dan ekonomi usahatani.

1.3 Tujuan dan Orientasi Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan

Tujuan pokok pengelolaan lahan kering berkelanjutan adalah menjaga agar produktivitas lahan tetap tinggi atau meningkat tanpa menimbulkan penurunan mutu tanah, air, dan lingkungan (Gambar 1.3). Tujuan ini mengandung dua dimensi sekaligus, yaitu dimensi produksi dan dimensi konservasi. Produksi diperlukan untuk memenuhi kebutuhan pangan, pakan, serat, atau pendapatan petani, sedangkan konservasi dibutuhkan agar kemampuan lahan menopang fungsi tersebut tidak merosot dari waktu ke waktu.



Gambar 1. 3 Pertumbuhan dan Perkembangan Kacang Tanah di Lahan Kering

Dari sisi ekonomi, sistem yang berkelanjutan harus cukup menguntungkan untuk diadopsi secara konsisten. Praktik konservasi yang baik tidak akan bertahan apabila biaya penerapannya jauh melampaui manfaat yang diterima petani. Oleh karena itu, evaluasi pengelolaan lahan kering perlu selalu memadukan efisiensi teknis dengan kelayakan finansial. Teknologi yang sederhana, dapat dijalankan dengan sumber daya lokal, dan sesuai dengan pola kerja rumah tangga tani cenderung lebih mudah diterapkan secara berkelanjutan.

Dari sisi lingkungan, pengelolaan lahan kering harus mampu mengurangi tekanan terhadap ekosistem sekitar. Hal ini mencakup pembatasan pembukaan lahan yang memicu erosi, perlindungan cadangan karbon tanah, pengurangan pencemaran akibat residu agrokimia, serta peningkatan keanekaragaman hayati di dalam dan di sekitar lahan

budidaya. Dengan orientasi tersebut, pengelolaan lahan kering tidak hanya ditujukan untuk meningkatkan hasil, tetapi juga untuk membangun ketahanan agroekosistem.

1.4 Indikator dan Parameter Penilaian Pengelolaan Lahan Kering

Keberhasilan pengelolaan lahan kering berkelanjutan perlu diukur melalui seperangkat indikator yang mencerminkan aspek produktivitas, konservasi, efisiensi, dan daya tahan sistem. Indikator tersebut tidak boleh berdiri sendiri; ia harus diterjemahkan ke dalam parameter pengamatan yang dapat diukur secara lapangan atau laboratorium (Tabel 1.1). Dengan cara ini, evaluasi tidak berhenti pada penilaian normatif, melainkan dapat digunakan untuk pengambilan keputusan teknis.

Tabel 1. 1 Dimensi Evaluasi dalam Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan

Dimensi	Indikator utama	Parameter pengamatan	Makna pengelolaan
Produktivitas	Stabilitas hasil	hasil per hektar, variasi hasil antarmusim, biomassa	menunjukkan kemampuan sistem menghasilkan panen secara konsisten
Air	Efisiensi penggunaan air	kelembapan tanah, infiltrasi, limpasan, produktivitas air	menggambarkan proporsi hujan efektif yang dapat dimanfaatkan tanaman
Tanah	Kualitas tanah	bahan organik, bulk density, agregasi, pH,	menjelaskan daya dukung media tumbuh dan

Dimensi	Indikator utama	Parameter pengamatan	Makna pengelolaan
		kapasitas tukar kation	keberlanjutan fungsi tanah
Konservasi	Risiko degradasi	erosi, tutupan permukaan, residu tanaman, pembentukan kerak	menggambarkan tingkat kehilangan tanah dan kerentanan lahan
Biologi	Aktivitas biota	cacing tanah, respirasi tanah, biomassa mikroba, keragaman hayati	menunjukkan kesehatan biologis dan proses daur hara
Ekonomi	Kelayakan usahatani	B/C ratio, margin kotor, biaya input, produktivitas tenaga kerja	menilai peluang adopsi oleh petani
Sosial	Ketahanan penghidupan	akses sarana produksi, tenaga kerja, kelembagaan, informasi iklim	mengukur kemampuan rumah tangga bertahan terhadap risiko

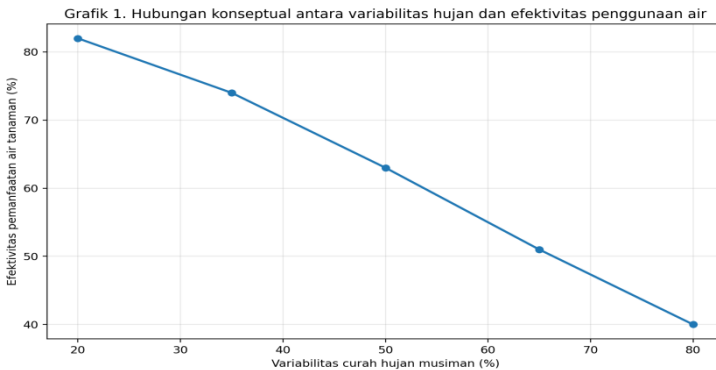
Sumber: Disusun penulis berdasarkan kerangka evaluasi pengelolaan lahan kering.

Pemilihan indikator perlu mempertimbangkan sifat sistem yang dinamis. Sebagai contoh, hasil panen dapat berubah karena variasi hujan tahunan, sehingga interpretasi indikator produktivitas harus dibaca bersama indikator kualitas tanah dan efisiensi penggunaan air. Dalam praktik lapangan, indikator sederhana yang mudah diamati sering

lebih berguna untuk pengambilan keputusan cepat oleh petani.

1.5 Kendala Utama pada Lahan Kering

Kendala pada lahan kering dapat dikelompokkan menjadi kendala biofisik dan kendala sosial ekonomi. Pada aspek biofisik, masalah yang sering muncul ialah curah hujan yang tidak menentu, suhu permukaan tanah yang tinggi, tekstur tanah yang kurang mendukung penyimpanan air, erosi, rendahnya bahan organik, dan keterbatasan ketersediaan hara. Dalam kondisi tertentu, pembentukan kerak permukaan dan pemadatan lapisan olah juga menjadi hambatan serius karena mengurangi infiltrasi dan perkembangan akar (Gambar 1.4).



Gambar 1. 4 Ilustrasi Hubungan Antara Meningkatnya Variabilitas Hujan dan Menurunnya Efektivitas Penggunaan Air Tanaman

Pada aspek sosial ekonomi, kendala yang umum dijumpai meliputi akses benih dan pupuk yang terbatas, modal kerja yang kecil, minimnya alat mekanisasi yang sesuai, lemahnya akses informasi iklim, dan tingginya risiko usaha akibat ketidakpastian musim. Keterbatasan tenaga kerja pada periode tanam dan panen juga dapat menurunkan

peluang keberhasilan penerapan teknologi konservasi, terutama yang menuntut pekerjaan tambahan pada awal musim.

Interaksi antar-kendala tersebut membuat pengelolaan lahan kering memerlukan prioritas tindakan. Pada lahan dengan erosi berat, upaya pertama biasanya diarahkan pada perlindungan permukaan dan pengendalian limpasan. Pada lahan yang kesuburannya rendah, strategi pengembalian bahan organik dan pemupukan berimbang menjadi lebih mendesak. Dengan kata lain, pemecahan masalah pada lahan kering harus bersifat bertahap, terukur, dan disesuaikan dengan kendala dominan.

1.6 Prinsip Dasar Pengelolaan Lahan Kering Berkelanjutan

Terdapat beberapa prinsip dasar yang perlu dijadikan pijakan dalam merancang dan mengevaluasi pengelolaan lahan kering. Prinsip-prinsip tersebut dapat diringkas sebagai berikut:

1. Memaksimalkan hujan efektif melalui peningkatan infiltrasi, pengurangan limpasan, dan penekanan kehilangan air dari permukaan tanah.
2. Melindungi permukaan tanah sepanjang mungkin dengan residu tanaman, mulsa, atau vegetasi penutup untuk menekan erosi dan pemanasan berlebih.
3. Memelihara kesuburan tanah secara terpadu melalui kombinasi bahan organik, pupuk mineral berimbang, dan pengelolaan residu yang mendukung daur hara.
4. Menyesuaikan pilihan komoditas, varietas, dan pola tanam dengan risiko iklim setempat serta kemampuan sumber daya petani.

5. Menempatkan petani sebagai pengambil keputusan utama, sehingga teknologi yang diterapkan harus layak, mudah diadopsi, dan sesuai dengan konteks kelembagaan lokal.

1.7 Ruang Lingkup Pengelolaan Lahan Kering

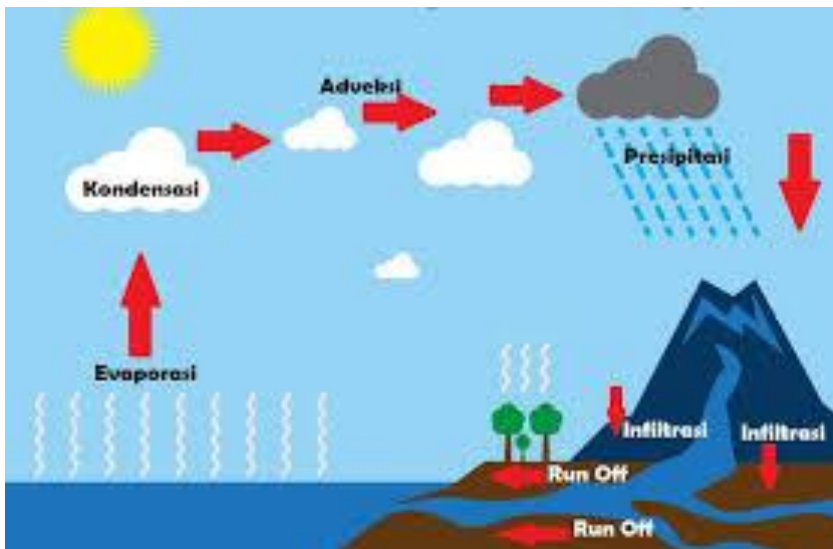
Ruang lingkup pengelolaan lahan kering mencakup seluruh tahapan dari perencanaan sampai evaluasi pascapanen. Pada tahap perencanaan, kegiatan meliputi penilaian kemampuan lahan, identifikasi risiko iklim, pemilihan komoditas, dan penyusunan kalender tanam. Pada tahap implementasi, ruang lingkupnya mencakup pengolahan tanah, penanaman, pengelolaan residu, konservasi air, pemupukan, pengendalian gulma, serta pengendalian organisme pengganggu tanaman (Gambar 1.5).



Gambar 1.5 Lahan Kering dengan Pemulsaan

Pada tingkat petak, ruang lingkup pengelolaan berhubungan dengan teknik budidaya spesifik seperti mulsa, irigasi suplementer, tanpa olah tanah, pergiliran tanaman, tumpangsari, dan penggunaan penutup tanah. Pada tingkat bentang lahan, pengelolaan meliputi pengaturan arah aliran permukaan, pemanfaatan teras atau guludan, perlindungan sempadan, serta integrasi tanaman dengan ternak atau pohon. Pada tingkat kelembagaan, pengelolaan melibatkan layanan penyuluhan, akses pembiayaan, informasi cuaca, serta pasar yang memungkinkan petani mempertahankan praktik budidaya yang lebih ramah lingkungan.

Dengan demikian, pengelolaan lahan kering tidak identik dengan tindakan tunggal seperti irigasi atau pengolahan tanah, melainkan merupakan orkestrasi berbagai keputusan yang saling berhubungan. Ruang lingkup yang luas ini menjelaskan mengapa pendekatan lintas disiplin sangat diperlukan dalam pengembangan teknologi lahan kering.



Gambar 1. 6 Skema Sederhana Proses Hidrologi Utama yang Menentukan Ketersediaan Air pada Lahan Kering

1.8 Relevansi Pengelolaan Lahan Kering terhadap Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Pengelolaan lahan kering menempati posisi penting dalam agenda ketahanan pangan dan pembangunan wilayah. Ketika luas lahan irigasi cenderung stagnan dan tekanan terhadap sumber daya air semakin besar, lahan kering menjadi ruang ekspansi produksi yang paling realistis. Namun, ekspansi tersebut hanya akan bermakna jika dilakukan melalui intensifikasi ekologis, yakni peningkatan hasil yang bertumpu pada efisiensi proses alam dan bukan semata-mata pada penambahan input eksternal.

Dalam perspektif adaptasi iklim, lahan kering merupakan laboratorium penting bagi inovasi pertanian resilien. Berbagai teknologi seperti penyesuaian kalender tanam, varietas toleran kekeringan, pemanenan air hujan, dan penutupan tanah permanen menunjukkan bahwa risiko produksi dapat dikurangi apabila sistem dirancang secara adaptif (Gambar 1.7). Oleh sebab itu, pembahasan lahan kering relevan tidak hanya bagi wilayah kering, tetapi juga bagi wilayah sublembap yang semakin sering mengalami ketidakpastian musim.



Gambar 1. 7 Tanam Padi di Lahan Kering

Dari sisi ekologi, pengelolaan lahan kering berkelanjutan membuka peluang untuk menghubungkan sasaran produksi dengan restorasi kualitas tanah. Tanah yang sehat tidak hanya mendukung hasil tanaman, tetapi juga berperan dalam penyimpanan karbon, regulasi hidrologi, dan pelestarian biota tanah. Dengan demikian, keberhasilan pengelolaan lahan kering memiliki dampak yang melampaui petak budidaya, yakni pada kualitas lingkungan dan keberlanjutan pembangunan pertanian secara keseluruhan.

Lahan kering adalah sistem produksi pertanian yang kompleks, heterogen, dan rentan terhadap fluktuasi iklim, tetapi sekaligus menyimpan peluang besar bagi pengembangan pertanian berkelanjutan. Pemahaman terhadap konsep dasar dan ruang lingkup pengelolaannya merupakan syarat penting untuk merancang intervensi teknis yang tepat guna, efisien, dan adaptif terhadap kondisi lokal.

Secara konseptual, ruang lingkup pengelolaan lahan kering mencakup perencanaan, implementasi, evaluasi, dan penyesuaian berkelanjutan berdasarkan kondisi biofisik serta sosial ekonomi. Dengan landasan ini, pembahasan pada bab-bab selanjutnya dapat diarahkan pada aspek-aspek teknis yang lebih spesifik, seperti pengelolaan air, tanah, tanaman, dan residu dalam kerangka pertanian yang berdaya lenting dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Basuki *et al.* (2021) 'Karakteristik Iklim dan Tanah Vulkanis di Sisi Barat Gunung Api Ijen Jawa Timur Sebagai Dasar Penentu Pengelolaan Varietas Tanaman Padi (*Oriza sativa* L .) Climate Characteristics and Volcanic Soils on The West Side of Mount Ijen , East Java as The Basis', *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 21(2), pp. 108–117.
- Basuki *et al.* (2025) 'Land characterization and management in the marine-volcanic area of Mount Semeru, Indonesia: A case study of sugarcane commodities', *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(3), pp. 7765–7778. doi: 10.15243/jdmlm.2025.123.7765.
- Basuki, B., Rizaldi, Z. F., *et al.* (2026) 'Land Suitability Evaluation for Citrus Cultivation using GIS and AHP for Different Land Units in Indonesia', *Forum Geografi*, 40(1), pp. 73–90. doi: 10.23917/forgeo.14319.
- Basuki, B., Setiawati, T. C., *et al.* (2026) 'Land suitability for chili on the slopes of Mount Raung , Indonesia , towards sustainable agriculture', *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 13(1), pp. 9385–9398. doi: 10.15243/jdmlm.2026.131.9385.
- Basuki, B. and Sari, V. K. (2024) 'Specifications of Sugar Cane Varieties Based on Land Characteristic and Typology', *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 13(1), p. 132. doi: 10.23960/jtep-l.v13i1.132-146.

- Basuki, B., Sari, V. K. and Farisi, O. A. (2023) 'Berdasarkan Karakteristik Iklim Di Lahan Sub Optimal Das Sampian Lereng Gunung Ijen Technology For Structuring Lowland Rice Cropping Patterns Based On Climatic Characteristics In The Sub-Optimal Land Of The Sampian Watershed', *Jurnal Agrotek Tropika*, 11(1), pp. 159–168.
- Basuki Basuki and Fahmi Arief Rahman, Mahyati Mahyati, Iswahyudi Iswahyudi, Andin Muhammad Abduh, Nukhak Nufita Sari, Ronny Mulyawan, Morgan Ohiwal, Nining Haerani, T. T. (2023) *Pengelolaan Tanah Wilayah Vulkanik Berbasis Teknologi*. Yayasan Kita Menulis.
- Dunkerley, D. (2021) 'Rainfall drop arrival rate at the ground: A potentially informative parameter in the experimental study of infiltration, soil erosion, and related land surface processes', *Catena*, 206(November 2020), p. 105552. doi: 10.1016/j.catena.2021.105552.
- Gizawu Garbaba, F. and Negasa Wolteji, B. (2024) 'Application of geospatial technology on land suitability analysis for wheat and maize farming: In a case of Guder sub-watershed North West Oromia, Ethiopia', *Heliyon*, 10(13), p. e33557. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33557.
- Mulyani, A. and Suwanda, M. H. (2020) 'The Management of Upland with Dry Climate for Corn Development in Nusa Tenggara', *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 13(1), p. 41.
- Romshoo, S. A. *et al.* (2021) 'Evaluation of Various DEMs for Quantifying Soil Erosion Under Changing Land Use and Land Cover in the Himalaya', *Frontiers in Earth Science*, 9(December), pp. 1–16. doi: 10.3389/feart.2021.782128.

Sirappa, M. P. and Titahena, M. L. J. (2015) 'Improvement of Suboptimal Land Productivity Approach by Land and Plant Management', *Journal of Tropical Soils*, 19(2), p. 99. doi: 10.5400/jts.2014.v19i2.99-109.

BAB 2

PERSPEKTIF IKLIM DAN TEKNIK PEMBERSIHAN LAHAN

Oleh Jesi Yardani

2.1 Perspektif Iklim dalam Pengelolaan Lahan Kering

Lahan kering merupakan suatu sistem agroekosistem yang sangat dipengaruhi oleh dinamika iklim, terutama curah hujan, suhu udara, radiasi matahari, kelembaban relatif, serta laju evapotranspirasi. Faktor-faktor tersebut berperan langsung dalam menentukan ketersediaan air tanah, pola tanam, serta produktivitas tanaman. Berbeda dengan lahan basah yang memiliki suplai air relatif stabil, lahan kering sangat bergantung pada curah hujan sebagai sumber utama air, sehingga memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap variabilitas iklim (Dariah *et al.*, 2013). Secara umum, lahan kering didefinisikan sebagai lahan yang tidak tergenang dan tidak memiliki sistem irigasi teknis, dengan curah hujan tahunan relatif rendah, yaitu kurang dari 2000 mm per tahun, serta distribusi hujan yang tidak merata sepanjang tahun (Heryani dan Rejekiningrum, 2019). Selain jumlah curah hujan, aspek distribusi temporal (waktu jatuhnya hujan) menjadi faktor yang sangat krusial, karena meskipun total curah hujan cukup, jika distribusinya tidak merata maka tetap dapat menyebabkan defisit air pada fase pertumbuhan tanaman tertentu.

Dari perspektif klimatologi, lahan kering umumnya berada pada wilayah dengan tipe iklim kering hingga semi-kering yang ditandai oleh rasio antara curah hujan dan evapotranspirasi potensial yang rendah. Kondisi ini menyebabkan neraca air tanah sering mengalami defisit, terutama pada musim kemarau, sehingga tanaman mengalami cekaman air (*water stress*) yang berdampak pada penurunan pertumbuhan dan hasil produksi (Soemarno, 2021). Selain itu, suhu udara yang relatif tinggi di wilayah lahan kering berkontribusi terhadap meningkatnya laju evapotranspirasi. Evapotranspirasi merupakan kombinasi dari evaporasi (penguapan air dari permukaan tanah) dan transpirasi (penguapan melalui tanaman). Tingginya laju evapotranspirasi menyebabkan air yang tersedia di dalam tanah cepat hilang, sehingga memperpendek periode ketersediaan air bagi tanaman (Aprisal *et al.*, 2025). Hal ini menjadi salah satu penyebab utama rendahnya efisiensi penggunaan air pada sistem pertanian lahan kering.

Variabilitas iklim juga menjadi karakteristik penting pada lahan kering. Perubahan pola curah hujan yang tidak menentu, pergeseran awal musim hujan, serta meningkatnya frekuensi kejadian ekstrem seperti kekeringan berkepanjangan merupakan tantangan utama dalam pengelolaan lahan kering (Heryani dan Rejekiningrum, 2019). Kondisi ini menuntut adanya strategi adaptasi yang tepat agar kegiatan budidaya tetap dapat berlangsung secara optimal. Dari sisi tanah, kondisi iklim kering berpengaruh terhadap rendahnya kandungan bahan organik tanah. Minimnya input biomassa serta tingginya dekomposisi akibat suhu tinggi menyebabkan tanah menjadi kurang subur dan memiliki kapasitas menahan air yang rendah (Dariah *et al.*, 2013). Akibatnya, tanah pada lahan kering cenderung mudah mengalami degradasi, baik secara fisik, kimia, maupun biologi.

Dalam konteks pengelolaan, pemahaman terhadap karakteristik iklim menjadi dasar utama dalam menentukan strategi pemanfaatan lahan kering. Pendekatan yang dapat dilakukan antara lain melalui penyesuaian kalender tanam berdasarkan pola hujan, penggunaan varietas tanaman yang toleran terhadap kekeringan, serta penerapan teknologi konservasi air seperti pemanenan air hujan dan penggunaan mulsa (Tamelan *et al.*, 2021). Dengan demikian, pengelolaan lahan kering tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi, tetapi juga pada upaya menjaga keberlanjutan sumber daya lahan dalam jangka panjang.

2.1.1 Karakteristik Iklim Lahan Kering

Iklim pada lahan kering memiliki karakteristik khas yang membedakannya dari wilayah lahan basah, terutama dalam hal ketersediaan air dan stabilitas kondisi atmosfer. Karakteristik ini menjadi faktor penentu dalam keberhasilan kegiatan budidaya serta keberlanjutan sistem pertanian. Beberapa ciri utama iklim pada lahan kering dijelaskan sebagai berikut:

1. Curah Hujan Rendah dan Tidak Merata

Curah hujan di wilayah lahan kering umumnya berada pada kisaran rendah hingga sedang, dengan distribusi yang tidak merata sepanjang tahun. Selain jumlah yang terbatas, pola distribusi hujan sering kali terkonsentrasi hanya pada beberapa bulan tertentu, sehingga menyebabkan periode kering yang lebih panjang dibandingkan periode basah. Kondisi ini mengakibatkan neraca air tanah sering mengalami defisit, terutama pada fase pertumbuhan tanaman yang membutuhkan air dalam jumlah cukup (Dariah *et al.*, 2013).

Ketidakmerataan distribusi hujan juga berdampak pada penentuan waktu tanam. Keterlambatan awal musim hujan atau penghentian hujan lebih awal dapat menyebabkan tanaman mengalami kekurangan air pada fase kritis seperti pembungaan dan pengisian biji, yang pada akhirnya menurunkan hasil produksi.

2. Evapotranspirasi Tinggi

Lahan kering umumnya berada pada wilayah dengan intensitas radiasi matahari tinggi dan suhu udara yang relatif panas. Kondisi ini menyebabkan laju evapotranspirasi meningkat secara signifikan. Evapotranspirasi yang tinggi mempercepat hilangnya air dari permukaan tanah (evaporasi) maupun dari jaringan tanaman (transpirasi), sehingga ketersediaan air bagi tanaman menjadi semakin terbatas (Soemarno, 2021).

Selain faktor suhu, kecepatan angin dan rendahnya kelembaban udara juga berkontribusi terhadap tingginya evapotranspirasi. Akibatnya, meskipun terjadi hujan, air yang tersimpan di dalam tanah tidak bertahan lama, sehingga efisiensi penggunaan air menjadi rendah. Hal ini menuntut penerapan teknik konservasi air seperti penggunaan mulsa dan pengolahan tanah minimum.

3. Variabilitas Iklim Tinggi

Salah satu ciri penting lahan kering adalah tingginya variabilitas iklim, baik dalam skala tahunan maupun musiman. Variabilitas ini ditunjukkan oleh fluktuasi curah hujan, perubahan awal dan akhir musim hujan, serta ketidakpastian panjang musim tanam. Dalam beberapa kasus,

fenomena iklim global seperti El Nino dan La Nina turut mempengaruhi pola curah hujan di wilayah lahan kering (Aprisal *et al.*, 2025).

Variabilitas yang tinggi menyebabkan ketidakpastian dalam perencanaan usaha tani, karena petani sulit memprediksi waktu tanam yang optimal. Dampaknya, risiko gagal panen meningkat, terutama jika tidak didukung oleh teknologi adaptasi iklim seperti sistem informasi iklim dan varietas adaptif.

4. Frekuensi Kekeringan Tinggi

Kekeringan merupakan fenomena yang sering terjadi pada lahan kering dan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu kekeringan meteorologis (akibat rendahnya curah hujan), kekeringan hidrologis (berkurangnya cadangan air tanah), dan kekeringan agronomis (ketidakcukupan air bagi tanaman). Ketiga jenis kekeringan ini sering terjadi secara bersamaan dan saling memperkuat dampaknya terhadap sistem pertanian (Dariah *et al.*, 2013).

Frekuensi kekeringan yang tinggi menyebabkan tanaman mengalami cekaman air yang berkepanjangan, sehingga pertumbuhan menjadi terhambat, efisiensi fotosintesis menurun, dan hasil panen tidak optimal. Dalam jangka panjang, kondisi ini juga dapat mempercepat degradasi lahan, seperti pengerasan tanah dan penurunan kandungan bahan organik.

5. Dampak Terhadap Produktivitas dan Degradasi Lahan

Kombinasi dari curah hujan yang rendah, evapotranspirasi tinggi, variabilitas iklim, serta frekuensi kekeringan yang tinggi menyebabkan

produktivitas lahan kering cenderung rendah dan tidak stabil. Selain itu, kondisi ini meningkatkan kerentanan terhadap degradasi lahan, baik melalui erosi, penurunan kesuburan tanah, maupun kerusakan struktur tanah (Soemarno, 2021).

