PROPOSAL PENELITIAN

OPTIMASI KUALITAS FISIKA DAN KIMIA TANAH SAWAH MELALUI PEMANFAATAN PUPUK KOMPOS SEBAGAI UPAYA PERTANIAN BERKELANJUTAN DI DESA ANTUTAN DAN PEJALIN

Oleh

SULTAN SYAID ARIFADHILATURRAHMAN
NIM. 202231006

PROGRAM STUDI AGROTEKNOLOGI
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS KALTARA
TANJUNG SELOR

2026

HALAMAN PENGESAHAN PROPOSAL

Judul Proposal Penelitian	: Optimasi Kualitas Fisika dan Kimia Tanah Sawah Melalui Pemanfaatan Pupuk Kompos Sebagai Upaya Pertanian Berkelanjutan Di Desa Antutan Dan Pejalin
Nama	: Sultan Syaid Arifadhilaturrahman
NIM	: 202231006
Jurusan	: Agroteknologi
Fakultas	: Pertanian

Menyetujui
Pembimbing,

Rina Lesmana, S.P., M.M.
NIP
Tanggal:

Mengetahui
Ketua Jurusan/Program Studi

Siti Masithah Fiqtinovri, S.T.P., M.Sc
NIP. 1113118901
Tanggal:

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian yang berjudul **"Optimasi Kualitas Fisika dan Kimia Tanah Sawah Melalui Pemanfaatan Pupuk Kompos Sebagai Upaya Pertanian Berkelanjutan di Desa Antutan dan Pejalin"**. Proposal ini disusun sebagai salah satu syarat akademik dalam menempuh jenjang Strata-1 (S1) pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan penyusunan proposal ini tidak lepas dari bimbingan, dukungan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Rektor dan Segenap Pimpinan Universitas, atas kebijakan dan dukungan sarana prasarana yang memungkinkan penulis menuntut ilmu di lingkungan kampus ini.
2. Dekan Fakultas Pertanian, yang telah memberikan fasilitas dan dukungan kebijakan selama masa perkuliahan.
3. Ketua Program Studi Agroteknologi, atas arahan dan administrasi yang baik demi kelancaran studi penulis.
4. Dosen Pembimbing I dan II, yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, koreksi, serta masukan konstruktif demi kesempurnaan penelitian ini.
5. Pemerintah Desa serta Petani di Desa Antutan dan Desa Pejalin, atas izin dan kerja samanya dalam penyediaan lokasi penelitian.
6. Orang Tua dan Keluarga, yang senantiasa memberikan doa, dukungan moral, maupun material yang tidak terhingga.
7. Rekan-rekan Mahasiswa Agroteknologi Angkatan 2022, yang telah memberikan semangat dan ruang diskusi selama penyusunan proposal ini.

Penulis menyadari bahwa proposal ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga proposal penelitian ini dapat

memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang ilmu tanah dan memberikan kontribusi nyata bagi kemajuan pertanian berkelanjutan di wilayah Kalimantan Utara.

Tanjung Selor, 01 April 2026

Sultan Syaid Arifadhilaturrahman
NIM. 202231006

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN PROPOSAL ..... **ii**
KATA PENGANTAR ..... **iii**
DAFTAR ISI ..... **v**
DAFTAR TABEL ..... **vii**
I. PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang **1**
1.2 Rumusan Masalah **4**
1.3 Tujuan Penelitian **4**
II. TINJUAN PUSTAKA **6**
2.1 Tanah Sawah (Wetland Rice Soil) **6**
2.1.1 Karakteristik dan Klasifikasi Tanah Sawah 6
2.1.2 Ekosistem Lahan Sawah di Indonesia 9
2.2 Sifat Fisika Tanah Sawah **12**
2.2.1 Tekstur dan Struktur Tanah 13
2.2.2 Berat Isi (Bulk Density) dan Porositas 15
2.2.3 Kapasitas Menahan Air (Water Holding Capacity) 18
2.3 Sifat Kimia Tanah Sawah **20**
2.3.1 Kemasaman Tanah (pH) 21
2.3.2 Kapasitas Tukar Kation (KTK) 23
2.3.3 Karbon Organik (C-Organik) 26
2.4 Pupuk Kompos sebagai Bahan Pembenah Tanah (Soil Conditioner) **30**
2.4.1 Definisi dan Proses Dekomposisi 31
2.4.2 Kandungan Asam Humat dan Fulvat 34
2.4.3 Pengaruh Kompos terhadap Perbaikan Sifat Fisika Tanah 36
2.4.4 Pengaruh Kompos terhadap Perbaikan Sifat Kimia Tanah 39
2.5 Konsep Pertanian Berkelanjutan (Sustainable Agriculture) **41**
2.5.1 Prinsip Dasar Pertanian Berkelanjutan 42
2.5.2 Reduksi Input Kimia melalui Amandemen Organik 45
2.6 Penelitian Terdahulu (State of the Art) **49**
III. METODOLOGI PENELITIAN **53**
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian **53**
3.1.1 Lokasi Penelitian 53
3.1.2 Waktu Penelitian 54
3.2 Bahan dan Alat **55**

3.2.1 Bahan Penelitian....56
3.2.2 Alat Penelitian....57
3.3 Metode Penelitian....58
3.3.1 Rancangan Percobaan....58
3.3.2 Perlakuan Penelitian....59
3.3.3 Penentuan Plot Percobaan....59
3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian....61
3.4.1 Persiapan Lahan dan Media....61
3.4.2 Aplikasi Pupuk Kompos....62
3.4.3 Pengambilan Sampel Tanah....63
3.5 Parameter Pengamatan....63
3.5.1 Analisis Sifat Fisika Tanah....64
3.5.2 Analisis Sifat Kimia Tanah....64
3.6 Teknik Analisis Data....65
3.6.1 Analisis Statistik (Analysis of Variance - ANOVA)....65
3.6.2 Uji Lanjut (Post-Hoc Test)....66
3.6.3 Analisis Deskriptif dan Interpretasi Data....66
DAFTAR PUSTAKA....67

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Waktu pelaksanaan penelitian 55
Tabel 3. 2. Daftar Bahan Penelitian dan Fungsinya 56
Tabel 3. 3. Daftar Alat Penelitian dan Kegunaannya 57
Tabel 3. 4. Simbol dan Dosis Perlakuan Pupuk Kompos 59
Tabel 3. 5. Spesifikasi Teknis Tata Letak Plot Percobaan 60
Tabel 3. 6 Prosedur Aplikasi dan Masa Inkubasi Kompos 62
Tabel 3. 7. Teknik Pengambilan dan Peruntukan Sampel Tanah 63
Tabel 3. 8 Parameter Pengamatan dan Metode Analisis Laboratorium 64

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor pertanian lahan sawah memegang peranan strategis sebagai penopang utama ketahanan pangan nasional, khususnya dalam penyediaan komoditas padi (*Oryza sativa* L.). Keberlanjutan sistem produksi padi sangat ditentukan oleh kualitas tanah yang mencerminkan integrasi fungsi fisika, kimia, dan biologi secara seimbang. Menurut penelitian oleh Suryani et al. (2022) dalam *Jurnal Tanah dan Iklim*, produktivitas padi sangat dipengaruhi oleh kemampuan tanah dalam menyediakan unsur hara secara berkelanjutan yang ditentukan oleh pengelolaan sifat fisik dan kimia tanah secara tepat.

Namun demikian, praktik pertanian intensif yang berkembang saat ini cenderung berorientasi pada peningkatan produksi jangka pendek tanpa memperhatikan keberlanjutan sumber daya lahan. Intensifikasi yang tidak diimbangi dengan manajemen kesuburan tanah yang baik telah menyebabkan penurunan kualitas lahan di berbagai daerah sentra produksi. Hal ini sejalan dengan temuan Rahmawati et al. (2021) dalam *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan* yang menyatakan bahwa praktik budidaya konvensional berkontribusi terhadap degradasi sifat fisik tanah, terutama penurunan stabilitas agregat dan peningkatan kepadatan tanah.

Ketergantungan petani terhadap pupuk anorganik secara berlebihan tanpa disertai pengembalian bahan organik telah menimbulkan fenomena kelelahan tanah (*soil fatigue*). Penggunaan pupuk kimia secara terus-menerus dapat menurunkan kualitas tanah dan efisiensi pemupukan. Hal ini diperkuat oleh hasil penelitian oleh Hidayat et al. (2022) dalam *Jurnal Agroekoteknologi Tropika* yang menunjukkan bahwa aplikasi pupuk anorganik tanpa penambahan bahan organik dapat menyebabkan penurunan kandungan bahan organik tanah dan kerusakan struktur tanah.