Tanpa pengelolaan yang tepat, lahan kering dapat mengalami penurunan kualitas secara bertahap yang pada akhirnya mengurangi daya dukungnya terhadap kegiatan pertanian. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan berbasis konservasi dan adaptasi iklim untuk menjaga keberlanjutan sistem produksi di lahan kering.

2.1.2 Pengaruh Iklim terhadap Produktivitas Lahan

Iklim merupakan faktor lingkungan utama yang secara langsung mempengaruhi tingkat produktivitas lahan, terutama pada ekosistem lahan kering. Unsur-unsur iklim seperti curah hujan, suhu udara, radiasi matahari, dan kelembaban berperan dalam mengatur ketersediaan air tanah serta menentukan kondisi optimal bagi pertumbuhan tanaman. Dalam sistem pertanian lahan kering, curah hujan menjadi sumber utama air sehingga fluktuasinya sangat menentukan keberhasilan budidaya (Dariah *et al.*, 2013). Ketidaksesuaian antara kebutuhan air tanaman dan ketersediaan air akibat faktor iklim dapat menyebabkan penurunan produktivitas secara signifikan.

Ketersediaan air tanah yang dipengaruhi oleh kondisi iklim memiliki hubungan erat dengan proses fisiologis tanaman, seperti fotosintesis, respirasi, dan penyerapan unsur hara. Ketika terjadi defisit air dalam waktu yang lama, tanaman akan mengalami cekaman air (*water stress*) yang berdampak pada penurunan laju

fotosintesis dan terganggunya pertumbuhan vegetatif maupun generatif. Selain itu, kondisi kekeringan juga menyebabkan stomata tanaman menutup untuk mengurangi kehilangan air, namun hal ini justru menghambat pertukaran gas yang penting bagi proses metabolisme tanaman (Soemarno, 2021).

Selain mempengaruhi tanaman, kondisi iklim juga berpengaruh terhadap aktivitas mikroorganisme tanah. Mikroorganisme berperan penting dalam proses dekomposisi bahan organik dan mineralisasi unsur hara yang dibutuhkan tanaman. Pada kondisi kering, aktivitas mikroba cenderung menurun karena keterbatasan air sebagai medium kehidupan. Akibatnya, proses penyediaan unsur hara menjadi terhambat, sehingga kesuburan tanah menurun dan produktivitas lahan menjadi tidak optimal (Dariah *et al.*, 2013).

Defisit air yang berkepanjangan juga dapat memicu terjadinya degradasi fisik tanah, seperti pengerasan lapisan permukaan dan penurunan stabilitas agregat tanah. Kondisi ini meningkatkan kerentanan terhadap erosi, terutama saat hujan turun dengan intensitas tinggi setelah periode kering. Tanah yang kehilangan struktur alaminya akan lebih mudah terdispersi dan terbawa aliran permukaan, sehingga lapisan topsoil yang subur menjadi hilang. Dampak lanjutan dari proses ini adalah menurunnya kemampuan tanah dalam menyimpan air dan hara (Soemarno, 2021).

Oleh karena itu, pengelolaan air menjadi aspek kunci dalam meningkatkan produktivitas lahan kering. Berbagai teknologi konservasi air telah dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan air, seperti pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*), pembangunan embung, serta pembuatan sumur resapan. Teknologi tersebut terbukti mampu meningkatkan ketersediaan air bagi

tanaman selama musim kering serta memperbaiki neraca air tanah secara keseluruhan (Tamelan *et al.*, 2021). Dengan penerapan teknologi yang tepat, dampak negatif iklim terhadap produktivitas lahan dapat diminimalkan, sehingga sistem pertanian menjadi lebih adaptif dan berkelanjutan.

2.1.3 Adaptasi Pengelolaan Lahan terhadap Iklim

Adaptasi terhadap kondisi iklim pada lahan kering merupakan langkah strategis untuk mengurangi risiko kegagalan produksi akibat keterbatasan air dan tingginya variabilitas iklim. Salah satu pendekatan utama adalah penerapan pengelolaan air terpadu yang mencakup pemanfaatan sumber air secara efisien, konservasi air di dalam tanah, serta penggunaan teknologi seperti irigasi suplemen, pemanenan air hujan, dan embung. Selain itu, pemilihan varietas tanaman yang toleran terhadap kekeringan menjadi faktor penting dalam meningkatkan ketahanan sistem pertanian. Varietas tersebut umumnya memiliki kemampuan adaptasi fisiologis seperti efisiensi penggunaan air yang lebih tinggi dan sistem perakaran yang lebih dalam. Penyesuaian pola tanam berbasis musim juga diperlukan dengan mempertimbangkan awal dan panjang musim hujan, sehingga waktu tanam dapat diselaraskan dengan periode ketersediaan air (Heryani dan Rejekiningrum, 2019).

Upaya adaptasi tidak hanya difokuskan pada tanaman, tetapi juga pada perbaikan kualitas tanah sebagai media tumbuh. Peningkatan kandungan bahan organik tanah menjadi salah satu strategi penting karena bahan organik berperan dalam meningkatkan kapasitas menahan air, memperbaiki struktur tanah, serta mendukung aktivitas mikroorganisme. Penambahan bahan organik dapat dilakukan melalui aplikasi kompos,

pupuk kandang, maupun pemanfaatan sisa tanaman sebagai mulsa. Dengan meningkatnya kemampuan tanah dalam menyimpan air, tanaman dapat bertahan lebih lama pada kondisi kekeringan, sehingga produktivitas lahan dapat lebih stabil meskipun terjadi fluktuasi iklim (Dariah *et al.*, 2013).

Pendekatan yang lebih komprehensif dalam adaptasi pengelolaan lahan kering dikenal dengan konsep *panca kelola lahan*, yang meliputi pengelolaan air, hara, bahan organik, integrasi tanaman-ternak, dan kelembagaan. Integrasi tanaman dan ternak memungkinkan pemanfaatan limbah organik sebagai sumber pupuk alami, sementara aspek kelembagaan berperan dalam mendukung penerapan teknologi dan akses terhadap informasi iklim. Pendekatan ini menekankan sinergi antar komponen sistem pertanian untuk meningkatkan efisiensi sumber daya dan ketahanan terhadap perubahan iklim. Dengan penerapan strategi adaptasi yang terpadu, pengelolaan lahan kering dapat dilakukan secara lebih berkelanjutan dan produktif (Heryani dan Rejekiingrum, 2019).

2.2 Teknik Pembersihan Lahan (*Land Clearing*) Berkelanjutan

Pembersihan lahan (*land clearing*) merupakan tahap awal yang sangat penting dalam kegiatan pengelolaan lahan untuk keperluan pertanian, khususnya pada lahan kering yang umumnya masih ditutupi oleh vegetasi alami seperti semak, rumput, atau sisa tanaman sebelumnya. Tahapan ini bertujuan untuk menyiapkan lahan agar siap diolah dan ditanami, sekaligus mempermudah dalam pengaturan tata letak tanaman dan pengelolaan input produksi. Namun demikian, praktik pembersihan lahan yang tidak memperhatikan aspek konservasi dapat menimbulkan

dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan (Soemarno, 2021).

Kegiatan pembersihan lahan yang dilakukan secara tidak tepat, seperti pembakaran terbuka atau penggunaan alat berat secara berlebihan, dapat menyebabkan hilangnya lapisan tanah atas (*topsoil*) yang kaya akan bahan organik dan unsur hara. Selain itu, tindakan tersebut juga berpotensi merusak struktur tanah, meningkatkan laju erosi, serta menurunkan kapasitas tanah dalam menyimpan air. Dalam jangka panjang, kondisi ini akan berdampak pada menurunnya produktivitas lahan dan meningkatnya risiko degradasi lahan (Dariah *et al.*, 2013).

Oleh karena itu, konsep pembersihan lahan berkelanjutan menjadi sangat penting untuk diterapkan. Pendekatan ini menekankan pada upaya meminimalkan gangguan terhadap ekosistem tanah serta mempertahankan fungsi ekologis lahan. Pembersihan lahan tidak hanya dilihat sebagai kegiatan teknis membuka lahan, tetapi juga sebagai bagian dari sistem pengelolaan sumber daya alam yang harus memperhatikan keseimbangan antara aspek produksi dan konservasi (Aprisal *et al.*, 2025).

2.2.1 Prinsip Gangguan Terhadap Tanah

Pembersihan lahan yang berkelanjutan harus didasarkan pada prinsip-prinsip konservasi tanah dan air, sehingga mampu menjaga kualitas lahan dalam jangka panjang. Beberapa prinsip utama yang perlu diperhatikan dijelaskan sebagai berikut:

1. Minim Gangguan terhadap Tanah

Prinsip ini menekankan bahwa kegiatan pembersihan lahan harus dilakukan dengan cara yang tidak merusak kondisi fisik tanah. Penggunaan alat berat secara berlebihan dapat menyebabkan pemadatan tanah (*soil compaction*) yang

menghambat infiltrasi air dan pertumbuhan akar tanaman. Oleh karena itu, metode pembersihan yang lebih selektif seperti pembersihan manual atau *minimum tillage* lebih dianjurkan, terutama pada lahan dengan kemiringan tertentu (Soemarno, 2021).

2. Konservasi Bahan Organik

Bahan organik merupakan komponen penting dalam menjaga kesuburan tanah, karena berperan dalam meningkatkan kapasitas tukar kation, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air. Dalam praktik pembersihan lahan berkelanjutan, sisa vegetasi tidak dibakar, melainkan dimanfaatkan sebagai mulsa atau bahan kompos. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi kehilangan unsur hara, tetapi juga mendukung aktivitas mikroorganisme tanah (Dariah *et al.*, 2013).

3. Pengendalian Erosi

Pembersihan lahan yang membuka permukaan tanah secara luas tanpa perlindungan dapat meningkatkan risiko erosi, terutama pada lahan miring dan saat terjadi hujan dengan intensitas tinggi. Oleh karena itu, teknik seperti *strip clearing* (pembersihan sebagian area), pembuatan teras, serta penggunaan penutup tanah sangat dianjurkan untuk mengurangi laju aliran permukaan. Pengendalian erosi menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan produktivitas lahan (Aprisal *et al.*, 2025).

4. Tidak Merusak Struktur Tanah

Struktur tanah yang baik ditandai dengan adanya agregat tanah yang stabil dan porositas yang cukup untuk mendukung pergerakan air dan udara. Pembersihan lahan yang tidak tepat dapat merusak agregat tanah dan menyebabkan tanah menjadi padat atau bahkan mudah terdispersi. Oleh karena itu, teknik pembersihan harus mempertahankan struktur alami tanah, misalnya dengan menghindari pembakaran dan meminimalkan pengolahan tanah secara intensif (Soemarno, 2021).

2.2.2 Metode Pemberihan Lahan

Berbagai metode pembersihan lahan dapat diterapkan sesuai dengan kondisi lahan, skala usaha, serta tujuan pengelolaan. Pemilihan metode harus mempertimbangkan aspek efisiensi, dampak lingkungan, dan keberlanjutan sistem pertanian. Berikut beberapa metode yang umum digunakan:

1. Manual *Clearing*

Metode *manual clearing* dilakukan dengan tenaga manusia menggunakan alat sederhana seperti parang, cangkul, atau sabit. Teknik ini biasanya diterapkan pada lahan skala kecil atau pada daerah dengan topografi yang sulit dijangkau alat berat. Keunggulan utama metode ini adalah dampaknya yang relatif kecil terhadap kondisi fisik tanah, sehingga struktur tanah dan organisme di dalamnya tetap terjaga (Soemarno, 2021). Selain itu, metode ini memungkinkan pembersihan secara selektif, misalnya dengan mempertahankan vegetasi tertentu yang berfungsi sebagai penahan erosi. Namun, kelemahannya adalah membutuhkan

waktu lebih lama dan tenaga kerja yang cukup besar.



**Gambar 2. 1Pembersihan Lahan dengan Metode
Manual *Clearing***

(Sumber :

<https://rri.co.id/merauke/regional/576307/pembukaan-lahan-pertanian-seluas-1-hektar-di-seluruh-jajaran-pos>)

2. Mekanis

Metode mekanis menggunakan alat berat seperti traktor, *bulldozer*, atau *excavator* untuk membersihkan vegetasi dalam waktu relatif singkat. Teknik ini sangat efektif untuk pembukaan lahan dalam skala luas dan sering digunakan dalam kegiatan perkebunan atau pertanian intensif. Meskipun efisien dari segi waktu, penggunaan alat berat berpotensi menyebabkan pemadatan tanah (*soil compaction*), kerusakan struktur tanah, serta peningkatan risiko erosi akibat terbukanya permukaan tanah secara luas (Aprisal *et al.*, 2025). Oleh karena itu, penggunaannya perlu dikombinasikan dengan teknik konservasi seperti pengolahan tanah minimum atau penanaman penutup tanah.



Gambar 2. 2 Pembersihan Lahan dengan Metode Mekanis

(Sumber : <https://ditjenbun.pertanian.go.id/pembukaan-lahan-tanpa-membakar-dalam-budidaya-kopi/>)

3. Pembakaran (*Slash and Burn*)

Metode *slash and burn* merupakan teknik tradisional yang dilakukan dengan menebang vegetasi kemudian membakarnya. Cara ini dinilai praktis karena dapat membersihkan lahan dengan cepat dan biaya relatif rendah. Abu hasil pembakaran juga dapat memberikan unsur hara secara sementara. Namun, dampak negatifnya cukup besar, antara lain hilangnya bahan organik tanah, terganggunya kehidupan mikroorganisme, serta meningkatnya emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim (Dariah *et al.*, 2013). Selain itu, praktik ini juga meningkatkan risiko kebakaran lahan yang tidak terkendali. Oleh karena itu, metode ini tidak dianjurkan dalam sistem pertanian berkelanjutan.



Gambar 2. 3 Pembersihan Lahan dengan Metode Mekanis

(Sumber :

<https://rmol.id/nusantara/read/2015/10/05/219753/masyarakat-salah-persepsi-tentang-membakar-lahan>)

4. *Zero Burning Technique*

Teknik *zero burning* merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan pembakaran. Pada metode ini, vegetasi yang telah ditebang tidak dibakar, melainkan dicacah dan dimanfaatkan sebagai mulsa atau bahan kompos di lahan. Pendekatan ini mampu meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur tanah, serta membantu menjaga kelembaban tanah dengan mengurangi evaporasi (Soemarno, 2021). Selain itu, keberadaan mulsa juga dapat menekan pertumbuhan gulma dan mengurangi erosi. Meskipun memerlukan waktu dan pengelolaan yang lebih intensif, metode ini sangat mendukung prinsip pertanian berkelanjutan.



Gambar 2. 4 Pembersihan Lahan dengan Metode Mekanis

(Sumber : <https://bousteadplantations.com.my/zero-burning-a-practice-for-sustainable-future/>)

2.2.3 Teknik Pembersihan Lahan Berbasis Konservasi

Teknik pembersihan lahan berbasis konservasi merupakan pendekatan yang menekankan pada perlindungan tanah dan air selama proses pembukaan lahan. Berbeda dengan metode konvensional yang cenderung membuka lahan secara menyeluruh, pendekatan ini dilakukan secara selektif dengan tetap mempertahankan sebagian vegetasi atau memanfaatkan biomassa hasil pembersihan. Tujuannya adalah untuk menjaga stabilitas tanah, mengurangi kehilangan unsur hara, serta mempertahankan fungsi ekologis lahan dalam jangka panjang (Aprisal *et al.*, 2025).

Salah satu teknik yang umum diterapkan adalah penggunaan mulsa, yaitu pemanfaatan sisa tanaman seperti daun, ranting, dan jerami sebagai penutup permukaan tanah. Mulsa berfungsi untuk mengurangi laju evaporasi, menjaga kelembaban tanah, serta melindungi tanah dari pukulan langsung air hujan yang dapat memicu erosi. Selain itu, seiring proses dekomposisi, mulsa juga berkontribusi dalam meningkatkan kandungan bahan organik dan kesuburan

tanah. Pada lahan kering, teknik ini terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan menjaga ketersediaan air bagi tanaman (Tamelan *et al.*, 2021).

Teknik lain yang banyak digunakan adalah *strip clearing*, yaitu pembersihan lahan secara sebagian atau dalam bentuk jalur tertentu, sementara vegetasi di antara jalur tersebut tetap dipertahankan. Pendekatan ini mampu mengurangi aliran permukaan (*runoff*) dan menahan partikel tanah agar tidak mudah tererosi, terutama pada lahan dengan kemiringan. Selain itu, penerapan sistem agroforestri, yaitu kombinasi tanaman pertanian dengan pohon atau vegetasi permanen, juga menjadi strategi penting dalam konservasi lahan. Sistem ini tidak hanya membantu menjaga struktur tanah dan meningkatkan infiltrasi air, tetapi juga memberikan manfaat tambahan seperti peningkatan keanekaragaman hayati dan sumber pendapatan alternatif bagi petani (Aprisal *et al.*, 2025).

2.2.4 Dampak Pembersihan Lahan Terhadap Lingkungan

Pembersihan lahan yang dilakukan tanpa memperhatikan prinsip konservasi dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu dampak utama adalah meningkatnya risiko erosi tanah akibat hilangnya penutup vegetasi yang berfungsi melindungi permukaan tanah dari energi kinetik air hujan. Tanah yang terbuka menjadi lebih rentan terhadap aliran permukaan (*runoff*), sehingga partikel tanah mudah terangkut dan menyebabkan hilangnya lapisan topsoil yang kaya unsur hara (Soemarno, 2021).

Selain itu, pembersihan lahan yang tidak terkendali juga berkontribusi terhadap penurunan kesuburan tanah. Hilangnya bahan organik akibat pembakaran atau

pembersihan total vegetasi menyebabkan berkurangnya kandungan hara dan aktivitas mikroorganisme tanah. Dampaknya, struktur tanah menjadi kurang stabil, kapasitas menahan air menurun, dan produktivitas lahan cenderung menurun dalam jangka panjang (Dariah *et al.*, 2013).

Dampak lain yang tidak kalah penting adalah hilangnya keanekaragaman hayati, baik flora maupun fauna tanah. Pembersihan lahan secara menyeluruh dapat menghilangkan habitat alami organisme yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem, seperti mikroorganisme, serangga, dan fauna tanah lainnya. Selain itu, perubahan kondisi permukaan lahan juga dapat mempengaruhi mikroklimat, seperti peningkatan suhu permukaan dan penurunan kelembaban udara di sekitar lahan (Soemarno, 2021).

Sebaliknya, penerapan teknik pembersihan lahan yang berkelanjutan mampu meminimalkan dampak negatif tersebut. Pendekatan seperti penggunaan mulsa, pembersihan selektif, dan sistem agroforestri dapat membantu menjaga struktur tanah, mempertahankan kelembaban, serta mendukung keberlangsungan organisme tanah. Dengan demikian, fungsi ekosistem tetap terjaga dan produktivitas lahan dapat ditingkatkan secara berkelanjutan (Dariah *et al.*, 2013).

2.3 Integrasi Perspektif Iklim dan Teknik Pembersihan Lahan

Pengelolaan lahan kering yang berkelanjutan tidak dapat dilakukan secara parsial, melainkan harus mengintegrasikan pemahaman terhadap kondisi iklim dengan teknik pengelolaan lahan, termasuk proses pembersihan lahan. Faktor iklim seperti curah hujan yang

terbatas, tingginya evapotranspirasi, serta ketidakpastian musim sangat menentukan keberhasilan kegiatan pembukaan dan pengolahan lahan. Oleh karena itu, setiap teknik pembersihan lahan perlu disesuaikan dengan karakteristik iklim setempat agar tidak memperparah kehilangan air tanah maupun degradasi lahan (Heryani dan Rejekiningrum, 2019).

Integrasi ini menjadi penting karena pembersihan lahan yang tidak mempertimbangkan kondisi iklim dapat mempercepat penguapan air dan meningkatkan kerentanan tanah terhadap erosi. Sebaliknya, pendekatan yang selaras dengan kondisi iklim dapat membantu mempertahankan keseimbangan neraca air tanah. Misalnya, pada wilayah dengan curah hujan rendah, pembukaan lahan secara bertahap dan tidak total lebih dianjurkan untuk menjaga sebagian penutup lahan yang berfungsi sebagai pelindung alami terhadap penguapan dan aliran permukaan.

Salah satu bentuk integrasi yang paling efektif adalah pemanfaatan biomassa hasil pembersihan lahan sebagai mulsa di permukaan tanah. Residu tanaman yang dibiarkan menutupi tanah mampu menurunkan suhu permukaan, mengurangi laju evaporasi, serta meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Selain itu, proses dekomposisi mulsa juga memberikan kontribusi terhadap penambahan bahan organik tanah, yang pada akhirnya memperbaiki struktur dan kesuburan tanah (Tamelan *et al.*, 2021).

Lebih lanjut, integrasi perspektif iklim dan teknik pembersihan lahan juga mendukung peningkatan efisiensi penggunaan air (*water use efficiency*) dalam sistem pertanian lahan kering. Dengan mempertahankan kelembaban tanah lebih lama, tanaman dapat tumbuh lebih stabil meskipun terjadi fluktuasi curah hujan. Hal ini juga mengurangi risiko stres air pada fase kritis pertumbuhan tanaman, sehingga produktivitas dapat lebih terjaga.

Secara keseluruhan, pendekatan terpadu ini menekankan bahwa pembersihan lahan bukan hanya aktivitas teknis awal dalam budidaya, tetapi juga bagian dari strategi adaptasi terhadap kondisi iklim. Dengan menggabungkan prinsip konservasi dan pemahaman iklim, pengelolaan lahan kering dapat dilakukan secara lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprisal, A., Satria, B., dan Yulnafatmawita (2025) *Manajemen Lahan Kering*. Padang: Universitas Andalas Press.
- Dariah, A., Subiksa, I.G.M. dan Sutono (2013) *Sistem Pengelolaan Tanah pada Lahan Kering Beriklim Kering*. Jakarta: IAARD Press.
- Heryani, N. dan Rejekiningrum, P. (2019) 'Pengembangan pertanian lahan kering iklim kering melalui implementasi panca kelola lahan', *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 13(2), pp. 65–78.
- Soemarno (2021) *Pengelolaan Lahan Kering untuk Pertanian Berkelanjutan*. Malang: Selaras Media.
- Tamelan, P.G., Kapa, M.M.J. dan Harijono (2021) 'Peranan keairan lahan kering pada kawasan konservasi resapan', *Jurnal Teknologi*, 15(2), pp. 21–30.
- Direktorat Jenderal Perkebunan (2022) 'Pembukaan lahan tanpa membakar dalam budidaya kopi', tersedia pada: <https://ditjenbun.pertanian.go.id> (Diakses: 14 April 2026).
- Radio Republik Indonesia (2024) 'Pembukaan lahan pertanian seluas 1 hektar', tersedia pada: <https://rri.co.id> (Diakses: 14 April 2026).
- RMOL (2015) 'Masyarakat salah persepsi tentang membakar lahan', tersedia pada: <https://rmol.id> (Diakses: 14 April 2026).
- Boustead Plantations (2020) 'Zero burning: A practice for sustainable future', tersedia pada: <https://bousteadplantations.com.my> (Diakses: 14 April 2026).

BAB 3

TEKNOLOGI MULSA DAN SISTEM IRIGASI HEMAT AIR DI LAHAN KERING

Oleh Sukriming Sapareng

Lahan kering merupakan tumpuan utama perluasan areal pertanian di Indonesia sekaligus wilayah yang paling rentan terhadap penurunan produktivitas. Secara agronomis, lahan kering adalah hamparan lahan yang pengelolaan tanamannya sepenuhnya bergantung pada curah hujan tanpa dukungan jaringan irigasi teknis. Akibatnya, ketersediaan air mengikuti pola sebaran hujan yang seringkali tidak selaras dengan kebutuhan tanaman. Pada musim hujan air berlebih dan sebagian besar hilang sebagai aliran permukaan, sedangkan pada musim kemarau tanaman mengalami cekaman kekeringan. Ketimpangan temporal inilah yang menjadikan air sebagai faktor pembatas paling menentukan pada sistem produksi lahan kering (Mulyani & Sarwani, 2013; Sapareng, 2026c).

Perubahan iklim memperberat persoalan tersebut melalui pergeseran awal musim hujan, meningkatnya frekuensi hari kering beruntun, dan naiknya suhu udara yang memperbesar laju evapotranspirasi (Rockstrom *et al.*, 2010). Peningkatan produktivitas lahan kering karena itu tidak dapat lagi bertumpu semata pada perbaikan kesuburan tanah

atau penggunaan varietas unggul, melainkan harus dimulai dari pengelolaan air secara cermat, yaitu memperlakukan setiap milimeter air hujan sebagai sumber daya bernilai tinggi yang harus dipanen, disimpan, dan dialokasikan secara efisien ke zona perakaran.

Dua kelompok teknologi paling relevan menjawab persoalan tersebut adalah teknologi mulsa dan sistem irigasi hemat air. Keduanya bekerja pada sisi yang berbeda dari neraca air: mulsa menekan kehilangan air melalui penekanan evaporasi permukaan dan aliran permukaan, sedangkan irigasi hemat air mengatur penambahan dan penempatan air secara tepat sasaran. Ketika dipadukan, keduanya menghasilkan efek sinergis yang tidak dapat dicapai apabila diterapkan secara terpisah.

3.1 Karakteristik Biofisik Lahan Kering

Sebagian besar lahan kering di Indonesia berada pada wilayah berlereng, sehingga aliran permukaan berlangsung cepat dan air hujan hanya memiliki waktu singkat untuk berinfiltrasi. Solum tanah pada banyak lokasi dangkal akibat erosi menahun sehingga volume tanah sebagai media simpan air terbatas. Pengolahan tanah yang intensif dan pembakaran sisa tanaman memperburuk keadaan melalui pemadatan lapisan bawah dan pembentukan lapisan kedap yang menghambat perkembangan akar sekaligus menurunkan laju infiltrasi (Arsyad, 2010).

Dari sisi kimia, tanah lahan kering umumnya bereaksi masam dengan kejenuhan basa rendah, kandungan bahan organik rendah, dan ketersediaan fosfor terbatas akibat fiksasi oleh aluminium dan besi. Rendahnya bahan organik berimplikasi langsung pada lemahnya daya simpan air, karena bahan organik berperan sebagai penyusun agregat stabil sekaligus koloid pengikat air. Pemulihan kandungan

bahan organik menjadi pintu masuk utama perbaikan status lengas tanah pada lahan kering (Brady & Weil, 2017; Sapareng, 2026b).

3.2 Neraca Air dan Titik Intervensi Teknologi

Pengelolaan air lahan kering paling mudah dipahami melalui kerangka neraca air. Masukan berasal dari curah hujan dan irigasi, sedangkan keluaran terbagi ke dalam aliran permukaan, evaporasi permukaan tanah, transpirasi tanaman, dan perkolasi ke lapisan yang lebih dalam. Dari empat jalur keluaran tersebut, hanya transpirasi yang merupakan penggunaan air produktif karena berhubungan langsung dengan fotosintesis dan pembentukan biomassa. Tiga jalur lainnya tergolong kehilangan tidak produktif (Hillel, 2004). Pada lahan tanpa penutup tanah, evaporasi permukaan menyerap porsi sangat besar, khususnya pada fase awal ketika tajuk belum menutup permukaan lahan.

Kerangka tersebut sekaligus menunjukkan titik intervensi yang tersedia. Mulsa bekerja menekan evaporasi dan aliran permukaan sekaligus meningkatkan infiltrasi, sementara irigasi hemat air menakar volume masukan sesuai kebutuhan aktual tanaman dan menempatkannya langsung pada zona perakaran. Muara keduanya adalah peningkatan efisiensi penggunaan air, yaitu rasio antara hasil yang diperoleh dengan jumlah air yang digunakan (Hatfield *et al.*, 2001). Hubungan antarunsur tersebut disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Neraca Air Lahan Kering dan Titik Intervensi Teknologi Mulsa Serta Irigasi Hemat Air

(Sumber: Penulis, berdasarkan konsep neraca air Hillel, 2004)

3.3 Kedudukan dalam Sistem Pertanian Berkelanjutan

Kedua teknologi ini merupakan bagian dari sistem pertanian berkelanjutan yang menuntut keseimbangan antara produktivitas, kelestarian sumber daya, dan kelayakan ekonomi. Pada dimensi produktivitas, keduanya menjamin ketersediaan air pada fase kritis sehingga potensi genetik varietas dapat terekspresikan. Pada dimensi kelestarian, mulsa organik mengembalikan karbon ke dalam tanah dan menekan erosi, sedangkan irigasi hemat air mengurangi tekanan terhadap sumber daya air. Pada dimensi ekonomi, keduanya menurunkan biaya produksi per satuan hasil

melalui penghematan tenaga penyiangan, pupuk, dan energi pemompaan (Abdurachman *et al.*, 2008; Sapareng, 2026c).

Penerapannya tetap menuntut kehati-hatian. Mulsa plastik yang tidak dikelola dengan baik meninggalkan residu serpihan yang bertahan puluhan tahun di dalam tanah, sementara pemanfaatan air tanah tanpa perhitungan neraca air wilayah dapat memicu penurunan muka air tanah.

3.4 Teknologi Mulsa untuk Konservasi Air dan Tanah

Mulsa adalah setiap bahan yang dihamparkan di atas permukaan tanah untuk melindungi permukaan tersebut dari pengaruh langsung radiasi matahari, pukulan butiran hujan, dan aliran udara. Praktik ini telah lama dikenal petani tradisional, dan ilmu agronomi kemudian memberikan penjelasan ilmiah atasnya sekaligus memperluas cakupannya dengan bahan sintetis (Lal, 1975; Sapareng, 2025b).

3.4.1 Konsep dan Klasifikasi Mulsa

Berdasarkan asal bahannya, mulsa dikelompokkan menjadi mulsa organik dan mulsa anorganik. Mulsa organik berasal dari bahan hayati yang dapat terdekomposisi, seperti jerami padi, batang dan daun jagung, sekam padi, serbuk gergaji, tandan kosong dan pelepah kelapa sawit, alang-alang, serta hasil pangkasan tanaman penutup tanah. Mulsa anorganik meliputi lembaran plastik polietilena berbagai warna, geotekstil, kerikil, dan batuan lepas. Di antara keduanya berkembang kategori antara berupa mulsa plastik biodegradabel berbahan dasar pati atau polimer asam polilaktat (Kader *et al.*, 2017).

Klasifikasi lain membedakan mulsa hidup, yaitu tanaman penutup tanah dari famili Leguminosae yang

ditanam di antara tanaman utama sehingga sekaligus mengikat nitrogen, dengan mulsa mati berupa bahan tak hidup yang dihamparkan di permukaan. Pada lahan berlereng dikenal pula mulsa vertikal, yaitu penempatan bahan organik ke dalam rorak yang dibuat memotong lereng untuk memperlambat aliran permukaan dan meningkatkan infiltrasi.

3.4.2 Mekanisme Kerja Mulsa dalam Menekan Kehilangan Air

Mekanisme pertama adalah pemutusan hubungan langsung antara permukaan tanah dengan atmosfer. Lapisan mulsa menghambat difusi uap air dari pori tanah ke udara bebas, memantulkan sebagian radiasi matahari sehingga energi untuk penguapan berkurang, serta membentuk lapisan udara lembap yang relatif stagnan di bawahnya. Mekanisme kedua adalah pemutusan pipa kapiler. Pada tanah tanpa penutup, air bergerak ke atas melalui pori kapiler menuju permukaan yang kering lalu menguap; lapisan mulsa organik yang berpori besar tidak memiliki kesinambungan kapiler dengan tanah di bawahnya, sehingga pergerakan air ke atas terhenti pada batas antara tanah dan mulsa (Hillel, 2004).

Mekanisme ketiga adalah pengurangan aliran permukaan dan peningkatan infiltrasi. Butiran hujan yang jatuh pada tanah terbuka menghancurkan agregat, dan partikel halus hasil penghancuran tersebut menyumbat pori permukaan serta membentuk lapisan kerak yang menurunkan laju infiltrasi. Mulsa meredam energi kinetik butiran hujan sehingga agregat tetap utuh dan pori permukaan tetap terbuka, sekaligus memperbesar kekasaran permukaan yang memperlambat kecepatan aliran pada lahan berlereng (Arsyad, 2010).

Mekanisme keempat adalah penekanan transpirasi gulma yang merupakan pesaing langsung tanaman dalam pemanfaatan air tanah. Lapisan mulsa yang cukup tebal menghalangi penetrasi cahaya sehingga perkecambahan biji gulma terhambat dan air yang tersimpan lebih terjamin ketersediaannya bagi tanaman utama (Chalker-Scott, 2007; Sapareng, 2025a).

3.4.3 Mulsa Organik: Jenis, Karakteristik, dan Aplikasi

Keunggulan mulsa organik yang tidak dimiliki mulsa sintetis adalah kemampuannya bertransformasi menjadi bahan organik tanah setelah masa pemulsaan berakhir. Dekomposisinya menyumbang karbon organik, meningkatkan aktivitas biota tanah, memperbaiki agregasi, dan melepaskan hara secara perlahan, sehingga mulsa organik menjalankan fungsi konservasi air jangka pendek sekaligus perbaikan kesuburan tanah jangka panjang. Karakteristik beberapa jenisnya disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Karakteristik Beberapa Jenis Mulsa Organik untuk Lahan Kering

Jenis bahan	C/N	Laju urai	Dosis (t/ha)	Keunggulan utama
Jerami padi	60-90	Sedang	5-10	Mudah diperoleh dan murah
Batang/dau n jagung	50-80	Sedang	6-12	Penutupan tebal dan tahan lama
Sekam padi	70-110	Lambat	5-8	Awet, memperbaiki aerasi tanah
Tandan kosong sawit	45-70	Lambat	20-40	Kaya kalium dan sangat awet
Alang-alang kering	60-90	Sedang	5-10	Melimpah pada lahan terlantar
Serbuk gergaji	200-500	Sangat lambat	3-6	Awet, untuk tanaman tahunan
Pangkasan legum	15-25	Cepat	5-15	Sekaligus menyumbang nitrogen

Sumber: Dirangkum dari Lal (1975) dan Kader et al. (2017)

Nisbah karbon terhadap nitrogen menentukan perilaku bahan mulsa di lapangan. Bahan bernisbah C/N tinggi seperti sekam dan serbuk gergaji terdekomposisi lambat sehingga memberikan perlindungan lebih lama, namun berpotensi memicu imobilisasi nitrogen sementara apabila tercampur ke dalam lapisan olah (Brady & Weil, 2017). Persoalan ini diatasi dengan membiarkan bahan tetap di permukaan tanpa ditanamkan, atau menambahkan pupuk nitrogen

sebagai penyeimbang pada awal aplikasi (Sapareng, 2026b).

Ketebalan lapisan menentukan efektivitas mulsa. Lapisan yang terlalu tipis tidak menutup permukaan sehingga gulma tetap tumbuh, sedangkan yang terlalu tebal menghambat pertukaran udara dan menjadi tempat berlindung hama. Ketebalan efektif berkisar lima sampai sepuluh sentimeter dalam kondisi memadat dengan penutupan minimal tujuh puluh lima persen.

3.4.4 Mulsa Plastik Hitam Perak

Mulsa plastik hitam perak merupakan jenis mulsa anorganik yang paling luas digunakan pada budidaya sayuran komersial. Sisi perak yang menghadap ke atas memantulkan radiasi matahari sehingga suhu di sekitar tajuk tidak berlebihan dan intensitas cahaya pada permukaan bawah daun meningkat; pemantulan ini sekaligus mengusir serangga vektor virus seperti kutu daun dan trips. Sisi hitam yang menghadap ke tanah menghalangi penetrasi cahaya secara total sehingga gulma di bawahnya tidak dapat berfotosintesis dan mati (Kasirajan & Ngouajio, 2012).

Dari sisi konservasi air, mulsa plastik memberikan penekanan evaporasi tertinggi karena sifatnya yang kedap uap air; uap yang bergerak ke atas tertahan lembaran, mengembun pada permukaan bawahnya, dan kembali jatuh ke tanah. Kelemahannya, air hujan tidak dapat masuk kecuali melalui lubang tanam, sehingga sistem ini menuntut perencanaan pemberian air yang cermat dan idealnya dipadukan dengan jaringan irigasi tetes di bawah lembaran.

Penerapannya menuntut persiapan bedengan yang matang. Bedengan dibentuk rapi, dipupuk dasar secara lengkap, dan disiram hingga mendekati kapasitas lapang

sebelum ditutup, karena setelah lembaran terpasang pemupukan dan pengairan hanya dapat dilakukan melalui lubang tanam atau jaringan irigasi. Pemasangan dilakukan pada siang hari agar lembaran memuai dan dapat ditarik kencang, kemudian tepinya ditanam dan diperkuat dengan pasak bambu.

3.4.5 Pengaruh Mulsa terhadap Sifat Tanah dan Tanaman

Pada sifat fisik, mulsa organik menurunkan amplitudo fluktuasi suhu harian sehingga suhu tanah lebih stabil dan kondusif bagi perkembangan akar serta aktivitas mikroba, sedangkan mulsa plastik hitam justru meningkatkan suhu tanah, sifat yang menguntungkan pada dataran tinggi (Kader *et al.*, 2017). Pada sifat kimia, dekomposisi mulsa organik meningkatkan karbon organik, kapasitas tukar kation, dan ketersediaan hara, sekaligus menekan kemasaman melalui pengkelatan aluminium yang meracun oleh asam-asam organik (Sapareng, 2026b).

Pada sifat biologi, lingkungan lembap dan bersuhu stabil di bawah mulsa meningkatkan populasi serta keragaman biota tanah. Cacing tanah dan mikroorganisme pengurai mencampur bahan organik dengan lapisan mineral dan membentuk pori makro yang meningkatkan infiltrasi, sedangkan cendawan pengurai merombak bahan berlignin bernisbah C/N tinggi (Brady & Weil, 2017). Pada tanaman, ketersediaan air yang terjamin menjaga turgiditas sel dan memperpanjang periode membukanya stomata sehingga fotosintesis berlangsung optimal (Taiz *et al.*, 2015; Sapareng, 2026a).

3.4.6 Teknik Aplikasi pada Berbagai Kondisi Lahan

Pada lahan datar hingga berombak yang ditanami tanaman semusim, mulsa organik dihamparkan merata pada permukaan bedengan segera setelah tanam atau setelah tanaman berumur sekitar dua minggu agar bibit muda tidak tertimbun. Pada tanaman berlarik, mulsa dapat dibatasi hanya pada jalur tanaman untuk menghemat bahan tanpa banyak mengurangi manfaat konservasi lengas.

Pada lahan berlereng, teknik mulsa vertikal memberikan hasil lebih baik dibandingkan penghamparan permukaan semata. Rorak dibuat memotong arah lereng kemudian diisi bahan organik hingga penuh. Aliran permukaan yang membawa air dan sedimen tertahan pada rorak tersebut, air meresap secara vertikal melalui bahan organik yang berpori, sementara sedimen mengendap dan dapat dikembalikan ke bedengan. Sistem ini sekaligus berfungsi sebagai pemanen air, pengendali erosi, dan sumber bahan organik yang terdekomposisi di tempat (Sinukaban, 2007; Kartasapoetra *et al.*, 2010).

Pada tanaman tahunan, aplikasi dipusatkan pada piringan di sekeliling batang sebagai wilayah dengan konsentrasi akar serap tertinggi. Pada kebun kelapa sawit, pelepah hasil pemangkasan disusun membentuk rorak antarbaris sedangkan tandan kosong dihamparkan pada piringan, sehingga sekaligus menyelesaikan persoalan pengelolaan limbah kebun dan mengembalikan kalium dalam jumlah besar (Sapareng, 2026c). Pada tanaman buah seperti jeruk, pemulsaan piringan membantu mempertahankan kelembapan tanah selama kemarau dan menekan kerontokan buah muda akibat cekaman air (Sapareng, 2026c).

3.5 Sistem Irigasi Hemat Air di Lahan Kering

Apabila mulsa bekerja dengan menahan air yang sudah berada dalam tanah, sistem irigasi hemat air bekerja dengan menambahkan air secara terukur pada waktu dan tempat yang tepat. Istilah hemat air di sini tidak berarti memberikan air dalam jumlah sedikit, melainkan memberikan air dengan tingkat kehilangan minimum sehingga porsi yang benar-benar dimanfaatkan tanaman menjadi maksimum (Michael, 2008).

3.5.1 Prinsip Efisiensi Irigasi

Efisiensi irigasi merupakan gabungan dari efisiensi penyaluran, efisiensi aplikasi, dan efisiensi distribusi. Perkalian ketiganya menghasilkan efisiensi keseluruhan yang sangat bervariasi antarsistem (Hansen *et al.*, 1986), sebagaimana disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Perbandingan Karakteristik Beberapa Sistem Irigasi untuk Lahan Kering

Sistem irigasi	Efisiensi (%)	Tekanan	Biaya	Kesesuaian di lahan kering
Genangan/alur permukaan	40-60	Gravitasi	Rendah	Kurang sesuai, boros dan memicu erosi
Curah (sprinkler) besar	65-75	Tinggi	Sedang	Sesuai hamparan luas, rawan hanyut angin
Mini sprinkler	70-80	Sedang	Sedang	Sesuai untuk hortikultura dan pembibitan
Tetes permukaan	85-95	Rendah	Sedang	Sangat sesuai untuk tanaman berlarik
Tetes bawah permukaan	90-95	Rendah	Tinggi	Sangat sesuai, evaporasi hampir nihil
Irigasi kendi	80-90	Gravitasi	Sangat rendah	Sesuai untuk skala kecil dan tanaman muda

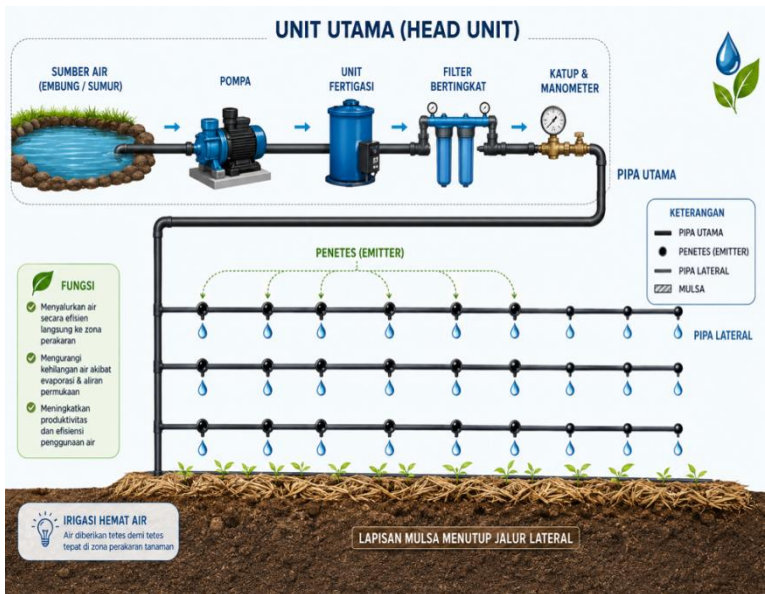
Sumber: Dirangkum dari Keller & Bliesner (1990), Camp (1998), dan Michael (2008)

Rentang efisiensi yang lebar tersebut bersumber dari tiga hal. Pertama, sistem permukaan membasahi seluruh lahan sehingga bidang penguapan maksimum, sedangkan sistem tetes hanya membasahi sebagian kecil permukaan di sekitar tanaman. Kedua, volume pada sistem permukaan sulit dikendalikan sehingga sering terjadi pemberian berlebih yang berujung pada perkolasi dalam. Ketiga, sistem bertekanan menyalurkan air melalui pipa tertutup sehingga kehilangan penyaluran mendekati nol. Meskipun demikian, pemilihan sistem tetap harus mempertimbangkan mutu

sumber air, nilai komoditas, ketersediaan energi, dan kemampuan modal.

3.5.2 Sistem Irigasi Tetes

Irigasi tetes memberikan air dalam jumlah kecil secara berkala melalui penetes yang dipasang pada pipa lateral, langsung pada zona perakaran tanaman. Susunan komponennya, mulai dari sumber air hingga penetes, disajikan pada Gambar 3.2 (Keller & Bliesner, 1990; Lamm *et al.*, 2007).



Gambar 3. 2 Skema Komponen Jaringan Irigasi Tetes Terpadu dengan Lapisan Mulsa
(Sumber: Penulis, berdasarkan Keller & Bliesner, 1990)

Unit utama terdiri atas pompa, unit fertigasi, filter, katup pengatur tekanan, dan manometer. Filter merupakan komponen yang paling menentukan umur pakai sistem karena lubang penetes berdiameter sangat

kecil dan rentan tersumbat. Air dari embung atau sungai umumnya memerlukan penyaringan bertingkat, dimulai dari penyaring kasar untuk menahan serasah, dilanjutkan penyaring pasir untuk bahan organik halus, dan diakhiri penyaring cakram atau kasa untuk partikel terkecil (Nakayama & Bucks, 1991).

Penyumbatan penetes berasal dari partikel padatan, pengendapan kalsium karbonat dan senyawa besi, serta lendir bakteri dan alga. Penyumbatan kimia banyak terjadi pada air tanah yang sadah atau berkadar besi tinggi dan diatasi melalui pengasaman jaringan secara berkala, sedangkan penyumbatan biologis dikendalikan melalui pembilasan dan klorinasi terjadwal. Pembilasan ujung pipa lateral secara rutin merupakan tindakan perawatan paling sederhana yang sering diabaikan namun sangat menentukan keawetan sistem.

Irigasi tetes bawah permukaan menempatkan pipa lateral pada kedalaman lima belas sampai tiga puluh sentimeter, sehingga hampir seluruh kehilangan akibat evaporasi permukaan hilang dan gulma tidak tumbuh pada jalur yang dibasahi. Kelemahannya terletak pada kesulitan pemantauan kerusakan, risiko intrusi akar ke lubang penetes, serta kerentanan terhadap alat pengolah tanah dan hewan pengerat. Penggunaan penetes berpenghambat akar dan penerapan olah tanah minimum menjadi syarat keberhasilannya (Camp, 1998).

Perancangan jaringan harus memperhatikan pemerataan penetesan. Perbedaan tekanan antara pangkal dan ujung lateral menyebabkan debit di pangkal lebih besar, dan pada lahan berlereng perbedaan tersebut diperbesar oleh beda tinggi. Persoalan ini diatasi dengan membatasi panjang lateral, membagi

petak ke dalam beberapa blok pengoperasian, atau menggunakan penetes berkompensasi tekanan yang mempertahankan debit tetap pada rentang tekanan tertentu.

3.5.3 Irigasi Curah dan Teknologi Sederhana Berbiaya Rendah

Irigasi curah menyemprotkan air dalam bentuk butiran halus menyerupai hujan buatan, sesuai untuk tanaman berpola tanam rapat dan tidak menuntut perataan lahan. Kelemahannya adalah kehilangan air selama butiran melayang di udara pada kondisi suhu tinggi dan angin kencang, serta risiko penyakit akibat pembasahan tajuk; kehilangan tersebut ditekan dengan mengoperasikan sistem pada malam hari dan menggunakan nosel berbutiran lebih besar. Mini sprinkler merupakan varian berskala kecil berkebutuhan tekanan lebih rendah yang lebih terjangkau bagi usaha tani kecil (Keller & Bliesner, 1990).

Bagi petani yang belum mampu menjangkau sistem bertekanan, teknologi sederhana tetap berperan. Irigasi kendi memanfaatkan kendi tanah liat berpori yang ditanam di dekat tanaman; air merembes mengikuti gradien potensial air antara isi kendi dengan tanah sekitarnya, melambat ketika tanah lembap dan meningkat ketika tanah mengering, dan mekanisme pengaturan mandiri inilah yang membuatnya sangat hemat air (Bainbridge, 2001). Teknik serupa dapat dibangun dari botol plastik bekas berlubang kecil atau ruas bambu, sedangkan irigasi sumbu memanfaatkan kain penghubung antara wadah air dengan media tanam. Karena menuntut tenaga pengisian ulang, teknik ini lebih tepat diposisikan sebagai teknologi antara atau pelengkap (Postel *et al.*, 2001).

3.5.4 Pemanenan Air Hujan dan Bangunan Penyimpan Air

Sistem irigasi hanya berfungsi apabila tersedia sumber air. Pada lahan kering tanpa akses ke sungai permanen atau air tanah dangkal, pemanenan air hujan menjadi prasyarat mutlak, yaitu menangkap air yang jatuh pada musim hujan, menahannya agar tidak segera mengalir keluar dari wilayah usaha tani, dan menyimpannya untuk periode kering (Oweis & Hachum, 2006).

Embung merupakan bangunan penampung berukuran kecil hingga sedang yang dibangun pada cekungan alami atau melalui penggalian, dengan kapasitas disesuaikan pada luas daerah tangkapan, curah hujan andalan, dan kebutuhan air tanaman. Dasar dan dindingnya perlu dilapisi bahan kedap seperti geomembran atau lempung padat untuk menekan rembesan. Dam parit membendung alur alami yang mengalir musiman sehingga air tertahan dan sebagian meresap mengisi cadangan air tanah, sedangkan rorak, lubang resapan biopori, dan sumur resapan bekerja pada skala petak.

Perencanaan menuntut perhitungan nisbah antara luas daerah tangkapan dengan luas areal yang akan diairi berdasarkan curah hujan andalan, koefisien aliran permukaan, dan kebutuhan air tanaman. Perhitungan yang tidak cermat menyebabkan bangunan penampung terlalu kecil sehingga cepat kosong, atau terlalu besar sehingga tidak sepadan dengan biaya pembangunannya (Oweis & Hachum, 2006).

3.5.5 Penjadwalan Irigasi dan Irigasi Defisit Terkendali

Penjadwalan menjawab dua pertanyaan pokok, yaitu kapan air diberikan dan berapa jumlahnya. Dasar yang paling banyak digunakan adalah neraca air zona

perakaran, dengan kebutuhan air tanaman dihitung sebagai hasil perkalian evapotranspirasi acuan dengan koefisien tanaman yang berubah menurut fase pertumbuhan (Allen *et al.*, 1998). Air tersedia merupakan selisih kadar lengas antara kapasitas lapang dan titik layu permanen dikalikan kedalaman zona perakaran efektif; umumnya hanya tiga puluh sampai lima puluh persen darinya yang boleh dihabiskan sebelum irigasi berikutnya (Kramer & Boyer, 1995). Pemantauannya dapat menggunakan tensiometer, sensor kadar lengas, atau perabaan tanah pada kedalaman zona perakaran.

Penentuan fase kritis merupakan kunci penghematan air. Setiap komoditas memiliki periode yang sangat peka terhadap kekurangan air, umumnya berkaitan dengan pembentukan organ generatif: pada jagung fase pembungaan dan pengisian biji, pada kacang-kacangan fase pembentukan polong, dan pada bawang merah fase pembesaran umbi. Apabila air terbatas, prioritas pemberian diarahkan pada fase tersebut, sementara pada fase yang kurang peka pemberian air dapat dikurangi tanpa penurunan hasil yang berarti (Doorenbos & Kassam, 1979; Sapareng, 2025a).

Strategi irigasi defisit terkendali dibangun di atas prinsip tersebut, yaitu memberikan air di bawah kebutuhan penuh pada fase yang tidak kritis sehingga total penggunaan air menurun sementara hasil hanya turun sedikit (Fereres & Soriano, 2007). Varian lainnya adalah pembasahan sebagian zona perakaran, yaitu pemberian air bergantian pada sisi kiri dan kanan barisan tanaman. Akar pada sisi yang mengering menghasilkan sinyal hormonal berupa asam absisat yang memicu penyempitan bukaan stomata, sehingga transpirasi menurun tanpa menurunkan status air daun secara berlebihan (Davies & Zhang, 1991). Pemahaman

mekanisme fisiologis ini penting agar irigasi defisit tidak berubah menjadi cekaman yang merugikan (Sapareng, 2026a).