Salah satu indikator utama terjadinya degradasi lahan sawah adalah rendahnya kandungan karbon organik (C-organik) tanah. Bahan organik berperan penting sebagai sumber energi bagi mikroorganisme tanah serta sebagai agen pembentuk agregat tanah. Menurut Utami et al. (2020) dalam *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, rendahnya kandungan bahan organik menyebabkan menurunnya kapasitas penyangga tanah terhadap perubahan kondisi lingkungan, baik fisik maupun kimia.

Dampak penurunan bahan organik terhadap sifat fisik tanah ditunjukkan melalui meningkatnya berat isi (bulk density) dan menurunnya porositas tanah. Kondisi ini menyebabkan tanah menjadi padat sehingga menghambat pertumbuhan akar dan sirkulasi udara dalam tanah. Penelitian oleh Prasetyo et al. (2021) dalam *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia* menunjukkan bahwa keterbatasan pori makro dapat menghambat proses respirasi akar serta mengurangi efisiensi penyerapan unsur hara oleh tanaman padi.

Selain itu, degradasi sifat kimia tanah juga ditandai dengan menurunnya Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang berperan dalam mempertahankan ketersediaan unsur hara. Penggunaan pupuk nitrogen secara intensif, terutama urea, dapat menyebabkan peningkatan kemasaman tanah. Menurut penelitian oleh Saputra et al. (2022) dalam *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, aplikasi bahan organik seperti kompos mampu meningkatkan nilai KTK dan memperbaiki status kesuburan tanah secara signifikan.

KTK yang rendah menyebabkan tanah tidak mampu menahan unsur hara sehingga mudah tercuci ke lapisan bawah tanah. Hal ini berdampak pada rendahnya efisiensi pemupukan dan meningkatnya kehilangan hara. Hasil penelitian oleh Nugroho et al. (2021) dalam *Jurnal Agronomi Indonesia* menunjukkan bahwa pengelolaan hara yang tidak tepat pada lahan sawah intensif dapat menyebabkan inefisiensi penggunaan pupuk dan pencemaran lingkungan akibat residu kimia.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk memperbaiki kualitas tanah adalah penggunaan pupuk kompos sebagai bahan

pembenah tanah (*soil conditioner*). Kompos mengandung bahan organik yang mampu meningkatkan stabilitas agregat tanah dan memperbaiki struktur tanah. Menurut penelitian oleh Wulandari et al. (2022) dalam *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, aplikasi kompos terbukti mampu menurunkan kepadatan tanah dan meningkatkan porositas serta kapasitas menahan air.

Secara kimia, kompos juga berperan dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara melalui proses mineralisasi yang berlangsung secara bertahap. Bahan organik dalam kompos dapat mengikat unsur beracun seperti Al dan Fe sehingga meningkatkan ketersediaan fosfor (P). Hal ini didukung oleh penelitian oleh Lestari et al. (2021) dalam *Jurnal Ilmu Tanah Indonesia* yang menyatakan bahwa bahan organik memiliki peran penting dalam meningkatkan ketersediaan hara pada tanah masam.

Pemanfaatan kompos sejalan dengan konsep pertanian berkelanjutan yang menekankan pada efisiensi penggunaan input dan pelestarian sumber daya alam. Pendekatan ini mengutamakan penggunaan bahan organik lokal sebagai alternatif pengganti pupuk kimia. Menurut Hermawan et al. (2020) dalam *Jurnal Agroekologi*, peningkatan bahan organik tanah merupakan kunci utama dalam menjaga produktivitas lahan secara berkelanjutan.

Desa Antutan dan Desa Pejalin dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan wilayah sentra produksi padi sawah di Kabupaten Bulungan dengan intensitas tanam yang tinggi. Namun, praktik pemupukan di kedua wilayah tersebut masih didominasi oleh penggunaan pupuk kimia tanpa diimbangi dengan aplikasi bahan organik. Kondisi ini berpotensi menurunkan kualitas tanah dalam jangka panjang.

Selain itu, keterbatasan data ilmiah mengenai kondisi sifat fisika dan kimia tanah di wilayah tersebut menjadikan penelitian ini sangat penting untuk dilakukan. Oleh karena itu, penelitian dengan judul *"Optimasi Kualitas Fisika dan Kimia Tanah Sawah Melalui*

Pemanfaatan Pupuk Kompos sebagai Upaya Pertanian Berkelanjutan di Desa Antutan dan Pejalin" diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi dosis kompos yang efektif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengelolaan lahan sawah berkelanjutan, khususnya di wilayah Kalimantan Utara, sebagaimana ditegaskan oleh Kurniawan et al. (2022) dalam *Jurnal Agronomi Indonesia* bahwa pengelolaan bahan organik merupakan strategi utama dalam menjaga produktivitas lahan pertanian.

1.2 Rumusan Masalah

1.2.1 Bagaimana kondisi aktual kualitas tanah sawah di Desa Antutan dan Desa Pejalin ditinjau dari sifat fisika dan kimia tanah?

1.2.2 Bagaimana efektivitas pemberian pupuk kompos terhadap perbaikan sifat fisika dan kimia tanah sawah di kedua lokasi penelitian?

1.2.3 Berapa dosis pupuk kompos yang optimal untuk meningkatkan kualitas tanah sawah secara berkelanjutan di Desa Antutan dan Desa Pejalin?

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan kualitas sifat fisika dan kimia tanah sawah melalui pemanfaatan pupuk kompos sebagai upaya mendukung sistem pertanian berkelanjutan di Desa Antutan dan Desa Pejalin. Secara lebih luas, penelitian ini diarahkan untuk menghasilkan pendekatan pengelolaan tanah yang mampu meningkatkan kesuburan tanah secara berkelanjutan, memperbaiki efisiensi penggunaan input pertanian, serta menjaga produktivitas lahan sawah dalam jangka panjang.

1.3.2 Tujuan Khusus

a) Menganalisis kondisi awal kualitas tanah sawah yang bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis kondisi

eksisting kualitas tanah sawah di Desa Antutan dan Desa Pejalin berdasarkan parameter sifat fisika dan kimia tanah. Analisis ini meliputi pengukuran berat isi tanah (bulk density), porositas, struktur tanah, derajat keasaman (pH), Kapasitas Tukar Kation (KTK), serta kandungan karbon organik (C-organik). Tujuan ini penting untuk mengetahui tingkat degradasi tanah yang terjadi akibat praktik pertanian intensif serta sebagai dasar dalam merancang strategi perbaikan tanah yang tepat.

b) Mengevaluasi pengaruh pemberian pupuk kompos terhadap sifat tanah yang bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana pemberian pupuk kompos dapat memperbaiki sifat fisika dan kimia tanah sawah. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi tanah sebelum dan sesudah perlakuan kompos, sehingga dapat diketahui perubahan yang terjadi pada struktur tanah, porositas, stabilitas agregat, pH tanah, KTK, serta peningkatan kandungan bahan organik. Tujuan ini diharapkan dapat memberikan bukti ilmiah mengenai efektivitas kompos sebagai bahan pembenah tanah (*soil conditioner*) dalam sistem budidaya padi.

c) Menentukan dosis optimal pupuk kompos untuk pertanian berkelanjutan bertujuan untuk menentukan dosis pupuk kompos yang paling optimal dalam meningkatkan kualitas tanah sawah secara efektif dan efisien. Penentuan dosis ini didasarkan pada hasil analisis perubahan sifat tanah serta mempertimbangkan aspek keberlanjutan, efisiensi penggunaan input, dan kemudahan penerapan oleh petani. Hasil dari tujuan ini diharapkan dapat menjadi rekomendasi teknis yang aplikatif bagi petani dalam mengelola lahan sawah secara berkelanjutan serta mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik.

II. TINJUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Sawah (*Wetland Rice Soil*)

Tanah sawah merupakan bentuk bentang lahan antropogenik yang unik, di mana sifat-sifat aslinya telah mengalami transformasi signifikan akibat praktik budidaya padi sawah jangka panjang yang melibatkan penggenangan, pelumpuran (*puddling*), dan pengeringan secara periodik. Secara pedologis, tanah sawah bukan merupakan kelompok tanah tersendiri dalam taksonomi tanah, melainkan tanah dari berbagai ordo yang telah mengalami proses "persawahan" (*paddyfication*) yang mengubah rezim kelembapan dan tata udara tanah secara drastis. Menurut Hardjowigeno (2020), proses persawahan ini menciptakan horison-horison baru yang tidak ditemukan pada tanah asalnya, terutama akibat akumulasi bahan organik dan pengendapan mineral dari air irigasi.