3.6 Integrasi Teknologi Mulsa dan Irigasi Hemat Air

Penerapan mulsa dan irigasi hemat air secara terpisah masing-masing memberikan manfaat, namun potensi terbesar baru muncul ketika keduanya dipadukan dalam satu rancangan sistem yang menghasilkan penguatan timbal balik pada beberapa titik sekaligus.

3.6.1 Landasan Sinergi

Sinergi pertama terjadi pada penekanan evaporasi air irigasi. Air yang diberikan melalui jaringan tetes membasahi zona di sekitar penetes, dan apabila permukaan tersebut terbuka sebagian air segera menguap sebelum sempat diserap akar; penempatan mulsa di atas jalur lateral menutup jalur kehilangan tersebut (Hatfield *et al.*, 2001). Sinergi kedua terjadi pada perpanjangan selang waktu irigasi. Karena kehilangan evaporasi ditekan, laju pengurasan lengas menjadi lebih lambat sehingga tenggang antara dua kali pemberian air dapat diperpanjang, yang berarti penurunan frekuensi pengoperasian pompa, penghematan bahan bakar atau listrik, dan pengurangan curahan tenaga kerja.

Sinergi ketiga terjadi pada perbaikan struktur tanah. Mulsa organik yang terdekomposisi meningkatkan bahan organik dan agregasi, yang menaikkan daya hantar air tak jenuh sehingga zona pembasahan lateral di sekitar penetes meluas pada debit yang sama. Sinergi keempat berkaitan dengan

pengendalian gulma: pembasahan hanya terjadi pada jalur sempit di zona perakaran tanaman utama sehingga ruang antarbaris tetap kering, biji gulma tidak berkecambah, dan kebutuhan herbisida serta tenaga penyiangan menurun.

3.6.2 Rancangan Sistem Terpadu Menurut Tipologi Lahan

Tidak ada satu paket teknologi yang sesuai untuk semua kondisi. Pemilihannya mempertimbangkan kemiringan lahan, tekstur tanah, ketersediaan sumber air, jenis komoditas, dan skala usaha, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Alternatif Paket Teknologi Mulsa dan Irigasi Menurut Tipologi Lahan Kering

Tipologi lahan	Jenis mulsa dianjurkan	Sistem irigasi dianjurkan	Catatan penerapan
Datar, tekstur halus, sumber air memadai	Plastik hitam perak atau jerami	Tetes permukaan di bawah mulsa	Sesuai untuk hortikultura bernilai tinggi
Datar, tekstur kasar, air terbatas	Organik tebal (jerami, sekam)	Tetes bawah permukaan	Perlu tambahan bahan organik untuk daya simpan air
Berombak hingga berbukit	Mulsa vertikal pada rorak	Tetes bertekanan rendah per blok	Panjang lateral dibatasi, blok mengikuti kontur
Perkebunan tanaman tahunan	Pelepah dan tandan kosong pada piringan	Mini sprinkler atau tetes melingkar	Pemulsaan dipusatkan pada zona akar serap
Pekarangan dan skala kecil	Serasah dan pangkasan legum	Irigasi kendi, botol, atau sumbu	Investasi rendah, mengandalkan tenaga keluarga

Sumber: Analisis penulis berdasarkan Sinukaban (2007) dan Lamm et al. (2007)

Urutan pelaksanaannya meliputi pengolahan lahan dan pembentukan bedengan sesuai arah kontur, pemberian pupuk dasar, pemasangan jaringan pipa lateral, pengujian sistem, pembasahan tanah hingga

mendekati kapasitas lapang, dan terakhir pemasangan mulsa menutup jalur lateral. Pemasangan mulsa yang mendahului pemasangan jaringan menyulitkan perbaikan bila terjadi kerusakan pipa.

3.6.3 Fertigasi dan Indikator Kinerja Sistem

Penutupan permukaan dengan mulsa, khususnya mulsa plastik, membuat pemupukan susulan dengan cara penebaran menjadi tidak praktis, sehingga sistem terpadu hampir selalu menuntut penerapan fertigasi. Keunggulannya berupa penempatan hara langsung pada zona perakaran aktif, kemudahan pengaturan takaran sesuai fase pertumbuhan, serta penurunan kehilangan hara akibat pencucian. Pelaksanaannya menuntut pupuk berkelarutan tinggi; pencampuran pupuk berkalsium dengan pupuk bersulfat atau berfosfat harus dihindari karena membentuk endapan yang menyumbat penetes, dan jaringan perlu dibilas dengan air bersih pada akhir kegiatan (Sapareng, 2026b).

Keberhasilan sistem terpadu perlu diukur dengan indikator yang jelas. Indikator utama adalah produktivitas air, yaitu jumlah hasil ekonomis per satuan volume air, yang lebih tepat digunakan pada lahan kering dibandingkan hasil per satuan luas karena faktor pembatasnya adalah air (FAO, 2011). Indikator lainnya meliputi efisiensi aplikasi, keseragaman penetesan antartitik dalam satu blok, serta nisbah penerimaan terhadap biaya dan jangka waktu pengembalian investasi (Sivanappan, 1994).

3.6.4 Penerapan pada Beberapa Komoditas

Pada hortikultura seperti cabai, tomat, dan bawang merah, kombinasi mulsa plastik hitam perak dengan irigasi tetes telah menjadi paket standar pada usaha tani komersial karena nilai komoditas yang tinggi

memungkinkan investasi dikembalikan dalam waktu relatif singkat. Pada bawang merah, ketepatan pemberian air pada fase pembesaran umbi menentukan ukuran dan kualitas hasil, sementara pengurangan air menjelang panen mempercepat pematangan dan meningkatkan daya simpan umbi (Sapareng, 2025a).

Pada tanaman pangan lahan kering seperti jagung, kacang tanah, dan kedelai, mulsa organik dari sisa tanaman musim sebelumnya merupakan pilihan paling realistis karena tersedia di lokasi tanpa biaya tambahan. Sisa batang dan daun dihamparkan, lalu tanaman berikutnya ditanam dengan olah tanah minimum melalui lapisan tersebut, sehingga bahan organik tanah terbangun kembali secara bertahap (Sapareng, 2025a).

Pada perkebunan kelapa sawit, pemanfaatan limbah kebun sebagai mulsa telah lama diterapkan, dan percepatan perombakan bahan berlignin dapat diupayakan melalui cendawan pelapuk (Sapareng, 2026c). Pada tanaman buah tahunan, pemulsaan piringan yang dipadukan dengan pemberian air terjadwal pada fase pembungaan dan pembesaran buah menekan kerontokan bunga dan buah muda (Sapareng, 2026c).

3.7 Tantangan, Strategi Adopsi, dan Prospek Pengembangan

Meskipun manfaat teknis kedua teknologi telah banyak dibuktikan, tingkat adopsinya di tingkat petani lahan kering masih jauh dari harapan. Kesenjangan ini menunjukkan bahwa persoalannya tidak semata bersifat teknis, melainkan menyangkut aspek ekonomi, sosial, kelembagaan, dan kebijakan yang saling berkaitan.

3.7.1 Kendala Teknis, Ekonomi, dan Kelembagaan

Kendala teknis utama adalah keterbatasan bahan mulsa organik. Kebutuhan lima sampai sepuluh ton bahan kering per hektar tidak mudah dipenuhi, apalagi ketika sisa tanaman juga digunakan sebagai pakan ternak. Kendala berikutnya adalah besarnya curahan tenaga kerja untuk penyebaran bahan, risiko peningkatan populasi hama yang berlindung di bawah mulsa, serta kerentanan jaringan irigasi terhadap penyumbatan.

Kendala ekonomi terberat adalah tingginya investasi awal jaringan irigasi bertekanan yang meliputi pompa, pipa, penetes, filter, dan bangunan penampung air. Meskipun secara analisis kelayakan investasi tersebut dapat dikembalikan dalam beberapa musim untuk komoditas bernilai tinggi, petani menghadapi kendala arus kas pada tahap awal dan keterbatasan akses terhadap pembiayaan formal (Postel *et al.*, 2001).

Kendala sosial berkaitan dengan kebiasaan bertani yang telah lama berlangsung, misalnya pembakaran sisa tanaman yang justru memusnahkan bahan yang seharusnya menjadi mulsa. Kendala kelembagaan muncul pada pengelolaan sumber air bersama; embung yang melayani beberapa petani memerlukan aturan pembagian air dan biaya perawatan. Tanpa kelembagaan yang berfungsi, bangunan yang telah dibangun sering rusak dan tidak terpelihara (Ostrom, 1990).

3.7.2 Isu Lingkungan Mulsa Plastik dan Alternatif Biodegradabel

Penggunaan mulsa plastik dalam skala luas menimbulkan persoalan lingkungan yang tidak dapat diabaikan. Lembaran yang telah rusak sering ditinggalkan di lahan, terpecah menjadi serpihan kecil

akibat pengolahan tanah dan radiasi ultraviolet, lalu terakumulasi di dalam profil tanah. Akumulasi mikroplastik berpotensi mengganggu pergerakan air, menghambat perkembangan akar, dan memengaruhi biota tanah, sementara pembakarannya menimbulkan pencemaran udara (Steinmetz *et al.*, 2016).

Beberapa langkah dapat ditempuh untuk mengurangi dampak tersebut, yaitu memperpanjang umur pakai lembaran melalui pemasangan dan pembongkaran yang hati-hati, mengorganisasi pengumpulan plastik bekas untuk didaur ulang, serta beralih secara bertahap ke mulsa biodegradabel berbahan pati atau polimer asam polilaktat. Bahan biodegradabel masih terkendala harga yang lebih tinggi dan laju penguraian yang tidak selalu sesuai dengan panjang musim tanam, sehingga pengembangan bahan yang laju penguraiannya dapat diatur menjadi bidang penelitian yang menjanjikan (Kasirajan & Ngouajio, 2012).

3.7.3 Strategi Percepatan Adopsi

Percepatan adopsi memerlukan strategi yang menangani berbagai kendala tersebut secara serentak, bukan parsial. Rangkuman kendala dan strategi penanganannya disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Kendala Penerapan dan Strategi Percepatan Adopsi

Aspek	Kendala utama	Strategi penanganan
Ketersediaan bahan	Biomassa terbatas, bersaing dengan pakan ternak	Tanaman penutup tanah, pengaturan porsi biomassa, pengembalian pupuk kandang
Tenaga kerja	Curahan tenaga tinggi untuk penyebaran bahan	Mekanisasi sederhana, gotong royong, mulsa terbatas pada jalur tanaman
Permodalan	Investasi awal jaringan irigasi tinggi	Kredit usaha tani, bantuan bertahap, pemanfaatan bersama antarkelompok
Pengetahuan teknis	Keterampilan perancangan dan perawatan terbatas	Sekolah lapang, petak percontohan, pendampingan berkelanjutan
Kelembagaan	Aturan pengelolaan air bersama belum ada	Penguatan kelompok tani, aturan pembagian air dan iuran perawatan
Lingkungan	Residu plastik bekas terakumulasi di lahan	Daur ulang terorganisasi, peralihan ke bahan biodegradabel

Sumber: Analisis penulis berdasarkan Postel et al. (2001) dan Steinmetz et al. (2016)

Di antara berbagai strategi tersebut, pembuktian melalui petak percontohan yang dikelola bersama petani terbukti paling efektif mengubah keyakinan, karena petani lebih percaya pada apa yang dilihat langsung di lahan tetangganya. Petak percontohan pada lokasi yang mudah dijangkau memiliki daya sebar jauh lebih besar dibandingkan penyuluhan searah.

3.7.4 Prospek Pengembangan

Perkembangan teknologi sensor dan pengendali otomatis membuka peluang penerapan irigasi cerdas. Sensor kadar lengas pada zona perakaran mengirimkan data ke unit pengendali yang mengaktifkan katup ketika kadar lengas mencapai ambang tertentu, sehingga pemberian air tidak lagi bergantung pada penilaian subjektif.

Ketersediaan energi merupakan kendala klasik pada lahan kering yang umumnya jauh dari jaringan listrik. Pompa bertenaga surya menjadi jawaban yang semakin layak seiring penurunan harga modul fotovoltaik. Debit terbesarnya yang tercapai pada siang hari sesuai dipadukan dengan bak penampung antara, sehingga air dapat didistribusikan secara gravitasi pada waktu yang dikehendaki. Kombinasi pompa surya, bak penampung, jaringan tetes, dan mulsa membentuk sistem yang mandiri energi sekaligus hemat air.

Arah pengembangan lain terletak pada perbaikan bahan tanaman, yaitu perakitan varietas yang efisien dalam penggunaan air, berperakaran dalam, dan mampu mempertahankan fotosintesis pada potensial air daun rendah. Pemuliaan konvensional maupun pemanfaatan penanda molekuler dan teknik bioteknologi membuka peluang percepatan perakitannya (Blum, 2011).

Teknologi mulsa dan sistem irigasi hemat air merupakan dua pilar yang saling melengkapi dalam pengelolaan air lahan kering. Mulsa menahan air agar tetap berada dalam sistem melalui penekanan evaporasi, pengurangan aliran permukaan, peningkatan infiltrasi, dan penekanan persaingan gulma, sedangkan irigasi hemat air menambahkan air secara terukur pada waktu dan tempat yang tepat. Keduanya bermuara pada peningkatan

produktivitas air sebagai indikator keberlanjutan usaha tani lahan kering.

Keberhasilan penerapannya tidak ditentukan oleh kecanggihan perangkat, melainkan oleh ketepatan penyesuaian dengan kondisi biofisik lahan, komoditas, dan kemampuan pengelola, sehingga pengenalannya harus diawali pencirian kondisi setempat serta didukung pembiayaan yang terjangkau dan kelembagaan pengelola air yang berfungsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurachman, A., Dariah, A., & Mulyani, A. 2008. Strategi dan teknologi pengelolaan lahan kering mendukung pengadaan pangan nasional. *Jurnal Litbang Pertanian*, 27(2), 43-49.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO.
- Arsyad, S. 2010. *Konservasi Tanah dan Air*. Edisi Kedua. Bogor: IPB Press.
- Bainbridge, D. A. 2001. Buried clay pot irrigation: A little known but very efficient traditional method of irrigation. *Agricultural Water Management*, 48(2), 79-88.
- Blum, A. 2011. *Plant Breeding for Water-Limited Environments*. New York: Springer.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. 15th Edition. Columbus: Pearson Education.
- Camp, C. R. 1998. Subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1353-1367.
- Chalker-Scott, L. 2007. Impact of mulches on landscape plants and the environment: A review. *Journal of Environmental Horticulture*, 25(4), 239-249.
- Davies, W. J., & Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 42, 55-76.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. 1979. *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome: FAO.

- FAO. 2011. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing Systems at Risk*. Rome: FAO.
- Fereres, E., & Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159.
- Hansen, V. E., Israelsen, O. W., & Stringham, G. E. 1986. *Dasar-Dasar dan Praktek Irigasi*. Edisi Keempat (Terjemahan). Jakarta: Erlangga.
- Hatfield, J. L., Sauer, T. J., & Prueger, J. H. 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiency: A review. *Agronomy Journal*, 93(2), 271-280.
- Hillel, D. 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. 2017. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155-166.
- Kartasapoetra, A. G., Kartasapoetra, G., & Sutedjo, M. M. 2010. *Teknologi Konservasi Tanah dan Air*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. 2012. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 501-529.
- Keller, J., & Bliesner, R. D. 1990. *Sprinkle and Trickle Irrigation*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. San Diego: Academic Press.

- Lal, R. 1975. *Role of Mulching Techniques in Tropical Soil and Water Management*. Technical Bulletin No. 1. Ibadan: International Institute of Tropical Agriculture.
- Lamm, F. R., Ayars, J. E., & Nakayama, F. S. (Eds.). 2007. *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation, and Management*. Amsterdam: Elsevier.
- Michael, A. M. 2008. *Irrigation: Theory and Practice*. 2nd Edition. New Delhi: Vikas Publishing House.
- Mulyani, A., & Sarwani, M. 2013. Karakteristik dan potensi lahan sub optimal untuk pengembangan pertanian di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 7(1), 47-55.
- Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*, 12(4), 187-192.
- Ostrom, E. 1990. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oweis, T., & Hachum, A. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management*, 80(1-3), 57-73.
- Postel, S., Polak, P., Gonzales, F., & Keller, J. 2001. Drip irrigation for small farmers: A new initiative to alleviate hunger and poverty. *Water International*, 26(1), 3-13.
- Rockstrom, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J., & Qiang, Z. 2010. Managing water in rainfed agriculture: The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, 97(4), 543-550.

- Sapareng, S. 2025a. *Budidaya Tanaman Pangan*. Padang. CV HEI Publishing Indonesia.
- Sapareng, S. 2025b. *Dasar-Dasar Budidaya Pertanian*. Padang. GET Press Indonesia.
- Sapareng, S. 2026a. *Fisiologi Tumbuhan*. Padang. CV Luminary Press Indonesia.
- Sapareng, S. 2026b. *Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman*. Padang. Azzia Karya Bersama.
- Sapareng, S. 2026c. *Teknik Budidaya Tanaman untuk Pertanian Berkelanjutan*. Agam, Sumatra Barat. CV. Lauk Puyu Press.
- Sinukaban, N. 2007. *Konservasi Tanah dan Air Kunci Pembangunan Berkelanjutan*. Jakarta: Direktorat Jenderal RLPS, Departemen Kehutanan.
- Sivanappan, R. K. 1994. Prospects of micro-irrigation in India. *Irrigation and Drainage Systems*, 8(1), 49-58.
- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Troger, J., Munoz, K., Fror, O., & Schaumann, G. E. 2016. Plastic mulching in agriculture: Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, 550, 690-705.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. 2015. *Plant Physiology and Development*. 6th Edition. Sunderland: Sinauer Associates.

BAB 4

PERANAN BIOTA TANAH SEBAGAI REGULATOR HARA

Oleh Mahmudin

Kesuburan tanah merupakan hasil interaksi antara sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang secara bersama-sama menentukan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Selama ini, pengelolaan kesuburan tanah lebih banyak berfokus pada aspek kimia melalui pemupukan dan penggunaan bahan amelioran, sementara peran komponen biologis tanah sering kali kurang mendapat perhatian (Brady & Weil, 2017). Padahal, biota tanah memiliki fungsi penting dalam mengatur berbagai proses biologis yang berhubungan dengan siklus dan ketersediaan hara.

Pada lahan kering, peran biota tanah menjadi sangat penting karena kondisi lingkungan yang umumnya ditandai oleh keterbatasan air, rendahnya kandungan bahan organik, dan tingginya risiko degradasi tanah. Kondisi tersebut menyebabkan ketersediaan unsur hara menjadi terbatas sehingga produktivitas lahan cenderung rendah (Lal, 2018). Dalam situasi ini, aktivitas biota tanah berfungsi sebagai penggerak utama proses-proses biologis yang mendukung kesuburan tanah.

Biota tanah berperan sebagai regulator hara melalui proses dekomposisi bahan organik, mineralisasi unsur hara, fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, serta pembentukan humus yang berkontribusi terhadap peningkatan ketersediaan hara bagi tanaman (Paul, 2015). Selain itu, beberapa mikroorganisme seperti bakteri penambat nitrogen, mikroba pelarut fosfat, dan fungi mikoriza mampu meningkatkan efisiensi penyerapan hara dan ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan (FAO, 2020).

Oleh karena itu, pemahaman mengenai peranan biota tanah sebagai regulator hara sangat penting dalam pengelolaan lahan kering berkelanjutan. Pengelolaan yang mendukung keberadaan dan aktivitas biota tanah dapat meningkatkan kesuburan tanah, efisiensi penggunaan hara, serta produktivitas tanaman secara berkelanjutan.

4.1 Pengertian dan Klasifikasi Biota Tanah

Biota tanah merupakan seluruh organisme hidup yang berada di dalam maupun di permukaan tanah yang berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. Organisme tersebut meliputi mikroorganisme seperti bakteri, fungi, aktinomisetes, alga, dan protozoa, serta fauna tanah seperti nematoda, cacing tanah, rayap, semut, dan berbagai arthropoda lainnya. Keberadaan biota tanah menjadi salah satu komponen penting dalam ekosistem tanah karena berperan dalam menjaga keseimbangan proses biologis yang mendukung kesuburan tanah dan produktivitas tanaman. Menurut Paul (2015), biota tanah berfungsi sebagai penggerak utama berbagai proses transformasi bahan organik dan siklus unsur hara yang menentukan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.

Dalam ekosistem lahan kering, biota tanah memiliki peran yang sangat strategis karena kondisi lingkungan yang terbatas, terutama terkait ketersediaan air dan rendahnya kandungan bahan organik. Melalui aktivitas biologisnya, biota tanah mampu mempercepat dekomposisi bahan organik, meningkatkan pelepasan unsur hara, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air. Selain itu, beberapa mikroorganisme tertentu dapat membentuk hubungan simbiosis dengan tanaman sehingga membantu meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara dan ketahanan tanaman terhadap kondisi cekaman lingkungan. Oleh karena itu, keberadaan biota tanah sering dijadikan sebagai indikator kesehatan dan kualitas tanah dalam sistem pertanian berkelanjutan (Brady & Weil, 2017).

Biota tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan ukuran tubuhnya menjadi mikrobiota, mesobiota, dan makrobiota tanah. Pengelompokan ini dilakukan karena setiap kelompok memiliki karakteristik, habitat, dan fungsi yang berbeda dalam mendukung proses-proses biologis di dalam tanah. Meskipun memiliki ukuran yang berbeda, ketiga kelompok tersebut saling berinteraksi dan membentuk jaringan kehidupan yang berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah (Lavelle & Spain, 2001).

Mikrobiota tanah merupakan kelompok organisme berukuran sangat kecil yang umumnya kurang dari 0,1 mm sehingga hanya dapat diamati menggunakan mikroskop. Kelompok ini terdiri atas bakteri, fungi, aktinomisetes, alga, dan protozoa. Mikrobiota memiliki peran dominan dalam proses dekomposisi bahan organik, mineralisasi unsur hara, fiksasi nitrogen, serta pelarutan fosfat yang tidak tersedia bagi tanaman (Paul, 2015). Bakteri dan fungi merupakan kelompok yang paling berperan dalam mengubah bahan organik menjadi senyawa sederhana yang dapat dimanfaatkan kembali oleh tanaman (Brady & Weil, 2017).

Selain itu, beberapa jenis bakteri seperti *Rhizobium*, *Azotobacter*, dan *Azospirillum* mampu menambat nitrogen dari atmosfer, sedangkan mikroba pelarut fosfat seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus* dapat meningkatkan ketersediaan fosfor di dalam tanah (Sylvia *et al.*, 2005).

Kelompok mesobiota terdiri atas organisme yang berukuran antara 0,1 hingga 2 mm, seperti nematoda, tungau (*mites*), dan Collembola. Organisme-organisme ini berperan dalam mempercepat proses dekomposisi dengan cara menghancurkan bahan organik menjadi partikel yang lebih kecil sehingga lebih mudah diuraikan oleh mikroorganisme (Lavelle & Spain, 2001). Selain itu, beberapa jenis mesobiota berfungsi sebagai predator yang mengendalikan populasi mikroorganisme tertentu sehingga membantu menjaga keseimbangan komunitas biota tanah. Aktivitas mesobiota juga berkontribusi terhadap pelepasan unsur hara dari biomassa mikroba ke dalam tanah sehingga dapat dimanfaatkan oleh tanaman (Brady & Weil, 2017).

Makrobiota tanah merupakan kelompok organisme yang berukuran lebih dari 2 mm dan dapat diamati secara langsung tanpa bantuan mikroskop. Kelompok ini meliputi cacing tanah, rayap, semut, kumbang tanah, dan berbagai jenis arthropoda lainnya. Makrobiota memiliki peran penting dalam memperbaiki sifat fisik tanah melalui aktivitas penggalian dan pembentukan liang. Aktivitas tersebut dapat meningkatkan aerasi, infiltrasi air, dan perkembangan akar tanaman (Lavelle & Spain, 2001). Cacing tanah dikenal sebagai salah satu organisme yang sangat berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah karena mampu mencampurkan bahan organik dengan tanah mineral serta menghasilkan kascing yang kaya akan unsur hara tersedia (Brady & Weil, 2017). Sementara itu, rayap dan semut berkontribusi dalam proses dekomposisi bahan organik serta distribusi unsur hara pada berbagai lapisan tanah (FAO, 2020).

Selain berdasarkan ukuran tubuh, biota tanah juga dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsinya dalam ekosistem tanah. Kelompok dekomposer terdiri atas organisme yang berperan dalam menguraikan bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Kelompok mutualis meliputi organisme yang hidup bersimbiosis dengan tanaman, seperti bakteri penambat nitrogen dan fungi mikoriza. Kelompok predator berfungsi mengendalikan populasi organisme lain sehingga menjaga keseimbangan ekosistem tanah, sedangkan kelompok herbivor memanfaatkan jaringan tanaman sebagai sumber makanan (Paul, 2015). Interaksi antar kelompok tersebut membentuk sistem biologis yang kompleks dan berperan penting dalam mengatur siklus unsur hara, menjaga kesuburan tanah, serta mendukung produktivitas lahan kering secara berkelanjutan (Lal, 2018).

4.2 Peran Biota Tanah dalam Siklus Hara

Biota tanah memiliki peranan sentral dalam siklus hara karena bertanggung jawab terhadap berbagai proses biologis yang mengatur transformasi, penyimpanan, dan pelepasan unsur hara di dalam tanah. Siklus hara merupakan proses pergerakan unsur-unsur esensial seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), sulfur (S), dan unsur hara lainnya dari bentuk organik ke bentuk anorganik serta sebaliknya. Melalui aktivitas metabolisme dan interaksi antarorganisme, biota tanah mengendalikan ketersediaan unsur hara sehingga dapat dimanfaatkan secara optimal oleh tanaman (Paul, 2015).