Karakteristik utama yang membedakan tanah sawah dengan tanah kering (*upland*) adalah adanya lapisan olah yang tereduksi akibat kondisi anaerobik selama fase penggenangan. Dinamika ini memicu serangkaian reaksi biogeokimia yang kompleks, termasuk reduksi besi (Fe) dan mangan (Mn), perubahan pH tanah menuju netral, serta fluktuasi ketersediaan hara yang sangat dinamis. Sebagaimana dijelaskan oleh Yulnafatmawita & Adrinal (2020), pemahaman mendalam mengenai sifat fisik dan kimia tanah sawah dalam kondisi tergenang (*reduced*) maupun kering (*oxidized*) menjadi prasyarat mutlak dalam merancang strategi pemupukan organik yang efektif dan berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas padi.

2.1.1 Karakteristik dan Klasifikasi Tanah Sawah

Tanah sawah didefinisikan sebagai tanah yang digunakan untuk bertanam padi sawah, baik secara terus-menerus maupun bergiliran dengan tanaman palawija, yang dicirikan oleh adanya lapisan kedap air (plow pan) akibat proses pelumpuran. Menurut Hardjowigeno (2020), proses pelumpuran bertujuan untuk menghancurkan agregat

tanah menjadi partikel halus guna menekan laju perkolasi air dan mempermudah penanaman bibit padi. Aktivitas antropogenik ini secara bertahap mengubah sifat asli tanah induk menjadi tanah dengan karakteristik hidromorfik yang khas.Pembentukan tanah sawah secara pedogenesis sangat dipengaruhi oleh kondisi aquic, yaitu kondisi di mana tanah mengalami kejenuhan air dan reduksi secara terus-menerus atau periodik.

Lumbanraja (2021) menjelaskan bahwa penggenangan menyebabkan oksigen (O_2) terusir dari pori tanah, sehingga mikroorganisme anaerob menggunakan akseptor elektron lain seperti NO_3^-, Mn^{4+}, Fe^{3+}, dan SO_4^{2-} dalam proses respirasinya. Hal ini memicu perubahan drastis pada potensial redoks tanah yang membedakannya dari tanah lahan kering.

Proses reduksi besi (Fe^{3+} menjadi Fe^{2+}) merupakan ciri paling nyata dari tanah sawah tergenang yang mengalami proses gleisasi. Transformasi ini mengubah warna tanah dari kemerahan atau kecokelatan menjadi kelabu atau kehijauan akibat hilangnya selaput besi oksida pada partikel tanah. Sebagaimana ditegaskan oleh Nur dkk. (2021), ion Fe^{2+} yang bersifat larut dapat bergerak ke lapisan bawah dan mengalami oksidasi kembali saat air surut, membentuk bercak-bercak (mottling) yang menjadi penciri horison pedogenik tanah sawah yang telah matang.

Secara morfologis, tanah sawah yang telah dikelola dalam jangka panjang memiliki profil yang khas, terdiri dari lapisan olah tereduksi (reduced layer), lapisan tipis teroksidasi di permukaan (oxidized layer), dan lapisan tapak bajak (plow pan) yang keras di bawahnya. Sutari (2023) menyebutkan bahwa lapisan tapak bajak ini sangat krusial dalam ekosistem sawah karena berfungsi sebagai penghambat mekanis yang menahan air dan hara agar tidak hilang terlalu cepat melalui perkolasi ke lapisan sub-soil.Klasifikasi tanah sawah dalam sistem Taksonomi Tanah (USDA) sering kali dikaitkan dengan rezim kelembapan aquic pada tingkat ordo maupun sub-ordo,

meskipun tidak membentuk ordo tersendiri. Yulnafatmawita & Adrinal (2020) menyatakan bahwa sebagian besar tanah sawah di Indonesia berkembang dari ordo Inceptisol, Ultisol, atau Entisol yang kemudian mengalami modifikasi sifat fisik dan kimia akibat intervensi manusia melalui irigasi sistematis dan pengolahan tanah yang intensif.Karakteristik kimia tanah sawah cenderung bergerak menuju pH netral saat tergenang, berkisar antara 6.0 hingga 7.0, yang merupakan rentang optimal bagi pertumbuhan padi. Tanah masam akan mengalami peningkatan pH karena konsumsi ion H^+ dalam reaksi reduksi, sedangkan tanah basa akan mengalami penurunan pH akibat akumulasi gas CO_2. Zulaikha dkk. (2021) menambahkan bahwa stabilitas pH pada angka netral ini sangat menguntungkan bagi ketersediaan hara makro, terutama meningkatkan kelarutan Fosfor (P) yang sebelumnya terikat

Kandungan bahan organik pada tanah sawah umumnya lebih lambat terdekomposisi dibandingkan tanah kering karena terbatasnya pasokan oksigen bagi mikroba aerob dalam kondisi anaerobik. Menurut Damayanti (2023), meskipun laju dekomposisinya lambat, penumpukan bahan organik mentah yang tidak terkelola dengan baik dapat memicu akumulasi gas metana (CH_4) dan asam-asam organik volatil yang dalam konsentrasi tinggi dapat bersifat toksik bagi perkembangan akar tanaman padi.

Sifat fisika tanah sawah sangat dipengaruhi oleh siklus basah dan kering yang berulang secara periodik mengikuti musim tanam. Pengeringan saat menjelang panen menyebabkan tanah mengerut dan membentuk retakan-retakan makro, sementara penggenangan kembali pada musim tanam berikutnya menyebabkan pengembangan (swelling). Pratiwi et al. (2021) menekankan bahwa dinamika pengembangan dan pengerutan ini secara jangka panjang memengaruhi stabilitas pori tanah, terutama pada tanah yang didominasi oleh mineral liat tipe 2:1.

Kapasitas Tukar Kation (KTK) pada tanah sawah merupakan parameter vital yang menentukan efisiensi jerapan nutrisi terhadap koloid tanah. Mirdat et al. (2021) menjelaskan bahwa peningkatan pH saat penggenangan sering kali dibarengi dengan munculnya muatan negatif pada permukaan koloid tanah, sehingga kapasitas tanah dalam mengikat kation hara seperti K^+, Ca^{2+}, dan Mg^{2+} menjadi lebih efektif dan terlindungi dari proses pencucian yang cepat.

Secara fungsional, klasifikasi dan karakteristik tanah sawah juga mempertimbangkan aspek hidrologi yang menentukan intensitas proses reduksi-oksidasi di dalam profil tanah. Hayati (2021) mencatat bahwa perbedaan sumber air, baik dari irigasi teknis maupun tadah hujan, akan memengaruhi laju sedimentasi hara dan kedalaman lapisan tereduksi. Hal ini menjadikan manajemen kesuburan tanah sawah harus dilakukan secara spesifik berdasarkan karakteristik pedologis dan hidrologis lokal guna mencapai produktivitas yang berkelanjutan.

2.1.2 Ekosistem Lahan Sawah di Indonesia

Ekosistem lahan sawah di Indonesia merupakan salah satu bentuk penggunaan lahan yang paling luas dan strategis karena peranannya sebagai penyangga utama ketahanan pangan nasional. Secara tipologi, lahan sawah di Indonesia tersebar di berbagai bentang alam, mulai dari dataran aluvial, kaki gunung api, hingga lahan rawa dan pasang surut. Menurut Manfarizah dkk. (2020), keragaman material induk tanah di Indonesia menyebabkan variabilitas kesuburan tanah sawah antar wilayah menjadi sangat tinggi, yang menuntut pendekatan manajemen hara yang spesifik lokasi agar produktivitas tetap optimal.

Tipologi tanah sawah yang dominan di Indonesia berkembang dari ordo Inceptisol, Ultisol, dan Vertisol, yang masing-masing memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda. Kurniawan dkk. (2021) mengidentifikasi bahwa pada wilayah dengan tanah Ultisol yang masam, kendala utama ekosistem sawah adalah rendahnya

ketersediaan unsur hara makro dan potensi toksisitas aluminium. Kondisi ini memerlukan intervensi ameliorasi yang konsisten, terutama melalui penambahan bahan organik, guna memperbaiki daya dukung lahan terhadap pertumbuhan tanaman padi.

Iklim tropis basah yang mencirikan sebagian besar wilayah Indonesia memberikan pengaruh besar terhadap dinamika ekosistem sawah melalui curah hujan yang tinggi. Sebagaimana dijelaskan oleh Noviana et al. (2023), intensitas hujan yang tinggi mempercepat proses pelapukan mineral namun juga meningkatkan risiko pencucian hara-hara basa (Ca, Mg, K) dari zona perakaran ke lapisan bawah. Dinamika hidrologi ini menyebabkan tanah sawah di Indonesia seringkali mengalami defisiensi hara esensial secara alami jika tidak disertai dengan sistem pemupukan yang seimbang.