Salah satu peran utama biota tanah dalam siklus hara adalah sebagai dekomposer bahan organik. Sisa tanaman, serasah, akar mati, dan residu organisme lainnya yang berada di permukaan maupun di dalam tanah akan diuraikan oleh bakteri, fungi, dan aktinomisetes menjadi senyawa yang lebih

sederhana. Proses dekomposisi tersebut menghasilkan berbagai unsur hara yang sebelumnya terikat dalam jaringan organik sehingga kembali tersedia bagi tanaman. Kecepatan dekomposisi sangat dipengaruhi oleh jenis bahan organik, kondisi lingkungan, dan aktivitas komunitas mikroorganisme tanah (Brady & Weil, 2017).

Selain dekomposisi, biota tanah juga berperan dalam proses mineralisasi unsur hara. Mineralisasi merupakan perubahan unsur hara yang berada dalam bentuk organik menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap oleh tanaman. Sebagai contoh, nitrogen organik yang berasal dari sisa tanaman diubah menjadi amonium (NH_4^+) melalui aktivitas mikroorganisme heterotrof, kemudian sebagian amonium tersebut diubah menjadi nitrat (NO_3^-) melalui proses nitrifikasi. Proses ini sangat penting karena sebagian besar tanaman menyerap nitrogen dalam bentuk amonium dan nitrat (Sylvia *et al.*, 2005).

Di sisi lain, mikroorganisme tanah juga melakukan proses immobilisasi, yaitu pengikatan unsur hara anorganik ke dalam biomassa mikroba. Pada kondisi tertentu, terutama ketika bahan organik yang terdekomposisi memiliki rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) yang tinggi, mikroorganisme akan menggunakan nitrogen tersedia untuk memenuhi kebutuhan pertumbuhannya. Meskipun sementara waktu dapat mengurangi ketersediaan nitrogen bagi tanaman, proses immobilisasi berfungsi sebagai mekanisme penyimpanan hara yang dapat mencegah kehilangan unsur hara akibat pencucian dan erosi (Paul, 2015).

Peran penting lainnya adalah pengaturan siklus fosfor melalui aktivitas mikroorganisme pelarut fosfat. Sebagian besar fosfor di dalam tanah berada dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman karena terikat oleh unsur besi,

aluminium, atau kalsium. Beberapa bakteri dan fungi mampu menghasilkan asam organik serta enzim fosfatase yang dapat melarutkan senyawa fosfat tersebut menjadi bentuk ortofosfat yang dapat diserap oleh akar tanaman (Richardson *et al.*, 2009). Dengan demikian, mikroorganisme tanah berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi penggunaan fosfor dalam sistem pertanian.

Biota tanah juga berperan dalam siklus sulfur melalui proses mineralisasi sulfur organik menjadi sulfat (SO_4^{2-}), yang merupakan bentuk sulfur yang dapat diserap oleh tanaman. Proses ini terutama dilakukan oleh bakteri pengoksidasi sulfur yang mengubah senyawa sulfur kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan tersedia. Sulfur merupakan unsur penting dalam pembentukan protein, enzim, dan berbagai senyawa metabolit tanaman sehingga keberadaan mikroorganisme yang terlibat dalam siklus sulfur sangat mendukung produktivitas pertanian (Brady & Weil, 2017).

Dalam ekosistem lahan kering, aktivitas biota tanah dalam siklus hara menjadi semakin penting karena ketersediaan unsur hara umumnya lebih terbatas dibandingkan pada lahan yang memiliki kandungan bahan organik tinggi. Oleh karena itu, keberadaan komunitas biota tanah yang aktif dan beragam menjadi faktor penting dalam menjaga keberlanjutan siklus hara, meningkatkan efisiensi pemanfaatan nutrisi, serta mempertahankan produktivitas lahan secara berkelanjutan (Lal, 2018).

4.3 Biota Tanah sebagai Regulator Nitrogen

Nitrogen merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang paling dibutuhkan tanaman karena berperan dalam pembentukan klorofil, asam amino, protein, enzim, dan berbagai senyawa metabolisme lainnya. Meskipun atmosfer mengandung sekitar 78% nitrogen dalam bentuk gas N_2 , unsur tersebut tidak dapat langsung dimanfaatkan oleh sebagian besar tanaman. Oleh karena itu, biota tanah memiliki peranan yang sangat penting dalam mengubah nitrogen atmosfer maupun nitrogen organik menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman melalui berbagai proses biologis (Sylvia *et al.*, 2005).

Salah satu mekanisme utama yang dilakukan biota tanah adalah fiksasi nitrogen biologis. Proses ini dilakukan oleh bakteri penambat nitrogen yang mampu mengubah nitrogen atmosfer menjadi amonia (NH_3) melalui aktivitas enzim nitrogenase. Bakteri penambat nitrogen dapat hidup secara simbiotik maupun non-simbiotik. Kelompok simbiotik seperti *Rhizobium* dan *Bradyrhizobium* membentuk bintil akar pada tanaman legum dan menyediakan nitrogen bagi tanaman inang. Sebagai imbalannya, tanaman menyediakan sumber karbon dan energi bagi bakteri tersebut (Paul, 2015). Hubungan mutualisme ini merupakan salah satu mekanisme alami yang sangat penting dalam meningkatkan kesuburan tanah pada lahan kering.

Selain bakteri simbiotik, terdapat pula bakteri penambat nitrogen non-simbiotik seperti *Azotobacter*, *Azospirillum*, dan beberapa spesies sianobakteri yang mampu melakukan fiksasi nitrogen secara bebas di dalam tanah. Meskipun kontribusinya tidak sebesar bakteri simbiotik, kelompok mikroorganisme ini tetap berperan dalam menambah

cadangan nitrogen tanah, terutama pada lahan yang miskin unsur hara (Brady & Weil, 2017)

Setelah nitrogen organik tersedia di dalam tanah, mikroorganisme tanah melanjutkan proses transformasi melalui amonifikasi dan nitrifikasi. Amonifikasi merupakan proses penguraian senyawa organik yang mengandung nitrogen menjadi amonium (NH_4^+). Selanjutnya, bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* mengubah amonium menjadi nitrit (NO_2^-), kemudian bakteri *Nitrobacter* mengoksidasi nitrit menjadi nitrat (NO_3^-), yaitu bentuk nitrogen yang paling mudah diserap oleh tanaman (Sylvia *et al.*, 2005).

Selain meningkatkan ketersediaan nitrogen, biota tanah juga berperan dalam mengatur kehilangan nitrogen melalui proses denitrifikasi. Pada kondisi tanah yang jenuh air atau miskin oksigen, bakteri denitrifikasi seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus* dapat mengubah nitrat menjadi gas nitrogen yang dilepaskan kembali ke atmosfer. Meskipun proses ini merupakan bagian alami dari siklus nitrogen, kehilangan nitrogen yang berlebihan dapat mengurangi efisiensi penggunaan pupuk dan menurunkan kesuburan tanah (Paul, 2015).

Dengan demikian, biota tanah berfungsi sebagai regulator utama dalam siklus nitrogen melalui proses fiksasi nitrogen, amonifikasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi. Aktivitas berbagai kelompok mikroorganisme tersebut menentukan jumlah nitrogen yang tersedia bagi tanaman sekaligus menjaga keseimbangan nitrogen dalam ekosistem tanah. Oleh karena itu, pengelolaan lahan kering yang berkelanjutan perlu memperhatikan upaya pelestarian dan peningkatan aktivitas mikroorganisme tanah agar efisiensi penggunaan nitrogen dapat ditingkatkan dan produktivitas tanaman dapat dipertahankan dalam jangka panjang (Lal, 2018).

4.4 Biota Tanah sebagai Regulator Fosfor

Fosfor (P) merupakan unsur hara makro esensial yang berperan penting dalam berbagai proses fisiologis tanaman, seperti transfer energi, pembentukan asam nukleat, sintesis protein, pembelahan sel, serta perkembangan akar dan biji. Meskipun kandungan total fosfor di dalam tanah dapat relatif tinggi, sebagian besar berada dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman karena terikat oleh senyawa besi (Fe), aluminium (Al), dan kalsium (Ca). Kondisi ini menyebabkan efisiensi pemanfaatan fosfor oleh tanaman umumnya rendah, terutama pada lahan kering yang sering memiliki tingkat kemasaman atau alkalinitas yang tinggi (Brady & Weil, 2017).

Biota tanah berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan fosfor melalui aktivitas mikroorganisme pelarut fosfat (phosphate-solubilizing microorganisms). Kelompok mikroorganisme ini meliputi berbagai jenis bakteri seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, dan *Burkholderia*, serta fungi seperti *Aspergillus* dan *Penicillium*. Mikroorganisme tersebut menghasilkan berbagai asam organik, seperti asam sitrat, asam oksalat, dan asam glukonat, yang mampu melarutkan fosfat tidak tersedia menjadi bentuk ortofosfat yang dapat diserap oleh tanaman (Richardson *et al.*, 2009).

Selain melalui pelarutan fosfat, beberapa mikroorganisme juga menghasilkan enzim fosfatase yang berperan dalam menghidrolisis senyawa fosfor organik menjadi fosfor anorganik yang tersedia bagi tanaman. Aktivitas enzimatik ini sangat penting pada tanah yang memiliki kandungan bahan organik tinggi karena sebagian fosfor tersimpan dalam bentuk organik yang tidak dapat langsung dimanfaatkan oleh tanaman. Dengan demikian, mikroorganisme tanah berfungsi sebagai penghubung antara

cadangan fosfor organik dan kebutuhan fosfor tanaman (Paul, 2015).

Peranan penting lainnya dalam siklus fosfor dilakukan oleh fungi mikoriza arbuskular (FMA). Mikoriza membentuk hubungan simbiosis mutualisme dengan akar tanaman melalui jaringan hifa yang berkembang jauh melebihi daerah perakaran. Jaringan hifa tersebut mampu menjangkau sumber fosfor yang tidak dapat dicapai oleh akar tanaman sehingga meningkatkan serapan fosfor secara signifikan. Selain membantu penyerapan fosfor, mikoriza juga meningkatkan penyerapan unsur hara lain, memperbaiki status air tanaman, dan meningkatkan toleransi terhadap cekaman kekeringan yang sering terjadi pada lahan kering (Smith & Read, 2008).

Pada lahan kering, peran mikroorganisme pelarut fosfat dan fungi mikoriza menjadi sangat penting karena kondisi kelembapan yang rendah sering menghambat mobilitas fosfor di dalam tanah. Keberadaan biota tanah yang aktif dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk fosfat, mengurangi kebutuhan pupuk kimia, serta memperbaiki kesuburan tanah secara berkelanjutan. Oleh karena itu, pengelolaan lahan yang mendukung perkembangan mikroorganisme pelarut fosfat dan mikoriza merupakan salah satu strategi penting dalam meningkatkan produktivitas lahan kering (FAO, 2020).

4.5 Peran Biota Tanah dalam Pembentukan Bahan Organik dan Humus

Bahan organik tanah merupakan salah satu komponen utama yang menentukan kualitas dan produktivitas lahan kering. Bahan organik berfungsi sebagai sumber energi bagi organisme tanah, penyedia unsur hara, pembentuk agregat tanah, serta penyimpan air dan karbon. Dalam ekosistem

tanah, biota tanah memiliki peran utama dalam proses transformasi bahan organik menjadi humus yang stabil dan bermanfaat bagi kesuburan tanah (Brady & Weil, 2017).

Proses pembentukan humus diawali dengan dekomposisi residu tanaman, serasah, akar mati, dan sisa organisme lainnya oleh mikroorganisme tanah. Bakteri dan fungi menghasilkan berbagai enzim ekstraseluler yang mampu memecah senyawa kompleks seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, protein, dan lemak menjadi senyawa yang lebih sederhana. Senyawa hasil dekomposisi tersebut kemudian digunakan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme atau mengalami transformasi lebih lanjut menjadi bahan humik yang lebih stabil (Paul, 2015).

Fungi memiliki peranan yang sangat penting dalam proses humifikasi karena mampu mendegradasi senyawa lignin yang relatif sulit diuraikan. Senyawa hasil degradasi lignin kemudian mengalami polimerisasi dan kondensasi sehingga membentuk asam humat, asam fulvat, dan humin yang merupakan komponen utama humus. Humus memiliki stabilitas yang tinggi sehingga mampu bertahan dalam tanah selama puluhan hingga ratusan tahun serta menjadi cadangan karbon yang penting dalam ekosistem tanah (Sylvia *et al.*, 2005).

Selain mikroorganisme, fauna tanah seperti cacing tanah, rayap, dan semut juga berkontribusi dalam pembentukan humus. Organisme-organisme tersebut mempercepat penghancuran bahan organik menjadi ukuran yang lebih kecil sehingga memperluas permukaan yang dapat diakses oleh mikroorganisme. Aktivitas fauna tanah juga membantu pencampuran bahan organik dengan partikel mineral tanah sehingga mempercepat proses humifikasi dan

pembentukan agregat tanah yang stabil (Lavelle & Spain, 2001).

Humus yang terbentuk memberikan berbagai manfaat bagi lahan kering. Keberadaan humus dapat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, mengurangi erosi, serta menyediakan unsur hara secara bertahap bagi tanaman. Oleh karena itu, aktivitas biota tanah dalam pembentukan bahan organik dan humus merupakan salah satu faktor utama yang mendukung keberlanjutan produktivitas lahan kering dan ketahanan sistem pertanian terhadap perubahan lingkungan (Lal, 2018).

DAFTAR PUSTAKA

- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). *Soil Biodiversity and Sustainable Soil Management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Lal, R. (2018). *Soil Health and Sustainable Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Paul, E. A. (2015). *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (4th ed.). Academic Press, Burlington, Massachusetts.
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321(1–2), 305–339.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press, London.
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). *Principles and Applications of Soil Microbiology* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

BAB 5

DAMPAK RESIDU AGROKIMIA TERHADAP LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

Oleh Baso Daeng

5.1 Konsep dan Klasifikasi Residu Agrokimia dalam Sistem Pertanian

Residu agrokimia merupakan senyawa kimia yang tersisa di lingkungan sebagai akibat dari penggunaan input pertanian seperti pestisida dan pupuk sintetis. Senyawa tersebut dapat bertahan dalam tanah, air, maupun jaringan tanaman dalam jangka waktu tertentu tergantung pada sifat kimianya. Menurut Popp *et al.* (2015), penggunaan agrokimia yang intensif dalam sistem pertanian modern meningkatkan akumulasi residu yang berpotensi mencemari lingkungan. Residu ini mencakup berbagai golongan seperti insektisida, herbisida, fungisida, serta sisa pupuk anorganik yang tidak terserap tanaman. Keberadaan residu agrokimia menjadi perhatian utama dalam konteks pertanian berkelanjutan karena berkaitan dengan kesehatan ekosistem. Pemahaman yang komprehensif mengenai konsep residu agrokimia menjadi dasar dalam pengelolaan lahan yang lebih ramah lingkungan.

Klasifikasi residu agrokimia dapat dilakukan berdasarkan jenis bahan aktif, tingkat persistensi, serta mekanisme degradasinya di lingkungan. Senyawa dengan persistensi tinggi cenderung bertahan lebih lama dan memiliki potensi bioakumulasi yang lebih besar dibandingkan senyawa yang mudah terurai. Carvalho (2017) menjelaskan bahwa pestisida organoklorin termasuk dalam kelompok yang sangat persisten dan berbahaya bagi lingkungan. Senyawa lain seperti organofosfat dan karbamat memiliki tingkat degradasi yang lebih cepat, namun tetap berisiko jika digunakan secara berlebihan. Klasifikasi ini penting untuk menentukan strategi pengelolaan dan mitigasi dampak residu. Pemilahan jenis residu juga membantu dalam menentukan metode analisis dan pemantauan yang tepat di lapangan.

Sumber utama residu agrokimia berasal dari aktivitas budidaya intensif yang melibatkan aplikasi berulang bahan kimia pertanian. Aplikasi pestisida yang tidak tepat dosis dan waktu dapat meningkatkan akumulasi residu dalam tanah dan tanaman. Selain itu, pemupukan anorganik yang berlebihan menyebabkan residu nitrat dan fosfat yang dapat mencemari lingkungan sekitar. Menurut Zhang *et al.* (2018), sekitar 30–50% pupuk nitrogen yang diaplikasikan tidak terserap tanaman dan berpotensi menjadi residu di lingkungan. Praktik pertanian di lahan kering memiliki karakteristik khusus yang mempengaruhi distribusi residu tersebut. Kondisi curah hujan rendah dan evaporasi tinggi menyebabkan residu lebih terkonsentrasi pada lapisan tanah tertentu.

Residu agrokimia memasuki lingkungan melalui berbagai jalur seperti infiltrasi ke dalam tanah, limpasan permukaan, dan deposisi melalui udara. Jalur tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi agroekosistem, termasuk tipe tanah dan iklim setempat. Fenomena volatilitas dan spray drift juga berkontribusi terhadap penyebaran residu ke area di luar

lahan pertanian. Menurut Silva *et al.* (2019), perpindahan residu melalui udara dapat mencapai jarak yang signifikan dan mempengaruhi ekosistem non-target. Interaksi antara residu dan komponen lingkungan menentukan tingkat risiko pencemaran yang terjadi. Pemahaman mengenai jalur distribusi ini menjadi penting dalam merancang strategi pengelolaan yang efektif.

Karakteristik residu agrokimia ditentukan oleh sifat fisik dan kimia seperti kelarutan, tekanan uap, serta afinitas terhadap partikel tanah. Senyawa dengan kelarutan tinggi cenderung mudah tercuci ke dalam air tanah, sedangkan senyawa dengan afinitas tinggi terhadap bahan organik akan terakumulasi di tanah. Persistence atau daya tahan residu dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme serta kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban. Menurut Arias-Estévez *et al.* (2016), degradasi residu agrokimia sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara faktor biotik dan abiotik. Variasi karakteristik ini menyebabkan perbedaan perilaku residu di berbagai jenis lahan, termasuk lahan kering. Pemahaman terhadap karakteristik tersebut menjadi dasar dalam pengembangan teknologi pengelolaan residu yang berkelanjutan.

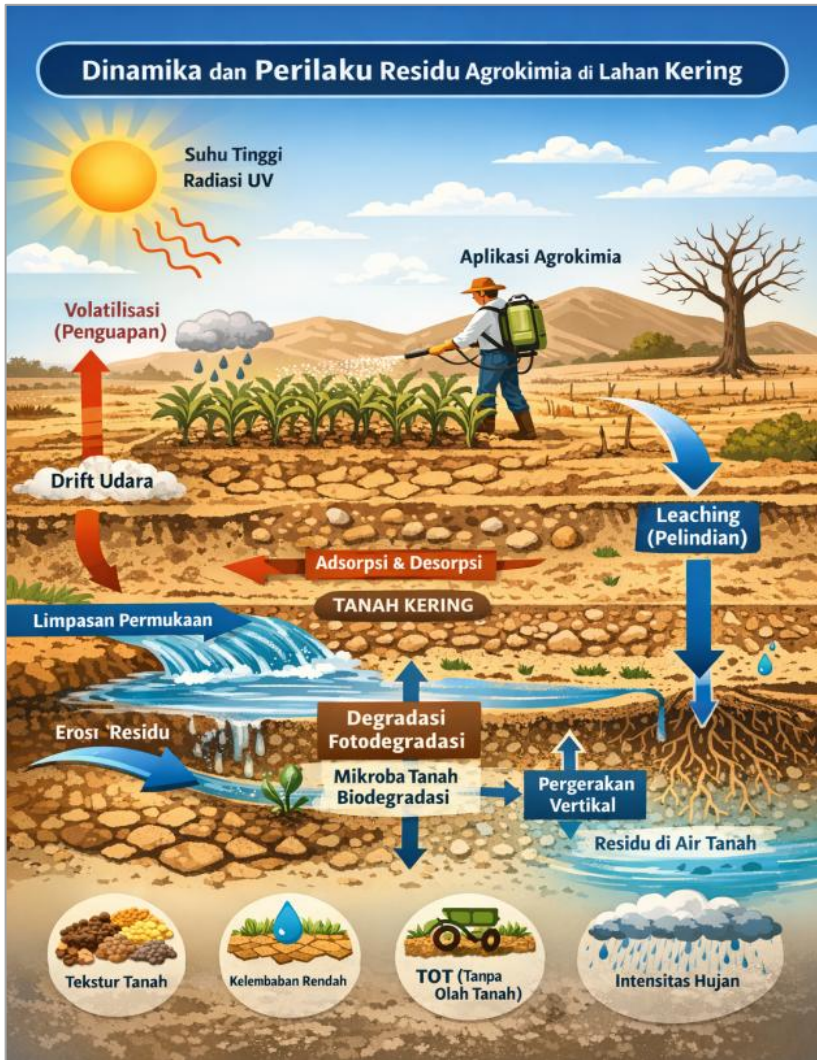
5.2 Dinamika dan Perilaku Residu Agrokimia dalam Tanah Lahan Kering

Dinamika residu agrokimia di lahan kering dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang khas seperti curah hujan rendah, suhu tinggi, dan kelembaban tanah yang terbatas. Kondisi tersebut menyebabkan proses transformasi dan pergerakan senyawa kimia berlangsung berbeda dibandingkan lahan basah. Menurut Fenner *et al.* (2013), faktor iklim memainkan peran penting dalam menentukan laju degradasi pestisida di lingkungan tanah. Intensitas radiasi matahari yang tinggi di lahan kering juga

mempercepat proses fotodegradasi beberapa senyawa agrokimia. Variabilitas kondisi ini menyebabkan residu memiliki perilaku yang kompleks dan tidak seragam. Pemahaman dinamika ini penting untuk merancang sistem pengelolaan yang adaptif terhadap kondisi lahan kering.

Perilaku residu agrokimia dalam tanah sangat ditentukan oleh proses adsorpsi dan desorpsi yang terjadi pada partikel tanah. Adsorpsi merupakan proses penempelan senyawa kimia pada permukaan tanah, terutama pada fraksi liat dan bahan organik. Senyawa dengan afinitas tinggi terhadap bahan organik cenderung terikat kuat sehingga mobilitasnya rendah. Sebaliknya, senyawa yang mudah terdesorpsi memiliki potensi lebih besar untuk berpindah ke lapisan tanah yang lebih dalam. Menurut Spark dan Swift (2002), kandungan bahan organik tanah menjadi faktor utama dalam mengontrol retensi pestisida. Proses ini sangat relevan pada lahan kering yang umumnya memiliki kandungan bahan organik rendah.

Proses degradasi residu agrokimia di lahan kering melibatkan mekanisme biotik dan abiotik yang saling berinteraksi. Degradasi biotik dilakukan oleh mikroorganisme tanah yang memanfaatkan senyawa kimia sebagai sumber energi. Aktivitas mikroba di lahan kering seringkali terbatas akibat kondisi kelembaban yang rendah. Degradasi abiotik meliputi hidrolisis dan fotodegradasi yang dipengaruhi oleh suhu dan intensitas cahaya. Menurut Cycoń *et al.* (2017), kombinasi faktor biotik dan abiotik menentukan kecepatan transformasi pestisida di tanah. Laju degradasi yang lambat dapat meningkatkan risiko akumulasi residu dalam jangka panjang.



Gambar 5. 1 Dinamika dan Perilaku Residu Agrokimia di Lahan Kering

Volatilitas merupakan salah satu mekanisme penting dalam hilangnya residu agrokimia di lahan kering. Senyawa dengan tekanan uap tinggi cenderung mudah menguap ke

atmosfer, terutama pada suhu tinggi. Proses ini dapat mengurangi konsentrasi residu di tanah namun berpotensi menyebabkan pencemaran udara. Menurut Bedos *et al.* (2018), volatilisasi pestisida dipengaruhi oleh suhu, kecepatan angin, dan sifat kimia senyawa. Kondisi lahan kering yang panas dan terbuka meningkatkan peluang terjadinya volatilisasi. Dampak dari proses ini tidak hanya terbatas pada lokasi aplikasi tetapi juga dapat menyebar ke wilayah lain.

Pergerakan residu agrokimia secara vertikal melalui proses leaching relatif terbatas di lahan kering karena ketersediaan air yang rendah. Namun demikian, kejadian hujan intensitas tinggi secara sporadis dapat memicu pergerakan residu ke lapisan tanah yang lebih dalam. Senyawa yang memiliki kelarutan tinggi dalam air lebih rentan mengalami leaching dibandingkan senyawa yang terikat kuat pada partikel tanah. Menurut Ghadiri *et al.* (2015), tekstur tanah dan struktur pori mempengaruhi kecepatan infiltrasi dan pergerakan residu. Risiko pencemaran air tanah tetap ada meskipun frekuensi kejadian leaching relatif rendah. Pemahaman kondisi ini penting untuk mengantisipasi dampak jangka panjang.

Pergerakan horizontal residu melalui limpasan permukaan juga dapat terjadi meskipun lahan kering memiliki intensitas runoff yang lebih rendah. Limpasan biasanya terjadi saat hujan lebat yang melebihi kapasitas infiltrasi tanah. Residu yang terbawa limpasan dapat mencemari badan air di sekitar lahan pertanian. Menurut Tang *et al.* (2012), transport residu melalui runoff merupakan salah satu jalur utama pencemaran perairan di kawasan pertanian. Vegetasi penutup tanah dan struktur tanah berperan dalam mengurangi risiko tersebut. Praktik konservasi tanah menjadi faktor penting dalam mengendalikan pergerakan residu.

Sistem pengolahan tanah seperti tanpa olah tanah (TOT) turut mempengaruhi distribusi residu agrokimia di dalam profil tanah. Sistem TOT cenderung mempertahankan residu pada lapisan permukaan karena minimnya gangguan mekanis. Kondisi ini dapat meningkatkan paparan residu pada organisme permukaan tanah. Menurut Blanco-Canqui dan Ruis (2018), sistem tanpa olah tanah meningkatkan akumulasi bahan organik di permukaan yang mempengaruhi interaksi dengan pestisida. Distribusi residu yang tidak merata ini memiliki implikasi terhadap dinamika hara dan biota tanah. Integrasi antara sistem budidaya dan pengelolaan residu menjadi sangat penting.

Interaksi antara faktor fisik, kimia, dan biologis di lahan kering menyebabkan perilaku residu agrokimia menjadi sangat kompleks. Variasi kondisi lingkungan menyebabkan perbedaan respon residu terhadap proses transformasi dan transport. Menurut Köhler dan Triebkorn (2013), pendekatan ekotoksikologi diperlukan untuk memahami dampak kumulatif residu dalam ekosistem. Kompleksitas ini menuntut adanya pendekatan multidisiplin dalam pengelolaan lahan kering. Pemahaman menyeluruh terhadap dinamika residu menjadi dasar dalam pengembangan sistem pertanian berkelanjutan. Pendekatan tersebut diharapkan mampu meminimalkan risiko lingkungan tanpa mengurangi produktivitas pertanian.

5.3 Dampak Residu Agrokimia terhadap Kualitas Tanah

Kualitas tanah merupakan indikator utama dalam menilai keberlanjutan suatu sistem pertanian, termasuk pada lahan kering. Residu agrokimia yang terakumulasi dalam tanah dapat mempengaruhi berbagai sifat tanah baik secara langsung maupun tidak langsung. Menurut FAO (2017), kualitas tanah mencerminkan kemampuan tanah dalam

mendukung produktivitas tanaman serta menjaga keseimbangan ekosistem. Akumulasi residu dalam jangka panjang berpotensi menurunkan fungsi ekologis tanah. Dampak tersebut tidak hanya terbatas pada aspek kimia, tetapi juga mencakup perubahan fisik dan biologis tanah. Pemahaman terhadap pengaruh residu agrokimia menjadi penting dalam menjaga kualitas tanah secara berkelanjutan.

Perubahan sifat fisik tanah akibat residu agrokimia dapat terlihat pada struktur dan stabilitas agregat tanah. Penggunaan bahan kimia tertentu secara berlebihan dapat mengganggu pembentukan agregat yang stabil. Hal ini berdampak pada menurunnya porositas tanah dan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Menurut Six *et al.* (2004), stabilitas agregat tanah sangat dipengaruhi oleh kandungan bahan organik dan aktivitas mikroorganisme. Residu agrokimia yang menghambat aktivitas biologis akan mempercepat degradasi struktur tanah. Kondisi ini menjadi lebih kritis pada lahan kering yang secara alami memiliki keterbatasan air.

Sifat kimia tanah juga mengalami perubahan akibat keberadaan residu agrokimia, terutama dalam hal pH, kapasitas tukar kation, dan ketersediaan unsur hara. Aplikasi pupuk anorganik yang berlebihan dapat menyebabkan akumulasi ion tertentu yang mengubah keseimbangan kimia tanah. Menurut Guo *et al.* (2010), penggunaan pupuk nitrogen dalam jangka panjang dapat menyebabkan penurunan pH tanah secara signifikan. Perubahan pH tersebut berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Residu pestisida juga dapat berinteraksi dengan ion tanah dan mempengaruhi reaksi kimia yang terjadi. Dampak kumulatif dari perubahan ini dapat menurunkan kesuburan tanah.

Residu agrokimia memberikan dampak signifikan terhadap aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara. Mikroorganisme tanah seperti bakteri dan

fungi memiliki sensitivitas tinggi terhadap senyawa kimia tertentu. Menurut Cycoń *et al.* (2017), paparan pestisida dapat mengurangi keanekaragaman mikroba dan menghambat aktivitas enzimatik tanah. Penurunan aktivitas mikroba berdampak pada terganggunya proses dekomposisi bahan organik. Kondisi ini menyebabkan berkurangnya ketersediaan hara yang dapat diserap oleh tanaman. Perubahan komunitas mikroba juga dapat mempengaruhi stabilitas ekosistem tanah secara keseluruhan.

Keberadaan residu agrokimia juga berpengaruh terhadap organisme tanah makroskopis seperti cacing tanah dan arthropoda. Organisme tersebut memiliki peran penting dalam memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan aerasi. Paparan residu pestisida dapat menyebabkan penurunan populasi organisme tanah non-target. Menurut Pelosi *et al.* (2014), cacing tanah sangat sensitif terhadap kontaminasi pestisida dalam tanah. Penurunan populasi organisme ini berdampak pada berkurangnya aktivitas bioturbasi yang penting bagi kesehatan tanah. Dampak ini semakin memperburuk kondisi tanah pada sistem pertanian intensif.

Interaksi antara residu agrokimia dan bahan organik tanah menentukan tingkat akumulasi dan persistensi senyawa tersebut. Bahan organik berperan sebagai media penyerapan yang dapat mengurangi mobilitas residu. Namun demikian, akumulasi residu pada bahan organik juga dapat memperpanjang keberadaan senyawa tersebut di dalam tanah. Menurut Arias-Estévez *et al.* (2016), interaksi ini bersifat kompleks dan dipengaruhi oleh jenis senyawa serta kondisi lingkungan. Pada lahan kering, kandungan bahan organik yang rendah menyebabkan kapasitas penyerapan menjadi terbatas. Kondisi ini meningkatkan risiko pergerakan residu ke lapisan tanah yang lebih dalam.

Dampak residu agrokimia terhadap kualitas tanah bersifat kumulatif dan jangka panjang sehingga memerlukan

perhatian serius dalam pengelolaannya. Penggunaan agrokimia yang tidak terkendali dapat menyebabkan degradasi tanah yang sulit dipulihkan. Menurut Lal (2015), degradasi tanah akibat aktivitas manusia merupakan salah satu tantangan utama dalam pertanian berkelanjutan. Upaya pengelolaan yang tepat diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara produktivitas dan kelestarian lingkungan. Pendekatan berbasis ekosistem menjadi salah satu solusi dalam mengurangi dampak negatif residu. Integrasi praktik pertanian ramah lingkungan diharapkan mampu menjaga kualitas tanah dalam jangka panjang.

5.4 Dampak terhadap Sumber Daya Air dan Lingkungan Sekitar

Sumber daya air merupakan komponen penting dalam ekosistem pertanian yang sangat rentan terhadap pencemaran residu agrokimia. Residu yang berasal dari aktivitas budidaya dapat masuk ke badan air melalui berbagai jalur seperti limpasan permukaan dan infiltrasi. Menurut Stehle dan Schulz (2015), kontaminasi pestisida di perairan menjadi salah satu isu global yang mengancam kualitas lingkungan. Keberadaan residu dalam air dapat mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik. Dampak tersebut tidak hanya bersifat lokal tetapi juga dapat menyebar ke wilayah yang lebih luas. Pemahaman mengenai jalur masuk residu ke dalam sistem perairan menjadi penting dalam pengelolaan lingkungan.

Limpasan permukaan merupakan salah satu mekanisme utama yang menyebabkan perpindahan residu agrokimia ke badan air. Peristiwa ini umumnya terjadi saat curah hujan tinggi yang melebihi kapasitas infiltrasi tanah. Residu yang berada di permukaan tanah akan terbawa bersama aliran air menuju sungai, danau, atau waduk. Menurut Tang *et al.* (2012), limpasan permukaan berkontribusi signifikan

terhadap peningkatan konsentrasi pestisida di perairan. Intensitas kejadian ini dapat dipengaruhi oleh kemiringan lahan dan kondisi tutupan vegetasi. Pengelolaan lahan yang kurang baik akan meningkatkan risiko terjadinya pencemaran air.

Infiltrasi residu agrokimia ke dalam tanah dapat menyebabkan kontaminasi air tanah yang digunakan sebagai sumber air bersih. Senyawa dengan kelarutan tinggi memiliki potensi besar untuk mencapai lapisan akuifer. Menurut Nolan *et al.* (2014), residu nitrat dari pupuk merupakan salah satu kontaminan utama pada air tanah di wilayah pertanian. Kontaminasi ini berisiko terhadap kesehatan manusia jika dikonsumsi dalam jangka panjang. Lahan kering dengan struktur tanah tertentu tetap memiliki potensi terjadinya pergerakan vertikal residu. Pemantauan kualitas air tanah menjadi langkah penting dalam mengendalikan risiko tersebut.

Residu agrokimia yang masuk ke perairan dapat menyebabkan eutrofikasi yang berdampak pada kualitas ekosistem akuatik. Akumulasi unsur hara seperti nitrogen dan fosfor memicu pertumbuhan alga secara berlebihan. Kondisi ini menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut dalam air. Menurut Smith dan Schindler (2009), eutrofikasi menjadi salah satu penyebab utama degradasi kualitas air di banyak negara. Dampak lanjutan dari kondisi ini adalah kematian organisme akuatik dan terganggunya rantai makanan. Pengendalian input hara menjadi langkah penting dalam menjaga kualitas perairan.

Penyebaran residu agrokimia juga dapat terjadi melalui udara dalam bentuk partikel atau uap yang kemudian terd deposisi ke lingkungan sekitar. Fenomena ini dikenal sebagai spray drift yang sering terjadi saat aplikasi pestisida. Menurut Silva *et al.* (2019), partikel pestisida dapat terbawa angin hingga jarak tertentu dan mencemari area non-target.

Dampak dari penyebaran ini meliputi pencemaran vegetasi alami dan sumber air di sekitar lahan pertanian. Risiko tersebut meningkat pada kondisi lahan terbuka seperti lahan kering. Pengelolaan aplikasi agrokimia yang tepat menjadi kunci dalam meminimalkan dampak terhadap lingkungan sekitar.

5.5 Risiko terhadap Kesehatan Tanaman, Hewan, dan Manusia

Residu agrokimia dalam sistem pertanian tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga berpotensi menimbulkan risiko terhadap organisme hidup termasuk tanaman. Keberadaan residu dalam konsentrasi tertentu dapat menyebabkan gangguan fisiologis pada tanaman. Menurut Carvalho (2017), beberapa pestisida dapat menimbulkan efek fitotoksik yang menghambat pertumbuhan tanaman. Gejala yang muncul meliputi klorosis, nekrosis, serta penurunan laju fotosintesis. Kondisi ini dapat menurunkan produktivitas tanaman secara signifikan. Pemahaman terhadap ambang batas residu menjadi penting dalam menjaga kesehatan tanaman.

Akumulasi residu agrokimia dalam jaringan tanaman juga menjadi perhatian dalam aspek keamanan pangan. Senyawa kimia yang terserap oleh tanaman dapat terakumulasi pada bagian yang dikonsumsi manusia. Menurut Zhang *et al.* (2018), residu pestisida pada produk pertanian seringkali ditemukan melebihi batas aman di beberapa wilayah. Konsumsi jangka panjang terhadap produk yang mengandung residu dapat berdampak pada kesehatan manusia. Risiko tersebut meliputi gangguan sistem saraf, hormon, dan organ vital lainnya. Pengawasan terhadap residu dalam hasil pertanian menjadi bagian penting dari sistem keamanan pangan.

Residu agrokimia juga dapat masuk ke dalam rantai makanan melalui proses bioakumulasi dan biomagnifikasi. Senyawa yang persisten cenderung terakumulasi dalam jaringan organisme dan meningkat konsentrasinya pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Menurut Köhler dan Triebkorn (2013), biomagnifikasi pestisida menjadi salah satu mekanisme utama penyebaran kontaminan dalam ekosistem. Proses ini meningkatkan risiko bagi hewan pemangsa dan manusia sebagai konsumen akhir. Dampak jangka panjang dari akumulasi ini dapat bersifat kronis dan sulit dideteksi pada tahap awal. Pengendalian residu menjadi penting untuk mencegah akumulasi dalam rantai makanan.

Hewan ternak yang berada di sekitar lahan pertanian juga berisiko terpapar residu agrokimia melalui pakan dan air minum. Paparan tersebut dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti penurunan produktivitas, gangguan reproduksi, dan bahkan kematian. Menurut Berny (2007), keracunan pestisida pada hewan domestik sering terjadi akibat konsumsi bahan yang terkontaminasi. Residu yang terakumulasi dalam tubuh ternak juga dapat berpindah ke produk hewani seperti daging dan susu. Kondisi ini berpotensi memperluas dampak residu ke manusia sebagai konsumen. Pengelolaan lingkungan peternakan yang terintegrasi menjadi penting dalam mengurangi risiko tersebut.

Paparan residu agrokimia terhadap manusia dapat terjadi melalui berbagai jalur seperti konsumsi pangan, inhalasi, dan kontak langsung dengan kulit. Pekerja pertanian merupakan kelompok yang paling rentan terhadap paparan langsung bahan kimia. Menurut Damalas dan Eleftherohorinos (2011), penggunaan pestisida tanpa alat pelindung diri meningkatkan risiko keracunan akut dan kronis. Gejala paparan dapat berupa iritasi kulit, gangguan pernapasan, serta efek neurologis. Paparan jangka panjang bahkan dikaitkan dengan penyakit degeneratif seperti

kanker. Kesadaran dan edukasi mengenai penggunaan agrokimia yang aman menjadi sangat penting.

Risiko kesehatan yang ditimbulkan oleh residu agrokimia bersifat kompleks dan melibatkan interaksi berbagai faktor lingkungan dan biologis. Tingkat risiko dipengaruhi oleh jenis senyawa, dosis paparan, serta durasi kontak dengan organisme. Menurut WHO (2020), pendekatan penilaian risiko diperlukan untuk memahami dampak paparan residu terhadap kesehatan manusia. Upaya mitigasi harus dilakukan secara terpadu melalui regulasi, edukasi, dan penerapan praktik pertanian yang baik. Pendekatan ini bertujuan untuk melindungi kesehatan manusia tanpa mengurangi produktivitas pertanian. Integrasi aspek kesehatan dalam pengelolaan pertanian menjadi bagian penting dari sistem berkelanjutan.

5.6 Indikator dan Metode Evaluasi Pencemaran Residu Agrokimia

Evaluasi pencemaran residu agrokimia memerlukan pendekatan yang sistematis melalui penggunaan indikator lingkungan yang relevan. Indikator tersebut berfungsi untuk mengukur tingkat kontaminasi serta dampaknya terhadap komponen ekosistem. Menurut Li *et al.* (2017), indikator kualitas lingkungan dapat digunakan untuk menilai keberlanjutan sistem pertanian secara kuantitatif. Indikator yang baik harus sensitif terhadap perubahan lingkungan dan mudah diukur. Penggunaan indikator menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pengelolaan lahan. Pendekatan ini penting untuk mendukung pertanian berkelanjutan.

Indikator kualitas tanah menjadi salah satu parameter utama dalam mengevaluasi residu agrokimia. Parameter yang umum digunakan meliputi pH tanah, kandungan bahan organik, serta aktivitas enzim tanah. Menurut Doran dan

Zeiss (2000), kualitas tanah dapat dinilai melalui kombinasi indikator fisik, kimia, dan biologis. Residu agrokimia dapat menyebabkan perubahan pada parameter tersebut dalam jangka panjang. Penurunan aktivitas enzim tanah menunjukkan adanya gangguan terhadap proses biologis. Pemantauan indikator ini penting untuk menjaga fungsi tanah tetap optimal.

Indikator kualitas air juga digunakan untuk mendeteksi keberadaan residu agrokimia di lingkungan perairan. Parameter yang diamati meliputi kandungan nitrat, fosfat, serta konsentrasi pestisida dalam air. Menurut Giri dan Qiu (2016), analisis kualitas air menjadi metode efektif untuk mengidentifikasi sumber pencemaran dari aktivitas pertanian. Peningkatan konsentrasi nutrisi dalam air dapat mengindikasikan adanya limpasan pupuk. Residu pestisida dalam air juga dapat diukur untuk mengetahui tingkat kontaminasi. Data ini menjadi dasar dalam pengelolaan sumber daya air.

Metode analisis laboratorium digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi residu agrokimia secara akurat. Teknik seperti kromatografi gas (GC) dan kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC) sering digunakan dalam analisis residu. Menurut Alder *et al.* (2006), metode kromatografi memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi senyawa kimia dalam jumlah kecil. Penggunaan alat ini memungkinkan identifikasi berbagai jenis residu secara simultan. Hasil analisis laboratorium memberikan data kuantitatif yang akurat. Data tersebut sangat penting dalam evaluasi pencemaran.

Pendekatan bioindikator juga digunakan untuk menilai dampak residu agrokimia terhadap lingkungan. Organisme seperti mikroba tanah, cacing tanah, dan tanaman tertentu dapat digunakan sebagai indikator biologis. Menurut van der Oost *et al.* (2003), bioindikator mampu mencerminkan

kondisi lingkungan secara integratif. Perubahan populasi atau aktivitas organisme tersebut dapat menunjukkan adanya pencemaran. Bioindikator memberikan informasi yang tidak selalu dapat diperoleh melalui analisis kimia. Pendekatan ini semakin banyak digunakan dalam studi ekologi.

Indeks kualitas lingkungan merupakan metode yang mengintegrasikan berbagai indikator menjadi satu nilai komprehensif. Indeks ini digunakan untuk mempermudah interpretasi data dan komunikasi hasil evaluasi. Menurut Sánchez-Bayo *et al.* (2016), penggunaan indeks kualitas lingkungan dapat membantu dalam pemantauan dampak pestisida secara luas. Indeks ini menggabungkan data fisik, kimia, dan biologis dalam satu kerangka analisis. Hasil indeks dapat digunakan untuk membandingkan kondisi antar lokasi. Pendekatan ini memudahkan pengambilan keputusan berbasis data.

Pendekatan penilaian risiko lingkungan menjadi bagian penting dalam evaluasi residu agrokimia. Penilaian ini melibatkan identifikasi bahaya, analisis paparan, dan karakterisasi risiko. Menurut USEPA (2018), penilaian risiko digunakan untuk menentukan tingkat ancaman terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Metode ini membantu dalam menentukan batas aman penggunaan agrokimia. Penilaian risiko juga digunakan dalam penyusunan regulasi lingkungan. Pendekatan ini memberikan dasar ilmiah dalam pengelolaan residu.

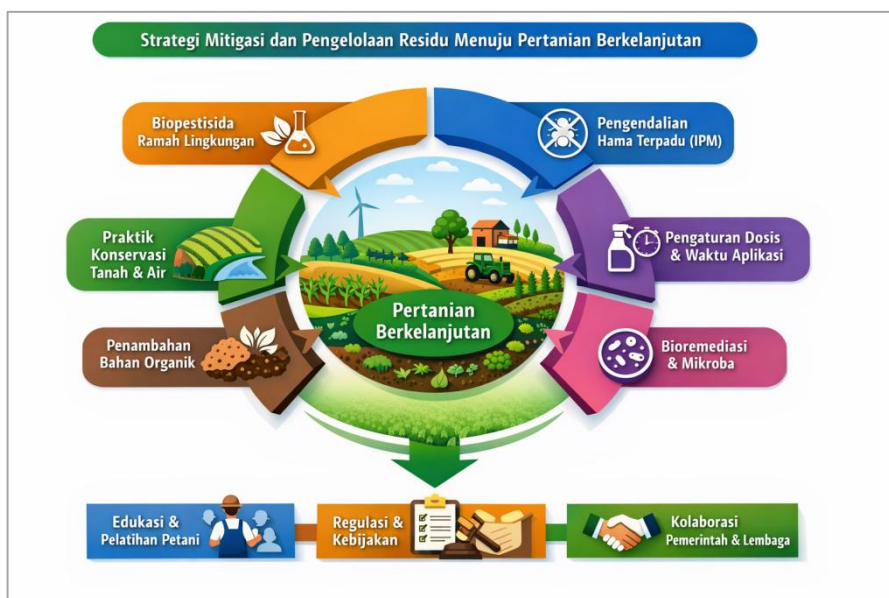
Pemanfaatan teknologi modern seperti pemodelan dan sistem informasi geografis (SIG) semakin berkembang dalam evaluasi pencemaran. Teknologi ini memungkinkan analisis spasial distribusi residu agrokimia di suatu wilayah. Menurut Zhang *et al.* (2019), penggunaan SIG dapat meningkatkan akurasi dalam pemetaan risiko pencemaran lingkungan. Model prediktif juga dapat digunakan untuk memperkirakan

pergerakan residu di masa depan. Integrasi teknologi ini memberikan pendekatan yang lebih komprehensif. Penggunaan teknologi modern mendukung pengelolaan yang lebih efektif.

Evaluasi pencemaran residu agrokimia memerlukan integrasi berbagai metode untuk mendapatkan gambaran yang utuh. Kombinasi antara indikator, analisis laboratorium, bioindikator, dan penilaian risiko memberikan hasil yang lebih akurat. Menurut Köhler dan Triebkorn (2013), pendekatan multidisiplin diperlukan untuk memahami dampak kompleks residu dalam ekosistem. Integrasi metode ini memungkinkan identifikasi masalah secara lebih tepat. Hasil evaluasi dapat digunakan sebagai dasar dalam perumusan kebijakan. Pendekatan yang komprehensif menjadi kunci dalam pengelolaan lingkungan berkelanjutan.

5.7 Strategi Mitigasi dan Pengelolaan Residu menuju Pertanian Berkelanjutan

Strategi mitigasi residu agrokimia menjadi bagian penting dalam upaya mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan. Pengelolaan yang tepat diperlukan untuk mengurangi akumulasi residu di lingkungan tanpa mengurangi produktivitas tanaman. Menurut Tilman *et al.* (2011), pertanian berkelanjutan harus mampu menyeimbangkan antara kebutuhan produksi dan perlindungan lingkungan. Upaya mitigasi harus dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan kondisi agroekosistem setempat. Pendekatan ini sangat relevan untuk lahan kering yang memiliki keterbatasan sumber daya. Strategi yang efektif akan mendukung keberlanjutan sistem pertanian dalam jangka panjang.



Gambar 5.2 Strategi Mitigasi dan Pengelolaan Residu Menuju Pertanian Berkelanjutan

Penggunaan pestisida ramah lingkungan seperti biopestisida menjadi salah satu alternatif dalam mengurangi residu agrokimia. Biopestisida berasal dari bahan alami yang lebih mudah terdegradasi di lingkungan. Menurut Isman (2017), biopestisida memiliki risiko lingkungan yang lebih rendah dibandingkan pestisida sintetis. Penggunaan bahan ini dapat menekan populasi hama tanpa meninggalkan residu berbahaya. Efektivitas biopestisida juga dapat ditingkatkan melalui formulasi yang tepat. Integrasi biopestisida dalam sistem budidaya menjadi langkah penting dalam pengelolaan residu.

Penerapan konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT) atau Integrated Pest Management (IPM) merupakan strategi utama dalam mengurangi ketergantungan terhadap agrokimia. Pendekatan ini mengombinasikan metode

biologis, mekanis, dan kimia secara selektif. Menurut FAO (2018), IPM mampu menekan penggunaan pestisida hingga tingkat minimal tanpa mengurangi hasil panen. Penggunaan pestisida hanya dilakukan jika populasi hama mencapai ambang ekonomi. Pendekatan ini membantu mengurangi akumulasi residu di lingkungan. Implementasi IPM menjadi bagian penting dalam pertanian berkelanjutan.

Pengelolaan dosis dan waktu aplikasi agrokimia juga berperan dalam mengendalikan residu. Aplikasi yang tepat sasaran dan sesuai kebutuhan tanaman dapat meningkatkan efisiensi penggunaan bahan kimia. Menurut Damalas dan Koutroubas (2016), penggunaan pestisida yang berlebihan seringkali disebabkan oleh kurangnya informasi dan pelatihan petani. Penyesuaian dosis berdasarkan kondisi lapangan dapat mengurangi risiko pencemaran. Waktu aplikasi yang tepat juga dapat meminimalkan kehilangan akibat volatilisasi dan limpasan. Praktik ini menjadi bagian dari pengelolaan agrokimia yang bijaksana.

Penambahan bahan organik ke dalam tanah merupakan strategi penting dalam mengurangi dampak residu agrokimia. Bahan organik dapat meningkatkan kapasitas tanah dalam mengadsorpsi senyawa kimia. Menurut Lehmann dan Joseph (2015), bahan organik seperti biochar mampu meningkatkan retensi pestisida dalam tanah. Kondisi ini membantu mengurangi mobilitas residu ke lingkungan sekitar. Selain itu, bahan organik juga meningkatkan aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam degradasi residu. Pendekatan ini memberikan manfaat ganda bagi kualitas tanah dan lingkungan.

Bioremediasi merupakan teknologi yang memanfaatkan organisme hidup untuk menguraikan residu agrokimia di lingkungan. Mikroorganisme tertentu memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa kimia menjadi bentuk yang lebih aman. Menurut Cycoń *et al.* (2017), bioremediasi

menjadi metode yang efektif dan ramah lingkungan dalam mengatasi pencemaran tanah. Proses ini dapat dilakukan melalui peningkatan aktivitas mikroba alami atau penambahan mikroba spesifik. Efektivitas bioremediasi dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban. Teknologi ini semakin banyak dikembangkan dalam pengelolaan lahan pertanian.

Penerapan praktik konservasi tanah dan air juga berkontribusi dalam mengurangi penyebaran residu agrokimia. Teknik seperti penanaman vegetasi penutup tanah dan pengelolaan mulsa dapat mengurangi limpasan permukaan. Menurut Blanco-Canqui *et al.* (2015), praktik konservasi mampu meningkatkan infiltrasi dan mengurangi erosi tanah. Pengurangan limpasan akan menekan perpindahan residu ke badan air. Praktik ini sangat penting pada lahan kering yang rentan terhadap degradasi. Integrasi konservasi tanah menjadi bagian penting dalam strategi mitigasi.