Sistem pengelolaan air di ekosistem sawah Indonesia mencakup sawah irigasi teknis, tadah hujan, hingga sawah lebak yang sangat bergantung pada fluktuasi air permukaan. Zulkarnain dkk. (2024) melaporkan bahwa stabilitas ketersediaan air sangat menentukan keberhasilan proses biokimia di dalam tanah, terutama dalam menjaga kondisi reduksi yang diperlukan untuk ketersediaan nutrisi tertentu. Ketidakstabilan pasokan air seringkali menyebabkan gangguan pada siklus hara, yang pada akhirnya memengaruhi efisiensi pemupukan yang dilakukan oleh petani.

Secara fisik, ekosistem sawah di sentra-sentra produksi Indonesia mulai menunjukkan gejala degradasi akibat intensifikasi pertanian yang tidak terkontrol. Sari (2022) mengamati bahwa penggunaan alat mesin pertanian yang berat dan pola pengolahan tanah yang monoton telah menyebabkan terbentuknya lapisan kedap air yang terlalu dangkal dan pemadatan tanah pada lapisan sub-soil. Pemadatan ini mengakibatkan porositas tanah menurun drastis, sehingga aerasi tanah terhambat dan pertumbuhan perakaran tanaman padi menjadi tidak maksimal.

Status kesuburan kimiawi lahan sawah di Indonesia secara umum mengalami penurunan kadar karbon organik akibat kebiasaan petani yang kurang memperhatikan pengembalian biomassa ke dalam tanah. Menurut Putra & Hakim (2024), rendahnya kandungan bahan organik ini menyebabkan tanah kehilangan kapasitas penyangga (*buffer capacity*), sehingga tanah menjadi sangat sensitif terhadap perubahan pH dan fluktuasi hara. Tanpa bahan organik yang cukup, koloid tanah tidak mampu menjerap nutrisi dengan kuat, sehingga efisiensi pupuk kimia yang diaplikasikan menjadi sangat rendah.

Masalah fiksasi unsur hara, terutama Fosfor (P) oleh oksida besi dan aluminium, merupakan kendala kimiawi yang umum ditemukan pada tanah-tanah sawah masam di Indonesia. Nur dkk. (2021) menyatakan bahwa pada kondisi tersebut, sebagian besar P yang diberikan melalui pupuk anorganik justru terikat secara kimiawi dan tidak dapat diserap oleh akar tanaman. Penggunaan kompos yang kaya akan asam-asam organik menjadi sangat vital untuk melepaskan ikatan tersebut melalui mekanisme khelasi, sehingga ketersediaan P-tersedia dapat ditingkatkan secara signifikan.

Dinamika ekosistem sawah di Indonesia juga sangat dipengaruhi oleh perubahan penggunaan lahan dan variabilitas iklim ekstrim yang sering memicu asidifikasi tanah. Hayati (2021) mencatat bahwa pada periode kekeringan singkat, tanah sawah yang mengalami oksidasi mendadak akan mengalami penurunan pH yang tajam, yang dapat mengganggu keseimbangan mikrobiota tanah. Kondisi ini menyebabkan terganggunya proses mineralisasi hara alami yang seharusnya berlangsung secara perlahan selama masa pertumbuhan tanaman.

Keanekaragaman hayati tanah dalam ekosistem sawah Indonesia kian terancam akibat penggunaan input kimia sintetis (pupuk dan pestisida) yang tidak bijaksana dalam jangka panjang. Noviana et al. (2023) menegaskan bahwa matinya organisme tanah bermanfaat seperti cacing dan mikroba fiksasi nitrogen alami

mengakibatkan ekosistem kehilangan kemampuan swadaya dalam menyediakan nutrisi. Pemulihan populasi biota tanah ini hanya dimungkinkan melalui perbaikan struktur lingkungan mikro tanah dengan pemberian asupan organik secara berkelanjutan.

Secara strategis, transformasi ekosistem sawah menuju sistem pertanian berkelanjutan di Indonesia menjadi keharusan ilmiah untuk menjamin kemandirian pangan masa depan. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa perlindungan terhadap kualitas fisik dan kimia tanah melalui pemanfaatan pupuk kompos merupakan investasi jangka panjang dalam menjaga daya dukung lahan. Sinergi antara teknologi organik lokal dengan manajemen lahan yang tepat akan memastikan lahan sawah di Indonesia tetap produktif dan mampu menghadapi tantangan degradasi lahan yang kian meningkat.

2.2 Sifat Fisika Tanah Sawah

Sifat fisika tanah sawah merupakan fondasi utama yang menentukan kemampuan tanah dalam menyediakan ruang tumbuh bagi perakaran tanaman serta mengatur tata air dan udara di dalam tanah. Karakteristik fisik tanah sawah sangat unik karena dipengaruhi oleh intervensi manusia melalui pengolahan tanah dalam kondisi basah (pelumpuran) yang bertujuan untuk menciptakan lapisan kedap air. Menurut Pratiwi et al. (2021), kualitas fisika tanah sawah yang baik dicirikan oleh adanya keseimbangan antara drainase dan retensi air, yang sangat dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori tanah setelah mengalami proses penggenangan dan pengeringan secara periodic.

Stabilitas fisik tanah sawah menjadi faktor penentu efisiensi penggunaan input pertanian dan keberlanjutan produksi padi dalam jangka panjang. Gangguan pada sifat fisika tanah, seperti pemadatan atau kerusakan struktur, dapat menghambat difusi gas dan membatasi penetrasi akar, meskipun ketersediaan hara kimiawi terpenuhi. Sebagaimana dijelaskan oleh Sutari (2023), perbaikan sifat fisika tanah melalui manajemen bahan organik merupakan langkah strategis untuk

mengembalikan fungsi ekologis tanah yang telah mengalami degradasi akibat intensifikasi pertanian yang berlebihan.

2.2.1 Tekstur dan Struktur Tanah

Tekstur tanah merupakan sifat fisik tanah yang relatif permanen dan menunjukkan perbandingan berat antara fraksi pasir, debu, dan liat. Dalam ekosistem sawah, tekstur tanah sangat menentukan kemampuan tanah dalam menahan air dan menjerap unsur hara. Menurut Manfarizah dkk. (2020), tanah sawah yang didominasi oleh fraksi liat cenderung memiliki kapasitas menahan air yang tinggi namun memiliki risiko aerasi yang buruk jika tidak dikelola dengan penambahan bahan organik yang cukup.

Struktur tanah sawah memiliki karakteristik yang dinamis karena sering mengalami penghancuran melalui proses pelumpuran (*puddling*). Pelumpuran bertujuan untuk merusak agregat tanah agar terbentuk massa tanah yang halus dan kedap air di lapisan bawah. Lumbanraja (2021) menjelaskan bahwa hancurnya struktur tanah pada lapisan olah sangat penting untuk mempermudah penanaman bibit padi, namun secara jangka panjang dapat menyebabkan hilangnya pori makro jika tidak ada upaya restrukturisasi melalui bahan organik.

Susunan butiran tanah secara langsung memengaruhi distribusi ruang pori, baik pori drainase (makro) maupun pori retensi (mikro). Pada tanah sawah yang terdegradasi, partikel-partikel tanah cenderung tersusun rapat tanpa adanya ikatan agregat yang kuat. Putra & Hakim (2024) menegaskan bahwa bahan organik bertindak sebagai agen pengikat (*cementing agent*) yang menyatukan partikel primer tanah menjadi agregat yang lebih stabil, sehingga menciptakan ruang pori yang lebih proporsional bagi pergerakan air dan udara.

Kandungan liat yang tinggi pada tanah sawah di beberapa wilayah Indonesia sering kali menyebabkan tanah menjadi sangat plastis saat basah dan keras saat kering. Kondisi ini menyulitkan mekanisasi dan menghambat pertumbuhan akar padi pada fase awal.

Yulnafatmawita & Adrinal (2020) menyebutkan bahwa interaksi antara fraksi liat dengan asam humat dari kompos dapat mengurangi sifat kohesif tanah yang berlebihan, sehingga struktur tanah menjadi lebih remah dan mudah diolah (*friable*).

Stabilitas agregat tanah merupakan parameter krusial dalam menjaga keawetan struktur tanah sawah terhadap pukulan air hujan atau penggenangan. Tanah dengan stabilitas agregat yang rendah mudah mengalami dispersi, di mana partikel liat menutupi pori-pori tanah. Sari (2022) mengamati bahwa aplikasi kompos secara konsisten meningkatkan kemantapan agregat tanah sawah, yang secara fisik melindungi ruang pori dari penyumbatan oleh partikel halus selama fase pelumpuran.

Ruang pori yang terbentuk dari susunan tekstur dan struktur tanah menjadi tempat berlangsungnya aktivitas biologis tanah. Mikroorganisme tanah membutuhkan ruang pori yang cukup untuk bergerak dan berinteraksi dengan akar tanaman. Noviana et al. (2023) menyatakan bahwa kerusakan struktur tanah akibat penggunaan pupuk kimia jangka panjang tanpa bahan organik telah mempersempit ruang hidup biota tanah, yang berdampak pada menurunnya laju dekomposisi alami di lahan sawah.

Pada tanah sawah yang telah lama dikelola, sering kali terbentuk lapisan tapak bajak (*plow pan*) pada kedalaman 15–20 cm. Lapisan ini memiliki struktur yang sangat padat dan masif akibat tekanan bajak dan pengendapan partikel halus. Nur dkk. (2021) menjelaskan bahwa meskipun lapisan ini berguna untuk menahan air, struktur yang terlalu padat dapat membatasi penetrasi akar ke lapisan tanah bawah yang lebih kaya akan cadangan air saat terjadi kekeringan.

Tekstur tanah juga menentukan besarnya luas permukaan spesifik koloid tanah yang berpengaruh pada reaksi kimiawi. Tanah bertekstur halus memiliki luas permukaan yang lebih besar untuk berinteraksi dengan bahan organik. Zulaikha dkk. (2021)

menambahkan bahwa perbaikan struktur pada tanah bertekstur liat melalui aplikasi kompos akan menciptakan sistem pori yang lebih kompleks, yang meningkatkan efisiensi jerapan hara pada permukaan partikel tanah.

Perubahan struktur tanah sawah dari kondisi basah ke kering juga memicu terbentuknya retakan-retakan tanah (*cracking*). Retakan ini merupakan indikasi adanya pengerutan massa tanah akibat hilangnya air dari ruang pori. Hayati (2021) mencatat bahwa manajemen bahan organik dapat memodifikasi intensitas retakan ini agar tidak terlalu lebar, sehingga mencegah kehilangan air yang berlebihan melalui perkolasi cepat saat lahan digenangi kembali.

Secara keseluruhan, optimasi tekstur dan struktur tanah melalui bahan organik merupakan kunci pertanian berkelanjutan. Struktur tanah yang mantap menjamin ketersediaan ruang pori yang ideal bagi keseimbangan air dan udara tanah. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa pemahaman mengenai bagaimana susunan butir tanah memengaruhi ruang pori harus menjadi dasar bagi petani dalam menentukan intensitas pengolahan tanah dan dosis pembenah tanah yang diperlukan.

2.2.2 Berat Isi (*Bulk Density*) dan Porositas

Berat isi (*bulk density*) adalah parameter fisik yang menunjukkan perbandingan antara berat tanah kering dengan total volume tanah, termasuk ruang pori. Nilai berat isi yang tinggi mengindikasikan bahwa tanah mengalami pemadatan dan memiliki ruang pori yang sempit. Menurut Sutari (2023), peningkatan berat isi pada lahan sawah sering kali disebabkan oleh praktik pengolahan tanah yang intensif dan minimnya asupan bahan organik yang berfungsi sebagai penggaerasi alami tanah.

Porositas tanah berhubungan terbalik dengan berat isi, di mana semakin tinggi berat isi, maka total porositas tanah akan semakin menurun. Porositas menentukan volume total ruang di dalam tanah yang dapat diisi oleh air dan udara. Pratiwi et al. (2021) menjelaskan

bahwa pada lahan sawah yang padat, porositas makro berkurang drastis, yang menyebabkan laju infiltrasi air menjadi sangat lambat dan menghambat pertukaran gas di zona perakaran.

Hubungan antara kepadatan tanah dan kemampuan infiltrasi air sangatlah erat. Infiltrasi adalah proses masuknya air ke dalam tanah melalui permukaan secara vertikal. Manfarizah dkk. (2020) menyatakan bahwa tanah dengan berat isi rendah memiliki ruang pori yang lebih banyak, sehingga air dapat meresap dengan lebih mudah dan cepat. Sebaliknya, tanah yang padat menciptakan hambatan fisik bagi pergerakan air, yang sering kali menyebabkan air tergenang di permukaan tanpa meresap ke lapisan bawah.

Aplikasi pupuk kompos memiliki pengaruh signifikan dalam menurunkan berat isi tanah melalui peningkatan volume pori total. Bahan organik memiliki kerapatan jenis yang jauh lebih rendah daripada mineral tanah. Zulkarnain dkk. (2024) melaporkan bahwa penambahan kompos ke dalam tanah sawah secara bertahap akan menurunkan berat isi karena bahan organik menyisip di antara partikel mineral dan menciptakan struktur tanah yang lebih gembur dan berpori.

Porositas yang optimal sangat dibutuhkan untuk mendukung respirasi akar tanaman padi, terutama pada fase pertumbuhan vegetatif. Meskipun padi sawah memiliki aerenkim untuk menyalurkan oksigen dari tajuk ke akar, kondisi porositas tanah yang sangat buruk tetap dapat memicu cekaman bagi tanaman. Nur dkk. (2021) menegaskan bahwa pori-pori tanah yang tersumbat akibat pemadatan akan mengakibatkan akumulasi gas-gas toksik seperti H_2S dan CH_4 yang dapat meracuni perakaran padi.

Kemampuan infiltrasi yang baik juga berperan dalam proses pencucian zat-zat beracun dari lapisan olah tanah. Pada tanah sawah yang mengalami asidifikasi, infiltrasi air membantu membawa kelebihan ion-ion asam ke lapisan yang lebih dalam. Damayanti (2023) menemukan bahwa perbaikan porositas tanah melalui

pemberian kompos meningkatkan efisiensi pencucian garam-garam berlebih, sehingga menciptakan lingkungan kimiawi tanah yang lebih sehat bagi tanaman.

Secara teknis, nilai berat isi tanah sawah sering kali bervariasi mengikuti kedalaman profil tanah. Lapisan tapak bajak biasanya memiliki nilai berat isi tertinggi karena menerima tekanan paling besar. Lumbanraja (2021) mencatat bahwa nilai berat isi yang melebihi 1,4 g/cm^3 pada tanah bertekstur halus mulai menghambat penetrasi akar secara mekanis. Oleh karena itu, pengolahan tanah yang dibarengi dengan asupan organik bertujuan untuk menjaga berat isi tetap berada pada level yang ideal.

Distribusi ukuran pori (pori mikro, meso, dan makro) lebih penting daripada total porositas itu sendiri dalam hal produktivitas tanaman. Pori makro bertanggung jawab atas transmisi air dan udara, sedangkan pori mikro bertanggung jawab atas retensi hara. Putra & Hakim (2024) menyatakan bahwa bahan organik dari kompos mampu mengubah proporsi porositas tanah sawah menjadi lebih seimbang, sehingga tanah mampu mengalirkan air berlebih namun tetap menyimpan air cadangan secara efektif.

Pengukuran berat isi secara rutin dapat menjadi indikator awal terjadinya degradasi lahan di tingkat petani. Jika berat isi terus meningkat dari musim ke musim, maka hal tersebut merupakan sinyal terjadinya *soil fatigue*. Sari (2022) menyarankan agar petani melakukan diversifikasi input organik untuk menjaga porositas tanah tetap tinggi, yang secara langsung akan menjaga kemampuan infiltrasi tanah terhadap air irigasi maupun air hujan.

Dalam jangka panjang, menjaga berat isi tetap rendah dan porositas tetap tinggi adalah strategi adaptasi terhadap perubahan iklim. Tanah yang berpori lebih tahan terhadap erosi permukaan dan mampu menyimpan air lebih banyak saat terjadi kekeringan. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa kaitan antara kepadatan tanah dengan kemampuan infiltrasi air harus dipahami sebagai satu kesatuan dalam

pengelolaan tanah sawah yang berkelanjutan untuk mencegah gagal panen akibat kendala fisik lahan.

2.2.3 Kapasitas Menahan Air (*Water Holding Capacity*)

Kapasitas menahan air (*Water Holding Capacity*) didefinisikan sebagai kemampuan tanah untuk menyimpan air setelah kelebihan air terdrainase oleh gaya gravitasi. Bagi tanaman padi sawah, kapasitas ini sangat krusial karena padi merupakan tanaman yang membutuhkan konsumsi air yang tinggi sepanjang siklus hidupnya. Menurut Hayati (2021), ketersediaan fase cair di dalam tanah sawah tidak hanya berfungsi sebagai pelarut hara, tetapi juga sebagai pengatur suhu tanah dan media transportasi nutrisi dari tanah ke akar tanaman.

Pentingnya fase cair dalam tanah sawah berkaitan erat dengan kondisi reduksi yang dibutuhkan untuk ketersediaan unsur hara tertentu. Air mengisi pori-pori tanah dan mengusir oksigen, yang memicu penurunan potensial redoks. Nur dkk. (2021) menjelaskan bahwa tanpa volume air yang cukup di dalam pori tanah, reaksi kimiawi yang menguntungkan seperti peningkatan ketersediaan Fosfor (P) tidak akan terjadi secara optimal, sehingga pertumbuhan padi dapat terhambat.