Pengelolaan residu agrokimia memerlukan pendekatan terpadu yang melibatkan aspek teknis, sosial, dan kebijakan. Edukasi petani mengenai penggunaan agrokimia yang bijak menjadi faktor kunci dalam keberhasilan mitigasi. Menurut Pretty dan Bharucha (2015), perubahan perilaku petani berperan penting dalam keberhasilan pertanian berkelanjutan. Regulasi yang ketat juga diperlukan untuk mengontrol penggunaan bahan kimia berbahaya. Kolaborasi antara pemerintah, peneliti, dan petani menjadi sangat penting. Pendekatan terpadu ini diharapkan mampu menciptakan sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alder, L., Greulich, K., Kempe, G., & Vieth, B. (2006). Residue analysis of 500 high priority pesticides: Better by GC-MS or LC-MS/MS? *Mass Spectrometry Reviews*, 25(6), 838–865.
- Arias-Estévez, M., López-Periago, E., Martínez-Carballo, E., Simal-Gándara, J., Mejuto, J. C., & García-Río, L. (2016). The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(4), 247–260.
- Bedos, C., Cellier, P., Calvet, R., Barriuso, E., & Gabrielle, B. (2018). Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 22(1), 21–33.
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., & Hergert, G. W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6), 2449–2474.
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48–60.
- Cycoń, M., Mroziak, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2017). Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review. *Chemosphere*, 172, 52–71.
- Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1402–1419.

- Damalas, C. A., & Koutroubas, S. D. (2016). Farmers' exposure to pesticides: Toxicity types and ways of prevention. *Toxics*, 4(1), 1–10.
- FAO. (2017). *Soil pollution: A hidden reality*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2018). *Integrated pest management guidelines*. Food and Agriculture Organization.
- Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L. P., & Elsner, M. (2013). Evaluating pesticide degradation in the environment: Blind spots and emerging opportunities. *Science*, 341(6147), 752–758.
- Ghadiri, H., Rose, C. W., & Connell, L. D. (2015). Pesticide transport in runoff and erosion. *Journal of Environmental Quality*, 44(1), 123–134.
- Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century. *Journal of Environmental Management*, 173, 41–48.
- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., & Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008–1010.
- Isman, M. B. (2017). Bridging the gap: Moving botanical insecticides from the laboratory to the farm. *Industrial Crops and Products*, 110, 10–14.
- Köhler, H. R., & Triebskorn, R. (2013). Wildlife ecotoxicology of pesticides. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 48(6), 381–391.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science and technology*. Routledge.

- Li, Y., Chen, B., Chen, G. Q., & Hayat, T. (2017). Ecological network analysis for water pollution control. *Ecological Modelling*, 346, 1–9.
- Nolan, B. T., Hitt, K. J., & Ruddy, B. C. (2014). Probability of nitrate contamination of recently recharged groundwaters. *Environmental Science & Technology*, 36(10), 2138–2145.
- Pelosi, C., Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M., & Vandenbulcke, F. (2014). Pesticides and earthworms. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 199–228.
- Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2015). Pesticide productivity and food security. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 243–255.
- Pretty, J., & Bharucha, Z. P. (2015). Integrated pest management for sustainable intensification. *Agricultural Systems*, 177, 102–113.
- Sánchez-Bayo, F., Wyckhuys, K. A. G., & others. (2016). Ecological impacts of pesticides. *Science of the Total Environment*, 556, 1–12.
- Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 653, 1532–1545.
- Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(4), 201–207.
- Stehle, S., & Schulz, R. (2015). Agricultural insecticides threaten surface waters. *PNAS*, 112(18), 5750–5755.
- Tang, X., Zhu, B., Katou, H., & others. (2012). Transport of pesticides via runoff. *Environmental Pollution*, 159(1), 245–252.

- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and sustainable intensification. *PNAS*, 108(50), 20260–20264.
- USEPA. (2018). *Guidelines for ecological risk assessment*. United States Environmental Protection Agency.
- WHO. (2020). *Pesticide residues in food: Risk assessment*. World Health Organization.
- Zhang, C., Hu, R., Shi, G., Jin, Y., Robson, M. G., & Huang, X. (2018). Overuse or underuse? An observation of pesticide use in China. *Science of the Total Environment*, 538, 1–6.
- Zhang, X., Liu, M., Zhao, X., & others. (2019). GIS-based environmental risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3), 1–15.

BAB 6

PENGELOLAAN HARA DAN PERTANIAN EKOLOGIKAL

Oleh Zulzain Ilahude

Lahan kering memegang peranan penting dalam mendukung agenda pertanian berkelanjutan di wilayah tropis. Kawasan ini menjadi tumpuan utama bagi produksi tanaman pangan, hortikultura, perkebunan rakyat, hingga sistem agroforestri (Prager *et al.*, 2022). Kendati demikian, optimalisasi lahan kering tidak dapat disamakan dengan lahan basah yang sekadar bertumpu pada ekspansi areal dan intensifikasi input kimia. Lahan kering merupakan potret ekosistem yang rapuh dengan berbagai faktor pembatas biofisik yang kompleks.

Kendala utama yang sering dihadapi meliputi kelangkaan air, defisiensi hara, laju degradasi bahan organik yang cepat, kerentanan erosi yang tinggi, serta keterbatasan adopsi teknologi konservasi oleh petani (Stewart *et al.*, 2020). Oleh sebab itu, keberlanjutan produktivitas lahan kering sangat bergantung pada strategi pengelolaan hara terpadu yang adaptif (Lal, 2015).

6.1 Dinamika Fisiologis dan Peran Unsur Hara

Aspek strategis dari pengelolaan hara terletak pada fungsinya dalam menopang metabolisme, pembelahan sel, dan akumulasi biomassa tanaman demi mencapai target produksi yang optimal. Tanaman memerlukan kombinasi hara makro (N, P, K, Ca, Mg, S) dan mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl) yang seimbang, di mana masing-masing unsur memiliki peran fisiologis yang spesifik.

Nitrogen mengontrol sintesis protein dan pembentukan klorofil, sedangkan fosfor menjadi motor dalam transfer energi (ATP) serta arsitektur perakaran (Marschner, 2012). Sementara itu, kalium bertindak sebagai pengatur osmotik, aktivator enzim, dan pembentuk sistem imun tanaman terhadap cekaman biotik maupun abiotik (Brady & Weil, 2016). Ketidakseimbangan pasokan hara tidak hanya menghambat pertumbuhan vegetatif dan generatif, tetapi juga menurunkan efisiensi penggunaan air oleh tanaman secara drastis (Kätterer, T, 2021).

6.2 Interaksi Air dan Ketersediaan Hara

Pada agroekosistem lahan kering, dinamika air tanah memegang kendali penuh atas efektivitas serapan nutrisi. Air berfungsi sebagai media pelarut sekaligus penggerak utama hara menuju permukaan akar melalui mekanisme aliran massa (mass flow) dan difusi (Siddique *et al.*, 2021). Ketika kadar air tanah berada di bawah titik kapasitas lapang, laju difusi hara melambat, sehingga tanaman tetap mengalami defisiensi meskipun status hara di dalam tanah tergolong tinggi. Kondisi tanah yang kering dan padat juga membatasi penetrasi serta proliferasi akar terhalang.

Akibatnya, efisiensi pemupukan menjadi sangat rendah. Fenomena ini menegaskan bahwa aplikasi pupuk di lahan kering wajib diintegrasikan dengan pemanenan air (water

harvesting), pembenahan struktur fisik tanah, dan peningkatan kapasitas retensi air (FAO, 2017).

6.3 Peran Multidimensi Bahan Organik Tanah

Akar permasalahan rendahnya kesuburan lahan kering umumnya bermuara pada minimnya kandungan Bahan Organik Tanah (BOT), rendahnya Kapasitas Tukar Kation (KTK), reaksi tanah yang masam, serta rendahnya aktivitas biologis tanah. BOT memegang peran krusial sebagai pilar utama kesuburan tanah dari tiga dimensi interdisipliner:

Sifat Fisik: BOT berperan sebagai agen pengikat dalam pembentukan agregat tanah mantap, meningkatkan porositas, dan meningkatkan daya pegang air (water holding capacity) (Kätterer *et al.*, 2021).

Sifat Kimia: BOT berkontribusi nyata terhadap peningkatan KTK melalui penyediaan gugus fungsional bermuatan negatif, menyediakan hara makro-mikro secara perlahan (slow release), serta memitigasi fluktuasi pH tanah (fungsional buffer) (Lal, 2015).

Sifat Biologi: BOT menjadi substrat energi bagi mikroorganisme tanah yang menggerakkan siklus biogeokimia, proses dekomposisi, dan mineralisasi hara (Bot & Benites, 2005). Peran bahan organik tanah dalam kesuburan tanah ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 6. 1 Peran Bahan Organik Tanah
(Sumber ; Penulis, ilustrasi ChatGPT, 07 Mei 2026)

6.4 Degradasi Lahan Akibat Erosi dan Malapraktik Budidaya

Kerentanan lahan kering terhadap erosi, khususnya pada topografi miring tanpa vegetasi penutup, memperparah penurunan kualitas tanah. Erosi secara selektif mengangkut partikel tanah halus di lapisan atas (topsoil) yang kaya akan hara, bahan organik, dan mikroba menguntungkan (Alewell *et al.*, 2020). Kehilangan lapisan topsoil berakibat pada pendangkalan solum tanah efektif dan hilangnya kapasitas retensi air. Kondisi ini diperparah oleh kendala sosio-teknis di tingkat petani, seperti maraknya pembakaran residu tanaman, pengolahan tanah intensif (konvensional tillage), pemupukan yang tidak rasional, serta minimnya penerapan

konservasi mekanis seperti guludan atau penanaman searah kontur (Iqbal *et al.*, 2020).

Pembakaran sisa panen demi pembersihan lahan instan justru memutus siklus hara internal dan memicu emisi karbon ke atmosfer. Sebagai solusinya, paradigma agroekologi modern sangat menekankan retensi residu tanaman di permukaan tanah guna menjaga stabilitas suhu dan kelembapan makro (Gliessman, 2015).

6.5 Rekonseptualisasi Manajemen Hara dan Intervensi Konservasi

Strategi pemulihan hara lahan kering tidak dapat bertumpu secara eksklusif pada pupuk anorganik sintetis. Walau mampu menyediakan hara dalam waktu singkat, efisiensi pupuk kimia tanpa disertai aplikasi bahan organik akan menurun drastis akibat pencucian (leaching), volatilisasi, atau fiksasi oleh mineral liat tanah (Vanlauwe *et al.*, 2015). Pendekatan yang ideal adalah melalui Pengelolaan Kesuburan Tanah Terpadu (PKTT). PKTT mengombinasikan pupuk kimia dosis rasional, pupuk organik, penggunaan varietas adaptif cekaman kekeringan, dan optimalisasi kearifan lokal. Mengingat heterogenitas karakteristik tanah yang tinggi (tanah pasir vs tanah liat; tanah masam vs tanah netral), formulasi pemupukan wajib didasarkan pada uji tanah spesifik lokasi dan kondisi topografi setempat (FAO, 2017).

Secara praktis, aplikasi mulsa organik (seperti jerami, serasah, atau batang jagung) terbukti efektif menekan evaporasi, mereduksi energi kinetik air hujan penyebab erosi, meningkatkan infiltrasi, dan menyumbang BOT pasca-dekomposisi (Kader *et al.*, 2019). Pada lahan berlereng, rekayasa teknik konservasi tanah dan air seperti pembuatan rorak, teras bangku, guludan kontur, dan penanaman

tanaman pagar (hedgerows) menjadi prasyarat mutlak agar hara yang diaplikasikan tidak hanyut terbawa aliran permukaan (runoff) (Arsyad, 2010).

6.6 Implementasi Sistem Agroekologi Terintegrasi

Lahan kering dipandang sebagai satu kesatuan ekosistem holistik (Altieri, 2018). Salah satu bentuk nyata dari implementasi ini adalah Sistem Integrasi Tanaman-Ternak (SITT). Melalui SITT, kotoran ternak (sapi, kambing, atau ayam) diproses melalui dekomposisi atau fermentasi matang guna mengeliminasi patogen dan biji gulma sebelum diaplikasikan ke lahan pertanian sebagai pupuk organik berkualitas (Pan *et al.*, 2022).

Selain itu, integrasi tanaman legum sebagai tanaman sela (intercropping) atau tanaman penutup tanah (cover crops) pada budidaya komoditas utama (seperti jagung atau singkong) mampu menstimulasi fiksasi nitrogen biologis secara simbiotik dengan bakteri *Rhizobium* (Stagnari *et al.*, 2017). Pola ini menciptakan sistem pertanian melingkar (circular farming) yang meminimalkan ketergantungan pada input sintetis eksternal yang mahal.

6.7 Konsep Dasar Pengelolaan Hara

Pengelolaan hara merupakan pilar fundamental dalam manajemen kesuburan tanah karena berkorelasi langsung dengan kapasitas solum tanah dalam menyuplai unsur esensial bagi metabolisme, transpirasi, dan produktivitas tanaman. Hara tanaman dikategorikan sebagai agen biokimia mutlak yang mengendalikan pembelahan jaringan, regulasi osmotik, efisiensi fotosintesis, dan pembentukan organ reproduktif (Zhao *et al.*, 2024).

Pada agroekosistem lahan kering, paradigma pengelolaan hara harus digeser dari sekadar introduksi pupuk sintetik menjadi sebuah strategi komprehensif. Strategi ini mencakup preservasi cadangan hara di zona perakaran, augmentasi efisiensi serapan akar, mitigasi pelindian (leaching) serta erosi, serta aktivasi siklus hara internal berbasis bahan organik dan agen biologis tanah (Teng *et al.*, 2024).

6.7.1 Klasifikasi Agronomis dan Prinsip Esensialitas Hara

Secara agronomis, kebutuhan nutrisi tanaman dibedakan menjadi makroelemen dan mikroelemen berdasarkan konsentrasi yang diperlukan di dalam jaringan. Hara Makro Primer (N, P, K): Unsur yang paling masif diserap tanaman dan kerap menjadi faktor pembatas (limiting factor) utama dalam penentuan crop yield. Hara Makro Sekunder (Ca, Mg, S): Meskipun dikategorikan sebagai hara "sekunder", unsur-unsur ini tetap bersifat mutlak karena menyusun integritas dinding sel, menjadi inti klorofil, dan mengaktivasi sintesis protein (Kumari *et al.*, 2022).

Hara Mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo): Dibutuhkan dalam jumlah kelumit (trace amount), namun memiliki spesifisitas fungsi yang tidak dapat digantikan oleh unsur lain (Gupta *et al.*, 2024). Berdasarkan hukum esensialitas hara, defisiensi salah satu unsur mikro—seperti seng (Zn) atau boron (B)—akan mengacaukan jalur enzimatik, sintesis klorofil, serta menekan tingkat keberhasilan fertilisasi tanaman generatif dan fiksasi nitrogen biologis pada famili Fabaceae (Dai *et al.*, 2023).

6.7.2 Karakteristik Fisiologis dan Pola Kehilangan Hara Makro

Setiap unsur hara makro memiliki perilaku biokimia yang khas di dalam sistem tanah-tanaman:

1. Nitrogen (N): Bertindak sebagai penyusun utama asam amino, asam nukleat, dan klorofil. Pasokan N yang optimal memicu performa vegetatif dan memperluas arsitektur kanopi (Das *et al.*, 2022). Namun, N sangat labil di lahan kering dan rentan hilang melalui volatilisasi amonia (NH_3) pada pH tinggi, denitrifikasi saat terjadi penjenhuan air temporer, serta pelindian nitrat (NO_3^-) (Seghouani *et al.*, 2024).
2. Fosfor (P): Berperan vital dalam transfer energi seluler (adenosin trifosfat/ATP) dan proliferasi akar. Di tanah tropis, ketersediaan P mengalami kendala berat akibat fiksasi kimiawi oleh oksida besi (Fe) dan aluminium (Al) pada tanah masam, atau oleh kalsium (Ca) pada tanah alkalis. Oleh sebab itu, total P tanah yang tinggi tidak menjamin ketersediaan fraksi P-tersedia bagi akar (Zhao *et al.*, 2024).
3. Kalium (K): Berfungsi mengontrol turgor sel, mekanisme pembukaan-penutupan stomata, dan translokasi fotosintat. Kalium menjadi determinan utama ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan (drought stress) (Kumari *et al.*, 2022). Kehilangan K umumnya dipicu oleh pengangkutan biomassa saat panen tanpa pengembalian residu, serta pelindian pada tanah bertekstur pasir dengan Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang rendah (Das *et al.*, 2022).



Gambar 6. 2 Dinamika Hara Makro Primer
Sumber : Penulis; ilustrasi ChatGpt, 06 Juni 2026

6.7.3 Peran Multidimensi Ca, Mg, S, dan Mikroelemen

Kalsium (Ca) esensial dalam menjaga rigiditas dinding sel dan stabilitas membran plasma, di mana ketiadaannya akan menghentikan pertumbuhan meristem ujung akar. Magnesium (Mg) merupakan atom pusat dari struktur molekul klorofil yang mengatur penangkapan foton dalam fotosintesis. Sementara itu, sulfur (S) mengontrol sintesis asam amino esensial seperti sistein dan metionin (Kumari *et al.*, 2022).

Pada skala mikro, besi (Fe) dan mangan (Mn) menggerakkan sistem transfer elektron dalam respirasi dan fotolisis air. Seng (Zn) memicu sintesis auksin

(hormon pertumbuhan), tembaga (Cu) menginduksi lignifikasi dinding sel, sedangkan molibdenum (Mo) menjadi kofaktor krusial bagi enzim nitrat reduktase dan nitrogenase yang mengontrol asimilasi N (Gupta *et al.*, 2024).

6.7.4 Interaksi Matriks Tanah, Air, dan Mikrobioma

Ketersediaan nutrisi di lahan kering tidak hanya ditentukan oleh kuantitas absolut hara, melainkan dikendalikan oleh interaksi multi-faktor yang meliputi pH, suhu, kadar air, KTK, dan aktivitas biologis rhizosfer (Das *et al.*, 2022). Air bertindak sebagai fase cair pelarut ion hara (NO_3^- , NH_4^+ , H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) agar dapat bergerak menuju permukaan akar via difusi dan aliran massa (Teng *et al.*, 2024).

Saat kadar air tanah anjlok, konektivitas pori terputus, membatasi difusi hara, dan menghambat pemanjangan akar. Di samping itu, Bahan Organik Tanah (BOT) bertindak sebagai depot nutrisi yang dilepaskan secara bertahap melalui proses mineralisasi yang dimediasi oleh mikrobioma tanah. Riset mutakhir mengonfirmasi bahwa ketersediaan hara mikro logam (Fe, Mn, Zn, Cu) memiliki hubungan timbal balik dengan diversitas dan fungsionalitas struktur mikrobioma rhizosfer, yang membantu sekresi siderofor dan asam organik untuk melarutkan hara terfiksasi (Dai *et al.*, 2023).

6.7.5 Prinsip Keseimbangan Hara

Implementasi pengelolaan hara wajib mengacu pada prinsip stoikiometri dan hukum minimum Liebig. Tanaman memerlukan kombinasi nutrisi dalam proporsi yang berimbang; aplikasi satu jenis hara secara berlebihan tidak akan mengekspresikan potensial hasil jika hara lainnya berada dalam kondisi sub-optimal

(Seghouani *et al.*, 2024). Di lahan kering tropis, tanaman sering kali tidak hanya menghadapi keterbatasan tunggal, melainkan keterbatasan ganda (co-limitation) seperti defisiensi N dan P secara simultan (Das *et al.*, 2022).

Praktik pemupukan oleh petani yang didominasi oleh aplikasi urea secara tunggal karena mengejar efek visual "hijau daun" secara instan memicu deplesi hara lain P, K, S, dan hara mikro) secara masif akibat fenomena pengurasan hara tersembunyi (nutrient mining) (Zhao *et al.*, 2024). Pengelolaan hara yang rasional harus ditegakkan berdasarkan diagnosis riil melalui uji tanah (soil testing) dan analisis jaringan tanaman (Kumari *et al.*, 2022).

6.7.5 Aplikasi Taktis pada Sistem Monokultur dan Polikultur

Pada budidaya monokultur jagung di lahan miring, aplikasi pupuk nitrogen sintetis yang masif tanpa asupan bahan organik dan teknik konservasi akan berujung pada kegagalan panen akibat degradasi fisik tanah dan pencucian hara. Strategi mitigasi yang presisi dilakukan dengan penempatan pupuk fosfat di dekat benih (band placement) pada fase awal untuk menstimulasi perakaran, pengembalian serasah jagung sebagai mulsa penekan evaporasi, dan pembuatan teras kontur (Teng *et al.*, 2024).

Sementara pada sistem polikultur (tumpangsari jagung dan kacang tanah), pengelolaan hara diarahkan untuk mengoptimalkan fiksasi nitrogen biologis (BNF) oleh legum. Dengan menjaga kecukupan pasokan P, Mo, dan aplikasi mulsa untuk retensi air, kacang tanah dapat menyuplai fraksi N bagi tanaman jagung di sekitarnya,

sehingga menekan input pupuk komersial (Seghouani *et al.*, 2024; Dai *et al.*, 2023).

6.7.6 Investasi Kesuburan Jangka Panjang dan Implementasi 5 Tepat

Kesuburan tanah lahan kering harus dipandang sebagai aset jangka panjang, bukan sekadar variabel biaya produksi musiman. Pemodelan simulasi jangka panjang menunjukkan bahwa dinamika karbon organik, nitrogen, dan fosfor dalam tanah saling mengunci dan sangat dipengaruhi oleh fluktuasi iklim (Janes-Bassett *et al.*, 2020). Penutupan lahan yang kontinu tanpa substitusi hara yang seimbang akan memicu kebangkrutan hara tanah (soil nutrient bankruptcy).

Secara operasional di lapangan, konsep dasar ini dikonkretkan melalui Lima Langkah Tepat (5T) yang tersaji dalam tabel berikut:



Lima Langkah Tepat (5T)



No.	Tahapan Operasional	Implementasi Teknis	Output Keberlanjutan
1.	 Diagnosis Status Hara	Uji tanah berkala (laboratorium atau PUTK).	 Mengeliminasi spekulasi dosis pupuk.
2.	 Identifikasi Kebutuhan	Penyesuaian hara berdasarkan fase pertumbuhan tanaman.	 Sinkronisasi antara demand tanaman dan supply tanah.
3.	 Seleksi Sumber Hara	Kombinasi pupuk anorganik, organik, dan pupuk hayati.	 Perbaikan sifat kimia, fisik, dan biologi tanah secara simultan.
4.	 Aplikasi Presisi (5 Tepat)	Tepat Jenis, Tepat Dosis, Tepat Waktu, Tepat Cara, Tepat Tempat.	 Meminimalkan volatilitas, pelindian, dan fiksasi hara.
5.	 Monitoring & Evaluasi	Analisis efisiensi agronomi dan analisis ekonomi pasca-panen.	 Rekalibrasi rekomendasi pemupukan untuk musim berikutnya.



5T: Tepat Diagnosis, Tepat Rekomendasi, Tepat Sumber, Tepat Aplikasi, Tepat Evaluasi

Gambar 6. 3 Implementasi Kesubutan Tanah dengan 5T
Sumber : Peneliti, ilustrasi ChatGPT, 6 Juni 2026

6.8 Bahan Organik dalam Pengelolaan Hara

Bahan Organik Tanah (BOT) merupakan pilar fundamental dalam tata kelola nutrisi pada agroekosistem lahan kering tropis. Pada sistem yang rentan ini, BOT tidak sekadar bertindak sebagai penyedia unsur hara esensial, melainkan berfungsi sebagai regulator multidimensi yang mengontrol sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Zhao *et al.*, 2024). Tanah dengan kandungan BOT yang memadai mengindikasikan kapasitas retensi air yang tinggi, kemampuan menyerap hara yang optimal, pembentukan agregat yang mantap, proliferasi perakaran yang intensif, serta stimulasi aktivitas mikrobioma tanah (Liu *et al.*, 2023).

Oleh karena itu, restorasi hara lahan kering mustahil dicapai tanpa upaya preventif dan kuratif dalam memelihara cadangan BOT. Urgensi ini didasarkan pada fakta biofisik bahwa wilayah lahan kering umumnya mengalami deplesi BOT akut yang dipicu oleh rendahnya produksi biomassa alami, tingginya suhu tanah yang mempercepat mineralisasi, erosi intensif, serta malapraktik budidaya seperti pembakaran residu insitu (Stewart *et al.*, 2020).

6.8.1 Dinamika Fraksi Karbon Tanah dan Implikasi Fungsi Sifat Tanah

Bahan Organik Tanah diklasifikasikan ke dalam tiga fraksi utama berdasarkan tingkat resistensinya terhadap dekomposisi:

1. Fraksi Labil (Mudah Terurai): Terdiri dari eksudat akar dan material seluler segar yang bertindak sebagai sumber energi instan (labile carbon) bagi mikrobioma tanah, sekaligus melepaskan hara tersedia (available nutrients) dalam jangka pendek (Philippot *et al.*, 2023).
2. Fraksi Intermediet (Sedang): Berperan sentral sebagai agen sementasi dalam pembentukan

mikroagregat menjadi makroagregat tanah yang mantap, serta memfasilitasi pelepasan hara secara berkala (slow release) (Kan *et al.*, 2025).

3. Fraksi Stabil (Humus/Rekalsitran): Berkontribusi krusial terhadap sekuestrasi karbon tanah jangka panjang, augmentasi Kapasitas Tukar Kation (KTK), dan penguatan kapasitas penyangga (*buffering capacity*) tanah terhadap fluktuasi kimiawi ekstrem.

Pada lahan kering, keseimbangan proporsi ketiga fraksi ini sangat krusial guna menjamin kontinuitas suplai hara dan air di tengah tingginya risiko cekaman abiotik (Kan *et al.*, 2025).

6.8.2 Diversifikasi dan Valuasi Sumber Biomassa Lokal

Potensi sumber bahan organik spesifik lokasi pada lahan kering sangat melimpah, meliputi residu pertanian (jerami, batang jagung, brangkas legum, sekam), pupuk kandang, serasah tanaman perkebunan/agroforestri, hingga produk olahan seperti kompos dan vermikompos (Baloch *et al.*, 2025). Kendati demikian, pemanfaatan biomassa ini di tingkat petani belum optimal. Pilihan instan untuk membakar sisa panen demi efisiensi waktu pengerjaan lahan justru memutus rantai daur ulang hara makro (N, P, K, S) dan mikro yang terkandung di dalam jaringan tanaman (Liu *et al.*, 2023).