Bahan organik merupakan faktor kunci yang meningkatkan kapasitas menahan air pada tanah sawah. Molekul-molekul organik dalam kompos memiliki sifat hidrofilik yang kuat, sehingga mampu mengikat molekul air di permukaannya. Sutari (2023) menegaskan bahwa peningkatan kandungan bahan organik dalam tanah sawah secara dramatis meningkatkan jumlah air tersedia bagi tanaman, terutama pada fase-fase kritis seperti fase primordia bunga dan pengisian bulir padi.

Kapasitas menahan air dipengaruhi oleh distribusi pori mikro dan meso yang berfungsi sebagai ruang penyimpan air cadangan. Tanah sawah dengan porositas mikro yang tinggi mampu menahan air melawan gaya gravitasi lebih kuat. Zulaikha dkk. (2021)

menambahkan bahwa aplikasi kompos memperbaiki struktur mikro tanah, sehingga meningkatkan volume air yang tersimpan di dalam ruang antar partikel, yang sangat bermanfaat saat terjadi keterlambatan pasokan air irigasi.

Fase cair dalam tanah sawah juga berperan dalam mengencerkan konsentrasi garam dan zat-zat toksik yang mungkin terakumulasi di zona perakaran. Volume air yang cukup menjamin bahwa konsentrasi larutan tanah tetap berada pada level yang aman bagi akar tanaman. Noviana et al. (2023) menyatakan bahwa pada lahan sawah dengan kapasitas menahan air yang rendah, tanaman padi lebih mudah mengalami keracunan besi (Fe^{2+}) karena larutan tanah menjadi terlalu pekat saat kondisi air menyusut.

Efisiensi penggunaan air dalam pertanian sawah sangat bergantung pada seberapa lama tanah dapat mempertahankan kelembapannya. Tanah yang kaya bahan organik memiliki laju evaporasi yang lebih rendah karena struktur remahnya mampu bertindak sebagai mulsa internal. Sari (2022) mengamati bahwa petakan sawah yang diberi kompos memerlukan frekuensi pengairan yang lebih jarang dibandingkan lahan sawah konvensional, yang menunjukkan peningkatan efisiensi retensi air tanah secara signifikan.

Kemampuan tanah menahan air juga memengaruhi aktivitas mikroorganisme fungsional tanah. Mikroba membutuhkan kelembapan yang stabil untuk melakukan dekomposisi dan siklus hara. Manfarizah dkk. (2020) menjelaskan bahwa fase cair yang stabil di dalam tanah sawah mendukung populasi bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat, yang secara alami akan membantu menyuburkan tanah tanpa bergantung sepenuhnya pada pupuk kimia.

Dalam kondisi tergenang, air sawah juga berfungsi menekan pertumbuhan gulma darat yang kompetitif. Kapasitas menahan air yang baik memastikan bahwa permukaan tanah tetap tertutup lapisan air meskipun pasokan air masuk berkurang sementara. Yulnafatmawita & Adrinal (2020) menyebutkan bahwa retensi air

yang baik merupakan metode pengendalian gulma secara alami yang efektif, yang pada akhirnya akan mengurangi penggunaan herbisida kimia yang merusak lingkungan.

Pada tanah sawah bertekstur pasir atau aluvial kasar, kapasitas menahan air sering kali menjadi kendala utama karena air sangat cepat hilang melalui perkolasi. Penambahan kompos pada jenis tanah ini mutlak diperlukan untuk meningkatkan "daya ikat" air tanah. Damayanti (2023) menemukan bahwa dosis kompos yang tepat mampu meningkatkan titik layu permanen dan kapasitas lapang tanah sawah, sehingga rentang air tersedia bagi tanaman padi menjadi lebih lebar.

Secara strategis, pengelolaan kapasitas menahan air merupakan upaya adaptasi terhadap anomali iklim seperti fenomena El Nino yang sering menyebabkan kekeringan di sentra padi Indonesia. Tanah yang sehat secara fisik mampu bertahan lebih lama terhadap cekaman kekeringan. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa meningkatkan kapasitas menahan air melalui amandemen organik adalah langkah konkret dalam menjaga ketahanan pangan nasional di tengah tantangan krisis air global.

2.3 Sifat Kimia Tanah Sawah

Sifat kimia tanah sawah mencakup seluruh interaksi kompleks antara fase padat, cair, dan gas yang menentukan ketersediaan nutrisi bagi tanaman padi. Perbedaan mendasar antara sifat kimia tanah sawah dan tanah lahan kering terletak pada dinamika potensial oksidasi-reduksi (*redox*) yang terjadi akibat penggenangan. Menurut Zulaikha dkk. (2021), kondisi anaerobik dalam tanah sawah memicu transformasi kimiawi yang signifikan, mulai dari perubahan kemasaman hingga reduksi unsur-unsur logam, yang secara langsung memengaruhi efisiensi penyerapan hara oleh akar tanaman.

Keseimbangan kimiawi tanah sawah sangat sensitif terhadap manajemen input eksternal, baik organik maupun anorganik. Praktik pertanian intensif yang hanya mengandalkan pupuk kimia tanpa

pengembalian bahan organik telah menyebabkan ketidakseimbangan status hara dan penurunan kualitas kimia tanah secara berkelanjutan. Sebagaimana ditegaskan oleh Putra & Hakim (2024), optimasi sifat kimia tanah melalui amandemen organik seperti kompos merupakan strategi esensial untuk memulihkan kapasitas sangga tanah dan menjamin ketersediaan hara makro maupun mikro secara seimbang.

2.3.1 Kemasaman Tanah (pH)

Kemasaman tanah atau pH merupakan parameter kimia yang sangat krusial karena menentukan kelarutan unsur hara dan toksisitas unsur tertentu di dalam tanah sawah. Penggenangan tanah sawah secara alami memicu perubahan pH ke arah netral (6,0–7,0) melalui serangkaian reaksi biokimia. Hardjowigeno (2020) menjelaskan bahwa pada tanah masam, proses reduksi besi dan konsumsi ion hidrogen (H^+) oleh mikroba anaerob akan meningkatkan pH, sedangkan pada tanah alkalis, akumulasi karbon dioksida (CO_2) akan menurunkan pH.

Dinamika pH tanah sawah sangat dipengaruhi oleh keberadaan gas CO_2 yang terperangkap dalam kondisi tergenang. Reaksi antara air dan CO_2 membentuk asam karbonat yang bertindak sebagai sistem penyangga alami. Lumbanraja (2021) menyebutkan bahwa stabilitas pH pada kisaran netral sangat menguntungkan bagi tanaman padi karena pada kondisi ini, sebagian besar unsur hara esensial berada dalam bentuk yang paling tersedia untuk diserap oleh perakaran. Namun, penggunaan pupuk nitrogen anorganik secara masif, khususnya urea, memberikan pengaruh signifikan terhadap fluktuasi pH tanah sawah ke arah masam. Proses nitrifikasi urea melepaskan ion H^+ ke dalam larutan tanah yang jika terjadi secara terus-menerus akan menurunkan pH tanah secara drastis. Nur dkk. (2021) menyatakan bahwa asidifikasi akibat pemupukan urea tunggal tanpa imbuhan organik dapat merusak keseimbangan kimiawi tanah dan memicu kelarutan aluminium yang bersifat toksik.

Fluktuasi pH juga memengaruhi nasib pupuk yang diaplikasikan petani. Pada pH yang terlalu rendah, efisiensi penggunaan pupuk P menjadi sangat minim karena terjadi fiksasi oleh Al dan Fe. Zulaikha dkk. (2021) mengamati bahwa aplikasi bahan organik mampu meredam fluktuasi pH yang ekstrim melalui kapasitas sangga dari gugus fungsional asam humat, sehingga lingkungan perakaran tetap kondusif bagi metabolisme tanaman meskipun terjadi aplikasi pupuk kimia.Kondisi pH tanah sawah juga menentukan laju dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah. Mikroba pendekomposisi umumnya bekerja optimal pada pH mendekati netral. Noviana et al. (2023) menekankan bahwa pH tanah yang terlalu rendah akibat manajemen yang buruk akan menghambat aktivitas biologis, sehingga siklus hara alami dari sisa-sisa tanaman menjadi terhenti dan mengakibatkan tanah menjadi "lapar" meskipun diberi pupuk anorganik.Pada tanah-tanah aluvial yang banyak ditemukan di lahan sawah Indonesia, nilai pH seringkali berkaitan erat dengan kejenuhan basa.

Tanah dengan pH rendah cenderung memiliki cadangan kation basa yang tipis. Manfarizah dkk. (2020) menjelaskan bahwa perbaikan pH melalui pemberian kompos bukan hanya sekadar menaikkan angka pH, tetapi juga meningkatkan cadangan kation di dalam tanah melalui proses mineralisasi bahan organik yang melepaskan basa-basa tanah.Perubahan pH juga berdampak pada muatan koloid tanah, terutama pada tanah yang memiliki muatan tergantung pH (variable charge). Peningkatan pH akibat penggenangan dapat meningkatkan jumlah muatan negatif pada permukaan koloid. Putra & Hakim (2024) menyebutkan bahwa fenomena ini sangat menguntungkan karena tanah menjadi lebih mampu menahan pupuk kation seperti kalium dan amonium agar tidak mudah hilang melalui proses pencucian.Aplikasi kompos secara rutin berperan sebagai stabilisator pH jangka panjang yang efektif. Kompos mengandung senyawa organik kompleks yang mampu mengikat ion

hidrogen berlebih saat tanah terlalu masam. Sari (2022) mengemukakan bahwa lahan sawah yang diberi kompos secara teratur memiliki nilai pH yang lebih stabil di angka netral dibandingkan dengan lahan yang hanya menggunakan pupuk anorganik, sehingga risiko kegagalan panen akibat cekaman kemasaman dapat diminimalisir.Kemasaman tanah juga memengaruhi ketersediaan unsur hara mikro seperti Besi (Fe) dan Mangan (Mn). Pada pH rendah dalam kondisi tergenang, kelarutan besi dapat meningkat hingga level toksik bagi tanaman padi. Damayanti (2023) menemukan bahwa manajemen pH melalui penambahan bahan organik dapat menekan kelarutan besi yang berlebihan melalui mekanisme khelasi, sehingga gejala keracunan besi pada tanaman padi dapat dihindari.

Secara strategis, pemantauan pH tanah sawah di Desa Antutan dan Pejalin harus menjadi prioritas sebelum menentukan dosis pupuk. Memahami pengaruh penggenangan dan pemupukan urea terhadap fluktuasi pH memungkinkan petani untuk melakukan penyesuaian waktu aplikasi pupuk. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa menjaga pH tanah pada kisaran netral melalui integrasi pupuk kimia dan organik adalah landasan utama dalam mewujudkan sistem pertanian padi yang berkelanjutan.

2.3.2 Kapasitas Tukar Kation (KTK)

Kapasitas Tukar Kation (KTK) merupakan ukuran kemampuan tanah untuk menjerap dan menahan kation hara dalam bentuk yang tersedia bagi tanaman. KTK merupakan salah satu indikator utama kesuburan kimiawi tanah sawah karena mencerminkan jumlah total muatan negatif pada permukaan koloid. Menurut Lumbanraja (2021), tanah dengan nilai KTK yang tinggi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyediakan nutrisi secara kontinu dan mencegah kehilangan hara akibat pencucian oleh air irigasi.Muatan negatif pada tanah berasal dari partikel liat dan bahan organik. Di lahan sawah yang telah lama dikelola secara

intensif, peranan bahan organik dalam menyumbang KTK menjadi sangat krusial.

Zulaikha dkk. (2021) menjelaskan bahwa bahan organik memiliki KTK yang jauh lebih tinggi (ratusan kali lipat) dibandingkan mineral liat kaolinit, sehingga penambahan sedikit saja bahan organik dapat meningkatkan kapasitas jerap hara tanah secara signifikan.Kemampuan tanah menjerap dan melepaskan unsur hara bekerja melalui mekanisme pertukaran kation pada permukaan koloid tanah. Kation hara seperti Amonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Kalsium (Ca^{2+}), dan Magnesium (Mg^{2+}) dipegang secara elektrostatistik dan dapat dilepaskan kembali ke dalam larutan tanah saat dibutuhkan tanaman. Nur dkk. (2021) menyatakan bahwa tanpa nilai KTK yang memadai, pupuk yang diberikan petani hanya akan mengalir melewati zona perakaran tanpa sempat diserap oleh tanaman padi.

Nilai KTK tanah sawah bersifat dinamis dan dapat dipengaruhi oleh perubahan pH larutan tanah. Pada kondisi penggenangan di mana pH cenderung naik, jumlah muatan negatif pada bahan organik akan bertambah akibat disosiasi gugus karboksil dan hidroksil. Putra & Hakim (2024) menegaskan bahwa fenomena ini menjadikan tanah sawah memiliki potensi jerap hara yang lebih tinggi saat kondisi tergenang dibandingkan saat kondisi kering atau aerobik.Aplikasi pupuk kompos terbukti secara ilmiah mampu meningkatkan KTK tanah sawah melalui penambahan gugus-gugus fungsional aktif. Kompos yang telah matang kaya akan asam humat yang memiliki banyak situs pertukaran kation.

Sutari (2023) melaporkan bahwa dosis kompos yang tepat mampu meningkatkan KTK tanah secara dramatis, yang pada gilirannya akan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk nitrogen dan kalium oleh tanaman padi.Ketersediaan kation hara di dalam tanah juga dipengaruhi oleh persaingan antar kation pada situs pertukaran. Jika tanah terlalu masam, ion Al^{3+} dan H^+ akan mendominasi situs pertukaran dan mengusir kation bermanfaat.

Yulnafatmawita & Adrinal (2020) menjelaskan bahwa penambahan kompos membantu menyingkirkan aluminium dari situs pertukaran melalui pembentukan kompleks organik, sehingga situs tersebut dapat diisi kembali oleh kation hara makro. KTK juga berfungsi sebagai penyangga terhadap perubahan konsentrasi hara di dalam larutan tanah. Ketika tanaman menyerap hara dari larutan tanah, kation yang terjerap pada koloid akan dilepaskan untuk menjaga keseimbangan.

Mirdat et al. (2021) menyebutkan bahwa tanah sawah dengan KTK tinggi bertindak sebagai "bank nutrisi" yang menjamin pasokan hara tetap stabil sepanjang fase pertumbuhan padi, dari fase vegetatif hingga generatif.Efisiensi pemupukan urea sangat bergantung pada nilai KTK tanah sawah. Ion amonium (NH_4^+) yang dihasilkan dari urea adalah kation yang dapat terjerap pada kompleks pertukaran. Sari (2022) mengemukakan bahwa pada tanah sawah dengan KTK rendah (bahan organik rendah), amonium lebih mudah hilang melalui penguapan gas amonia atau pencucian, sehingga menyebabkan pemborosan biaya pemupukan bagi petani.

Secara teknis, nilai KTK juga dipengaruhi oleh jenis mineral liat yang mendominasi tanah tersebut. Tanah sawah di Indonesia yang didominasi mineral liat tipe 1:1 seperti kaolinit umumnya memiliki KTK bawaan yang rendah. Nur dkk. (2021) menyarankan bahwa pada tanah-tanah tersebut, peningkatan KTK harus diupayakan melalui manajemen bahan organik secara intensif guna menutupi kelemahan sifat fisik mineral liatnya.Dalam perspektif pertanian berkelanjutan, pemeliharaan KTK melalui pupuk kompos adalah langkah jangka panjang untuk menjaga kesehatan kimia tanah. Tanah dengan KTK yang baik cenderung lebih subur dan memerlukan input kimia yang lebih sedikit di masa depan. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa rumusan dosis kompos yang dihasilkan dari penelitian ini akan menjadi kunci dalam mengoptimalkan KTK tanah sawah di Desa Antutan dan Pejalin agar produktivitas lahan tetap terjaga.

2.3.3 Karbon Organik (C-Organik)

Karbon Organik (C-organik) merupakan penyusun utama bahan organik tanah yang menjadi indikator paling vital dalam menilai kesehatan dan kualitas tanah sawah. C-organik berperan sebagai jantung dari kesuburan tanah karena memengaruhi hampir seluruh fungsi fisik, kimia, dan biologi tanah secara simultan. Menurut Lumbanraja (2021), kandungan C-organik tanah mencerminkan keseimbangan antara masukan biomassa tanaman dengan laju dekomposisi mikroba di dalam tanah.Peran bahan organik sebagai indikator utama kesehatan tanah terlihat dari kemampuannya memperbaiki agregasi tanah dan meningkatkan retensi air. Di dalam tanah sawah, C-organik bertindak sebagai perekat partikel tanah yang menciptakan struktur remah dan gembur.

Sari (2022) menyatakan bahwa tanah dengan kadar C-organik di bawah 2% dikategorikan sebagai tanah yang "sakit" atau terdegradasi, karena kehilangan kemampuan alaminya dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.C-organik juga berfungsi sebagai sumber energi utama bagi mikroorganisme tanah yang terlibat dalam siklus hara. Populasi bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat sangat bergantung pada ketersediaan karbon organik sebagai asupan nutrisi. Noviana et al. (2023) menjelaskan bahwa penurunan C-organik secara drastis akibat pembakaran jerami telah memutus mata rantai makanan di bawah tanah, yang mengakibatkan tanah sawah menjadi tidak responsif terhadap pemupukan anorganik.Secara kimiawi, C-organik adalah penyumbang utama muatan negatif yang meningkatkan kapasitas tukar kation.