Sebagai contoh, biomassa berupa batang jagung dan sorgum memiliki fungsi ganda (dual-benefit). Ketika diaplikasikan sebagai mulsa permukaan, material tersebut memitigasi energi kinetik air hujan dan menekan laju evaporasi. Selanjutnya, pasca-dekomposisi oleh makro-mikrofauna tanah, residu tersebut mentransformasikan senyawa karbon dan mineral

menjadi humus yang menyuburkan tanah (Demo & Bogale, 2024).

6.8.3 Optimalisasi Pupuk Kandang dan Dinamika Mineralisasi Internal

Sistem Integrasi Tanaman-Ternak (SITT), pupuk kandang (kotoran sapi, kambing, dan ayam) mengemban peran strategis karena kaya akan unsur hara makro-mikro serta mikrobioma fungsional. Namun, introduksi kotoran ternak segar sangat tidak direkomendasikan karena memicu cekaman termal akibat dekomposisi aktif di dalam tanah, berisiko menyebarkan patogen enterik, serta menginduksi pertumbuhan biji gulma (Wang *et al.*, 2024). Proses pengomposan atau fermentasi mutlak diperlukan untuk menstabilkan rasio C/N. Aplikasi pupuk kandang matang terbukti secara ilmiah mampu merekayasa arsitektur pori tanah, mendongkrak fungsionalitas biologi tanah, dan memperkuat jalur internal produksi nitrogen mineral (N-mineralisasi) secara kontinu tanpa memicu pencemaran lingkungan (Elrys *et al.*, 2024). Di samping itu, pemanfaatan tanaman penutup tanah (cover crops) atau tanaman pagar dari famili Fabaceae (seperti *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, atau *Mucuna pruriens*) mampu mendonasi nitrogen dalam jumlah masif melalui fiksasi nitrogen biologis (BNF) hasil simbiosis dengan *Rhizobium*, menjadikannya input hara yang dapat diperbarui (renewable input) (Zhao *et al.*, 2024).

6.8.4 Mekanisme Pelepasan Hara dan Fenomena Imobilisasi

Transformasi bahan organik menjadi hara tersedia dikendalikan oleh proses dekomposisi dan mineralisasi oleh enzim mikroba. Nitrogen organik diubah menjadi

amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-), fosfor organik menjadi fosfat tersedia (H_2PO_4^-), dan sulfur menjadi sulfat (SO_4^{2-}), sementara kalium (K^+) dilepaskan lebih cepat karena berada pada fase cair sel tanaman dan tidak terikat dalam struktur karbon kompleks (Elrys *et al.*, 2024).

Kinetika pelepasan hara ini sangat dipengaruhi oleh kualitas biokimia bahan, terutama rasio C/N dan kadar lignin. Bahan dengan rasio C/N > 30 (misalnya jerami padi atau sekam) akan memicu imobilisasi nitrogen sementara, di mana mikroba tanah berkompetisi dengan tanaman dalam menyerap N tersedia untuk merombak karbon (Li *et al.*, 2026). Sebaliknya, bahan dengan rasio C/N < 20 (seperti hijauan legum dan pupuk kandang matang) akan langsung mengalami mineralisasi bersih (net mineralization), sehingga penentuan jenis bahan dan waktu aplikasi harus diselaraskan dengan kurva kebutuhan hara tanaman (Elrys *et al.*, 2024).

6.8.5 Peran Pembenh Tanah : Manajemen Tanah Pasiran vs Tanah Liat

Bahan organik bertindak sebagai soil conditioner yang efektif menyelesaikan problem fisika-kimia pada dua jenis tekstur tanah yang ekstrem: Tanah Bertekstur Pasar (Pasiran): Tanah pasiran didominasi oleh pori makro non-kapiler sehingga miskin daya pegang air dan hara. Aplikasi BOT menyumbang gugus fungsional karboksil ($-\text{COOH}$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) yang meningkatkan muatan negatif tanah, otomatis menaikkan KTK tanah dan mereduksi risiko pencucian kation larut seperti NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} (Demo & Bogale, 2024). Tanah Bertekstur Halus (Liat): Tanah liat miskin organik cenderung padat, minim aerasi, dan keras saat kering.

Polimer organik yang dihasilkan selama dekomposisi berfungsi sebagai super-perekat yang mengikat lempung menjadi agregat mikro dan makro. Hal ini memicu keseimbangan porositas tanah (pori makro untuk aerasi dan drainase; pori mikro untuk retensi air kapiler), sehingga memperpanjang ketersediaan air bagi perakaran (Teng *et al.*, 2024).

6.8.6 Regulasi pH, Retensi Air, dan Arsitektur Perakaran

Aktivitas BOT dalam memodifikasi sifat kimia tanah juga menyentuh aspek stabilisasi pH. Pada tanah masam lahan kering (seperti Ultisol atau Oxisol), asam humat dan fulvat yang dilepaskan BOT mampu mengelat (chelation) ion Al^{3+} dan Fe^{3+} bebas yang bersifat toksik bagi tanaman. Pengkelatan ini sekaligus membebaskan ion fosfat yang sebelumnya terfiksasi (Al-P atau Fe-P) sehingga menjadi tersedia bagi tanaman (Wang *et al.*, 2024). Dari aspek hidrologi, peningkatan kadar BOT secara linier memperluas titik layu permanen dan kapasitas lapang tanah.

Mekanisme ini didukung oleh peningkatan pertumbuhan volume perakaran tanaman; tanah yang remah akibat pasokan organik melonggarkan tahanan mekanis tanah, mengizinkan akar menjelajah solum tanah yang lebih dalam untuk menyerap air dan hara pada zona-zona yang tidak terjangkau sebelumnya (Teng *et al.*, 2024; Philippot *et al.*, 2023).

6.8.7 Stimulasi Indikator Biokimia dan Enzimatis

Tanah Eksistensi BOT berkorelasi positif dengan diversitas dan densitas biologi tanah. Karbon organik dari BOT bertindak sebagai substrat makanan utama bagi bakteri, fungi, dan aktinomiset (Philippot *et al.*, 2023). Kehadiran komunitas mikroba ini direfleksikan oleh peningkatan aktivitas enzim tanah (seperti selulase,

fosfatase, urease, dan dehidrogenase) yang menjadi bioindikator kesehatan tanah (*soil health indicators*).

Meta-analisis global mengonfirmasi bahwa pengembalian residu tanaman secara konsisten memicu sekresi enzim selulase secara masif, yang mempercepat pemutusan ikatan selulosa biomassa dan mempercepat siklus sirkulasi karbon tanah (Li *et al.*, 2026). Selain memicu siklus biokimia, eksudat mikroba seperti glomalin (dihasilkan oleh Fungi Mikoriza Arbuskular) juga memperkuat stabilitas hidrolik agregat tanah terhadap erosi (Dai *et al.*, 2023).

6.8.8 Strategi Implementasi 5 Fungsi Utama di Tlingkat Lapangan

Aplikasi praktis konsep BOT dalam budidaya tanaman pertanian lahan kering miring (seperti jagung atau sayuran komersial) diwujudkan melalui penggabungan tindakan mekanis dan vegetatif. Pola pemanfaatan residu pasca-panen terbukti mampu menekan limpasan permukaan (*surface runoff*) dan mengamankan lapisan topsoil dari degradasi (Liu *et al.*, 2023).

Secara komprehensif, multi-peran bahan organik dalam efisiensi pengelolaan hara lahan kering dapat diringkas ke dalam Lima Fungsi Utama yang disajikan pada tabel di bawah ini:



Gambar 6. 4 Lima Fungsi Utama Bahan Organik
Sumber : Peneliti, ilustrasi ChatGPT, 6 Juni 2026

Melalui pemahaman yang komprehensif terhadap karakternya, penataan dosis, pemilihan jenis bahan matang, dan integrasi bersama teknik konservasi tanah, bahan organik menjadi kunci utama dalam mewujudkan produktivitas lahan kering yang berkelanjutan (Teng *et al.*, 2024; Baloch *et al.*, 2025).

Agroekosistem lahan kering tropis memiliki peran strategis dalam penyediaan pangan global, namun keberlanjutannya dibatasi oleh kerentanan biofisik yang kompleks seperti kelangkaan air, deplesi unsur hara, laju degradasi fisik, dan risiko erosi yang tinggi. Sinkronisasi tata kelola antara komponen hara, air, dan tanaman menjadi prasyarat mutlak untuk mengoptimalkan metabolisme

tanaman dan produktivitas hasil panen yang stabil dari musim ke musim.

1. **Dinamika dan Keseimbangan Hara (Dimensi Kimia):** Tanaman memerlukan suplai hara makro dan mikro yang seimbang sesuai stoikiometri kebutuhannya. Di lahan kering, efisiensi hara sangat dibatasi oleh volatilisasi dan pelindian (pada Nitrogen), fiksasi kimiawi oleh oksida Fe/Al atau Ca (pada Fosfor), serta pengurasan hara akibat pengangkutan biomassa tanpa substitusi (pada Kalium). Oleh karena itu, pendekatan Pengelolaan Kesuburan Tanah Terpadu (PKTT) dengan prinsip 5 Tepat (Jenis, Dosis, Waktu, Cara, Tempat) berdasarkan uji tanah spesifik lokasi mutlak diterapkan untuk menghindari fenomena nutrient mining akibat pemupukan konvensional yang tidak rasional.
2. **Konektivitas Hara-Air-Akar (Dimensi Fisik):** Air merupakan media pembatas utama yang mengontrol pergerakan ion hara menuju permukaan akar melalui mekanisme difusi dan aliran massa. Ketika tanah mengering, laju serapan nutrisi melambat dan penetrasi akar terhambat akibat tingginya tahanan mekanis tanah. Intervensi mekanis dan vegetatif, seperti aplikasi mulsa organik untuk menekan evaporasi serta pembuatan guludan searah kontur pada lahan berlereng, menjadi strategi krusial untuk mempertahankan kelembapan tanah sekaligus melindungi lapisan topsoil yang subur dari pencucian dan erosi.
3. **Bahan Organik Tanah sebagai Regulator Multidimensi (Dimensi Biologi):** Bahan Organik Tanah (BOT) bertindak sebagai stimulator utama kesehatan agroekosistem. Secara fisik, BOT memperbaiki agregasi dan porositas pada tanah liat serta mendongkrak daya pegang air pada tanah pasir. Secara kimia, BOT mendongkrak Kapasitas Tukar Kation (KTK), bertindak sebagai buffer pH, dan melepaskan hara secara bertahap

(*slow release*) dikontrol oleh rasio \$C/N\$ bahan. Secara biologi, BOT menyuplai karbon sebagai sumber energi bagi mikrobioma tanah untuk menstimulasi aktivitas enzimatis fungsional (selulase, fosfatase, urease) yang menggerakkan siklus biogeokimia internal.

Secara keseluruhan, pengelolaan hara pada lahan kering tidak dapat diselesaikan melalui introduksi pupuk anorganik tunggal secara linier. Keberlanjutan agroekosistem ini menuntut rekonstruksi paradigma ke arah pertanian melingkar (*circular farming*) dan ekologis, salah satunya melalui Sistem Integrasi Tanaman-Ternak (SITT) dan pemanfaatan legum penambat nitrogen. Dengan memadukan pemupukan berimbang, retensi biomassa lokal, konservasi tanah-air, dan optimalisasi proses biologis tanah, lahan kering dapat ditransformasikan menjadi sistem produksi pertanian yang produktif, efisien biaya, dan resiliens terhadap fluktuasi iklim global.

DAFTAR PUSTAKA

- Alewell, C., Pasquale, B., Meusbürger, K., & Borrelli, P. (2020). Global soil erosion in mitigating climates: Implications for sustainable nutrient management. *Catena*, 195, 104741. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104741>
- Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: The science of sustainable agriculture* (2nd ed.). CRC Press.
- Arsyad, S. (2010). *Konservasi tanah dan air*. IPB Press.
- Baloch, S., Khan, A., & Datta, R. (2025). Local organic resources valorization in dryland farming systems: A review on circular nutrient economy. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.141230>
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant cultivation and sustained crop production*. FAO Soils Bulletin 80. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Dai, Z., Liu, X., Zhang, X., & Brookes, P. C. (2023). Micronutrients interact with soil microbial community structure and functions in long-term managed dryland ecosystems. *Geoderma*, 430, 116312. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116312>
- Das, S., Bhattacharyya, R., Sharma, A. R., & Das, T. K. (2022). Long-term impacts of nutrient management strategies on soil organic carbon dynamics and crop yields in dryland systems. *Soil and Tillage Research*, 218, 105314. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105314>

- Demo, A., & Bogale, A. (2024). Crop residue retention and mulching practices in dryland agriculture: Impacts on soil properties and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 235, 105890. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105890>
- Elrys, A. M., Wang, J., & Ali, A. (2024). Long-term organic inputs enhance the internal production of mineral nitrogen in dryland soils: A global meta-analysis. *Catena*, 238, 107845. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107845>
- FAO. (2017). *Soil organic carbon: the hidden potential*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gliessman, S. R Haus. (2015). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (3rd ed.). CRC Press.
- Gupta, R. K., Kumar, S., & Vance, C. P. (2024). Micronutrient deficiencies in dryland agriculture: Mechanisms of plant adaptation and management strategies. *Plant and Soil*, 495(1), 45-68. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06211-1>
- Iqbal, R., Raza, M. A. S., Valipour, M., Sanchez-Guerrero, M. C., & Khan, I. (2020). Potential impacts of conservation agriculture on soil conservation and crop productivity in arid and semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 242, 106411. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106411>
- Janes-Bassett, V., Davies, J., Jones, D. L., & Tipping, E. (2020). Combined carbon, nitrogen and phosphorus modelling gives insights into long-term agricultural soil response and climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 132, 104791. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104791>

- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2019). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>
- Kan, Z. R., Virgilio, N., & Lal, R. (2025). Soil organic carbon fractions and aggregate stability under different conservation management in semi-arid agroecosystems. *Land Degradation & Development*, 36(2), 245-260. <https://doi.org/10.1002/ldr.5312>
- Kätterer, T., Bolinder, M. A., Thorvaldsson, G., & Kirchmann, H. (2021). Influence of organic inputs on soil organic carbon stocks in dryland farming systems. *Geoderma*, 385, 114884. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114884>
- Kumari, S., Singh, S. K., & Sharma, V. K. (2022). Secondary and micronutrient management under integrated soil fertility frameworks in semi-arid regions. *Land Degradation & Development*, 33(8), 1254-1268. <https://doi.org/10.1002/ldr.4215>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Li, Y., Zhang, L., & Wu, X. (2026). Global meta-analysis of straw return impacts on soil enzyme activities and organic carbon dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 190, 109310. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109310>
- Leghari, S. J. (2021). Nutrient uptake efficiency and water use under water deficit conditions in arid areas. *Journal of Arid Environments*, 189, 104481. (Kutipan teks: 作物, 2021).

- Liu, C., Lu, M., & Wang, C. (2023). Effects of crop residue return on soil organic carbon storage and nutrient balance in dryland farming: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 29(12), 3411-3425. <https://doi.org/10.1111/gcb.16680>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Pan, G., Smith, P., & Zhou, P. (2022). Synthetic and organic fertilizer management strategies for enhancing crop yields and soil organic carbon in dryland cropping systems. *Soil Use and Management*, 38(1), 112-124. <https://doi.org/10.1111/sum.12750>
- Philippot, L., Chenu, C., & Kappler, A. (2023). The role of soil organic matter fractions in modulating microbial functions and nutrient cycling in drylands. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(5), 312-326. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00415-w>
- Prager, K., Schuler, J., & Helming, K. (2022). Soil degradation and sustainable land management in rainfed and dryland agricultural areas. *Land Degradation & Development*, 33(4), 512-526. <https://doi.org/10.1002/ldr.4152>
- Seghouani, M., Mahdi, N., & Feddal, M. A. (2024). Stoichiometric balance of nitrogen and phosphorus in rainfed Mediterranean drylands: Implications for crop yield stability. *Catena*, 236, 107724. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107724>
- Siddique, K. H. M., Hanbury, C. D., & Turner, N. C. (2021). Interaction between water deficit and nutrient availability in dryland agriculture. *Plant and Soil*, 460(1), 15-32. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04791-w>

- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., & Pisante, M. (2017). Multiple benefits of legumes in spatio-temporal intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 82, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.016>
- Stewart, B. A., Lal, R., & Lin, Q. (2020). Research highlights in dryland agriculture and soil management. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1401-1415. <https://doi.org/10.1002/saj2.20131>
- Teng, W., Zhang, Y., Wang, J., & Li, X. (2024). Integrating water-harvesting techniques with nutrient management enhances soil water availability and nutrient uptake efficiency in dryland maize. *Agricultural Water Management*, 291, 108620. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108620>
- Vanlauwe, B., Descheemaeker, K., Giller, K. E., Merckx, R., & Nziguheba, G. (2015). Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: From principles to practice. *Global Food Security*, 7, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.10.002>
- Wang, H., Zhang, S., & Xu, M. (2024). Organic amendments modulate soil pH and aluminum toxicity in highly weathered acidic dryland soils. *Geoderma*, 441, 116752. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116752>
- Zhao, F., Zhang, L., & Sun, Q. (2024). Soil testing and nutrient balancing: Moving towards sustainable intensification in dryland agroecosystems. *Soil Use and Management*, 40(1), e12945. <https://doi.org/10.1111/sum.12945>

BIODATA PENULIS



Ir. Basuki S.P., M.Sc

Dosen Program Studi Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian
Universitas Jember

Penulis lahir di Sukoharjo, pada tanggal 02 Agustus 1985. Lulus S1 dari Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sebelas Maret Surakarta tahun 2009, dan Lulus S2 tahun 2014 dari Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada melalui program Beasiswa Unggulan. Karier tahun 2009-2019 menjadi staf peneliti di Pusat Penelitian Tebu PT Perkebunan Nusantara XI (Persero) dengan membidangi Bagian Sistem Informasi Geografis, Kesuburan Tanah & Rekomendasi Pemupukan Tanah, Biologi Tanah, Kultur Jaringan, Agen Hayati Pengendali Hama Dan Penyakit Tanaman Tebu, Pemuliaan Tanaman Tebu, Percobaan Lapang. Tahun 2012 melepas varietas tebu unggul baru di Indonesia dengan nomor ID 2794/kpts/SR.120/8/2012. Pada 2019 – Sekarang, penulis menjadi staf dosen di Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Jember. Keahlian yang ditekuninya meliputi Evaluasi Sumberdaya Lahan, Sistem Informasi Geografis, Pertanian Presisi, Genesis Tanah,

Morfologi&klasifikasi tanah, Kesuburan Tanah, Penilaian lapang karakteristik tanah, Sistem Pertanian Berkelanjutan, dan Rekomendasi Pemupukan. Aktifitas penulis dalam kegiatan penelitian dan pengabdian yang dituangkan dalam publikasi terekam dalam google scholar dengan alamat: <https://scholar.google.com/citations?user=27jiYTsAAAAJ&hl=en>. Penulis juga telah menulis beberapa buku diantaranya dengan judul Ilmu Tanah dan Nutrisi tanaman (ISBN 978-623-5488-00-4); BUDIDAYA PADI Integrasi Pertanian dan Peternakan Mendukung Produktifitas Padi (ISBN 978-623-6916-84-1), Hidrologi Pertanian (ISBN 978-623-342-646-6), Pengantar Teknologi Pertanian (ISBN 978-623-8070-88-6), Pengantar Agroklimatologi (ISBN 978-623-8070-61-9), Kesuburan dan Pemupukan Tanah (ISBN 978-623-342-696-1), Pertanian Berkelanjutan (ISBN 978-623-342-748-7), Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan (ISBN: 978-623-342-776-0), Sistem pertanian Presisi (ISBN: 978-623-342-796-8), Budidaya Tanaman (ISBN: 978-623-198-571-2). E-mail: basuki@unej.ac.id.

BIODATA PENULIS



Jesi Yardani, S.TP., M.T.P.

Dosen Program Studi Diploma III Teknologi Otomotif
Jurusan Rekayasa dan Industri Politeknik Negeri Tanah Laut

Penulis lahir di Padang, tanggal 2 Oktober 1986. Penulis adalah dosen tetap di Program Studi Diploma III Teknologi Otomotif, Jurusan Rekayasa dan Industri, Politeknik Negeri Tanah Laut. Penulis menyelesaikan Pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas pada tahun 2008. Kemudian menyelesaikan pendidikan S2 pada Magister Teknologi Agroindustri Program Pascasarjana Universitas Padjajaran pada tahun 2017. Pada tahun 2022 penulis menjadi dosen tetap pada Program Program Studi Diploma III Agroindustri, Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Politeknik Negeri Tanah Laut dan pada Tahun 2026 bulan April penulis menjadi dosen tetap pada Program Studi Diploma III Teknologi Otomotif, Jurusan Rekayasa dan Industri hingga saat ini.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Sukriming Sapareng, SP., MP., IPM.

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian Universitas Andi Djemma

Penulis lahir di Desa Pattimang, Kecamatan Malangke, Kabupaten Luwu Utara Sulawesi Selatan pada tanggal 29 Juni 1975. Saat ini, penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Andi Djemma.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) pada Jurusan Budidaya Tanaman (Agronomi), Fakultas Pertanian dan Kehutanan, Universitas Hasanuddin. Pendidikan Magister (S2) ditempuh pada Program Pascasarjana Sistem-Sistem Pertanian dengan Konsentrasi Tanaman di universitas yang sama. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan Doktor (S3) pada Program Studi Ilmu Pertanian dengan Konsentrasi Bioteknologi Pertanian di Universitas Hasanuddin dan berhasil menyelesaikan studi pada tahun 2018.

Karier sebagai tenaga pendidik dimulai sejak tahun 2003, setelah menyelesaikan pendidikan Pascasarjana. Sejak

saat itu, penulis aktif dalam kegiatan akademik, penelitian, serta publikasi ilmiah, baik dalam bentuk jurnal maupun buku.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik dan penelitian, serta telah menghasilkan sejumlah publikasi ilmiah, baik dalam bentuk jurnal maupun buku. Beberapa buku yang telah diterbitkan antara lain:

- Teknik Budidaya Tanaman untuk Pertanian Berkelanjutan (2026)
- Dasar-Dasar Bioteknologi (2026)
- Fisiologi Tanaman (2026)
- Analisis Kelayakan Agribisnis (2026)
- Manajemen Budidaya Tanaman Perkebunan (2026)
- Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman (2026)
- Pengantar Genetika Tanaman (2026)
- Genetika Tanaman (2025)
- Hortikultura dan Tanaman Pangan (2025)
- Metode Penelitian Agribisnis (2025)
- Ekonomi Sumberdaya (2025)
- Metode Statistika I (2025)
- Budidaya Tanaman Pangan (2025)
- Pengantar Ekonomi Pembangunan (2025)
- Dasar-Dasar Budidaya Pertanian (2025)
- Pengantar Ilmu Pertanian (2025)
- Manajemen Sumber Daya Manusia dalam Agribisnis (2025)
- SAGU: Budidaya dan Pengolahan Pascapanen (2023)
- Pengembangan Kembali Jeruk Malangke (2023)
- Kelapa Sawit (2023)
- Cendawan Pelapuk untuk Produksi Kelapa Sawit Ramah Lingkungan (2022)
- Produktivitas Bawang Merah yang Diaplikasi Pupuk Organik dan Zat Pengatur Tumbuh dari Ekstrak Jagung (2022)

- Cendawan Pelapuk untuk Produksi Kelapa Sawit Ramah Lingkungan (2021)

Penulis dapat dihubungi melalui email: miming.mlgke@gmail.com atau sukriming_sapareng@unanda.ac.id.

BIODATA PENULIS



Mahmudin, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Pertanian Presisi
Jurusan Rekayasa Elektro dan Industri Pertanian
Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Penulis lahir di Tanjung Samak tanggal 20 Mei 1997. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pertanian Presisi Jurusan Rekayasa Elektro dan Industri Pertanian, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Ilmu Pertanian. Penulis menekuni bidang Menulis sejak di bangku SMA hingga sekarang.

BIODATA PENULIS



Baso Daeng, SP., M.Si

Dosen Program Studi Budidaya Tanaman Pangan
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis lahir di Ujung Pandang (Makassar) tanggal 18 Januari 1978. Pendidikan S1 bidang Agronomi diselesaikan pada tahun 2001 di Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih. Penulis juga merupakan alumni S2 IPB, lulus pada tahun 2012 dengan keahlian Agronomi dan Hortikultura. Saat ini penulis sedang merampungkan pendidikan S3 Ilmu Lingkungan di Universitas Papua.

Sebagai akademisi yang aktif, penulis tidak hanya terlibat dalam kegiatan pengajaran, tetapi juga aktif menulis dan melakukan penelitian, khususnya dalam bidang pertanian berkelanjutan, kearifan lokal, dan ketahanan pangan. Selain itu, penulis juga berpartisipasi dalam berbagai organisasi profesi dan kegiatan pengabdian kepada masyarakat, sebagai bentuk kontribusi terhadap pembangunan ilmu pengetahuan dan kesejahteraan masyarakat lokal

Untuk keperluan komunikasi dan korespondensi, penulis dapat dihubungi melalui alamat email: *b.daeng@unipa.ac.id* atau *basodaeng.s3il@gmail.com*.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Zulzain Ilahude, M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian Universitas Negeri Gorontalo

Penulis adalah Dosen tetap di Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Negeri Gorontalo. Lulusan S1 Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sam Ratulangi Manado dan melanjutkan Studi S2 dan S3 di UGM Yogyakarta. Mengampu mata kuliah Dasar-dasar Ilmu Tanah, Kesuburan Tanah dan Pemupukan, Biologi dan Fisika Tanah, dan Pertanian Organik Berkelanjutan, Geografi Tanah pada Program Pasca Sarjana. Selama ini terlibat aktif sebagai Dosen Pembimbing Mahasiswa terkait dengan Inovasi Pertanian Organik dengan luaran produk Pupuk Organik ramah lingkungan. Aktif di organisasi Maporina (Masyarakat Petani Pertanian Organik Indonesia), Peragi (Perhimpunan Agronomi Indonesia), OKKPD (Otoritas Kompeten Keamanan Pangan Daerah), Perhimp (Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia) Provinsi Gorontalo.