Gugus karboksil dan hidroksil pada bahan organik mampu mengikat kation hara dengan sangat kuat namun tetap tersedia bagi tanaman. Putra & Hakim (2024) menegaskan bahwa peningkatan 1% C-organik tanah dapat meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan nutrisi secara signifikan, sehingga mengurangi ketergantungan petani

pada pupuk kimia subsidi.Kandungan C-organik tanah sawah umumnya lebih stabil dibandingkan tanah kering karena laju mineralisasi yang lambat dalam kondisi anaerobik. Namun, intensifikasi yang berlebihan seringkali melampaui kemampuan tanah untuk pulih secara alami.

Damayanti (2023) menemukan bahwa aplikasi kompos jerami secara rutin merupakan metode tercepat untuk mengembalikan kadar C-organik ke level ideal (di atas 3%) pada lahan sawah yang telah mengalami kejenuhan.Bahan organik juga berperan penting dalam mendetoksifikasi unsur-unsur logam berat dan beracun di dalam tanah sawah. Asam humat dari C-organik mampu membentuk senyawa kompleks dengan Al, Fe, dan Mn, sehingga mengurangi konsentrasi ion-ion bebas yang merugikan. Zulaikha dkk. (2021) menyatakan bahwa C-organik yang memadai membantu tanaman padi bertahan di lingkungan tanah yang marginal atau tanah yang memiliki akumulasi residu kimia tinggi.Dalam ekosistem sawah, C-organik juga berperan dalam mitigasi perubahan iklim melalui mekanisme sekuestrasi karbon.

Tanah sawah memiliki potensi besar untuk menyimpan karbon dalam jangka waktu lama jika dikelola dengan sistem tanpa pembakaran residu. Hayati (2021) mencatat bahwa pengelolaan C-organik yang baik bukan hanya meningkatkan hasil panen lokal, tetapi juga berkontribusi pada upaya global dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian.Rendahnya kadar C-organik seringkali ditandai dengan perubahan warna tanah menjadi lebih pucat dan tekstur yang menjadi keras saat kering. Tanah dengan kondisi ini memiliki daya hantar air yang buruk dan rentan terhadap erosi. Manfarizah dkk. (2020) menjelaskan bahwa restorasi C-organik melalui pemberian kompos padat akan mengembalikan warna tanah menjadi lebih gelap, yang mengindikasikan peningkatan kandungan karbon dan kemampuan tanah dalam menyerap panas matahari.Efisiensi penggunaan pupuk N di lahan sawah sangat

berkaitan dengan rasio C/N tanah. Bahan organik dengan rasio C/N yang tepat akan melepaskan nitrogen secara perlahan seiring dengan kebutuhan tanaman. Nur dkk. (2021) menyebutkan bahwa C-organik bertindak sebagai pengendali pelepasan hara (slow release) yang mencegah hilangnya nitrogen melalui penguapan gas amonia ke atmosfer.Oleh karena itu, optimasi C-organik melalui pupuk kompos di Desa Antutan dan Pejalin adalah langkah mutlak untuk mendukung pertanian berkelanjutan. Peningkatan C-organik akan memicu "efek domino" positif pada parameter tanah lainnya. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa keberhasilan penelitian ini akan sangat ditentukan oleh sejauh mana aplikasi kompos dapat meningkatkan kadar C-organik sebagai fondasi kesehatan tanah sawah di Kalimantan Utara.2.3.4 Ketersediaan Hara Makro (N, P, K)

Dinamika unsur hara esensial dalam kondisi tereduksi (tergenang) sangat berbeda dengan kondisi aerobik, di mana proses reduksi-oksidasi mengontrol kelarutan dan bentuk kimia hara. Nitrogen (N) merupakan unsur hara makro yang paling dinamis dan sering menjadi pembatas utama produksi padi. Menurut Nur dkk. (2021), dalam tanah sawah tergenang, nitrogen tersedia dalam bentuk amonium (NH_4^+) yang lebih stabil terjerap pada koloid tanah, namun rentan hilang melalui proses denitrifikasi di lapisan tereduksi menjadi gas N_2 atau N_2O.Pemberian bahan organik membantu menstabilkan ketersediaan nitrogen melalui proses mineralisasi yang berkelanjutan. Kompos tidak hanya memberikan pasokan N langsung, tetapi juga menyediakan karbon bagi mikroba penambat N bebas dari udara. Noviana et al. (2023) menjelaskan bahwa ketersediaan nitrogen yang berasal dari kompos lebih sinkron dengan kebutuhan tanaman padi dibandingkan pupuk urea yang sangat cepat larut dan mudah hilang dari lingkungan sawah.

Unsur hara Fosfor (P) mengalami peningkatan ketersediaan yang signifikan saat tanah sawah digenangi. Proses reduksi besi oksida (Fe^{3+}) melepaskan fosfat yang sebelumnya terikat kuat.

Zulaikha dkk. (2021) menyatakan bahwa meskipun terjadi peningkatan alami, efektivitas P tetap sangat dipengaruhi oleh kandungan bahan organik. Asam organik dari kompos mampu mencegah terjadinya fiksasi ulang P oleh aluminium atau besi melalui pembentukan kompleks organik yang lebih stabil.

Aplikasi kompos juga secara nyata meningkatkan ketersediaan P-tersedia melalui proses pelarutan batuan fosfat oleh asam-asam organik hasil dekomposisi. Hayati (2021) menyebutkan bahwa pada tanah sawah masam, penggunaan bahan organik jauh lebih efektif dalam menyediakan hara P dibandingkan penambahan dosis pupuk SP-36 secara tunggal. Hal ini menjadikan kompos sebagai kunci dalam mengatasi masalah kemiskinan fosfor pada lahan-lahan sawah marginal di Indonesia.Kalium (K) berperan vital dalam mengatur metabolisme air dan daya tahan tanaman padi terhadap serangan hama penyakit. Dalam tanah sawah, kalium tersedia dalam bentuk kation yang terjerap pada koloid liat atau bahan organik. Manfarizah dkk. (2020) menjelaskan bahwa ketersediaan K sangat bergantung pada kapasitas tukar kation tanah. Peningkatan KTK melalui aplikasi kompos secara otomatis akan meningkatkan kemampuan tanah dalam menyediakan kalium bagi tanaman sepanjang musim tanam.Dinamika hara kalium juga dipengaruhi oleh pengembalian jerami padi yang kaya akan unsur K. Kebiasaan petani yang membuang jerami menyebabkan defisit kalium yang parah pada lahan sawah. Sari (2022) menegaskan bahwa penggunaan kompos jerami adalah cara terbaik untuk mengembalikan unsur K ke dalam tanah tanpa harus mengeluarkan biaya besar untuk pembelian pupuk KCl anorganik, sehingga siklus hara dalam ekosistem sawah tetap tertutup.

Ketersediaan hara makro secara keseluruhan sangat dipengaruhi oleh potensial redoks (Eh) tanah. Perubahan Eh mengontrol transformasi kimiawi yang menentukan apakah suatu unsur hara berada dalam bentuk yang dapat diserap tanaman atau

tidak. Putra & Hakim (2024) menjelaskan bahwa bahan organik bertindak sebagai penyeimbang reaksi redoks, sehingga mencegah terjadinya kondisi yang terlalu anaerobik (sangat tereduksi) yang dapat menghambat penyerapan hara oleh akar tanaman.Masalah utama dalam manajemen hara makro di lahan sawah adalah efisiensi yang rendah akibat kehilangan hara ke lingkungan. Nitrogen hilang melalui penguapan, sedangkan kalium mudah tercuci pada tanah bertekstur kasar.

Nur dkk. (2021) menyatakan bahwa struktur remah dan KTK tinggi hasil dari aplikasi kompos mampu menjerat hara-hara makro tersebut lebih lama di zona perakaran, sehingga efisiensi pemupukan meningkat secara nyata.Sinkronisasi antara pelepasan hara dari kompos dengan kebutuhan tanaman pada fase-fase kritis sangat menentukan hasil panen. Tanaman padi membutuhkan suplai hara yang stabil sejak fase anakan hingga fase pengisian malai.

Zulkarnain dkk. (2024) melaporkan bahwa plot penelitian yang menggunakan kombinasi kompos dan pupuk anorganik menunjukkan status hara daun yang lebih hijau dan pertumbuhan yang lebih seragam dibandingkan plot konvensional.Oleh karena itu, kajian ketersediaan hara makro dalam penelitian ini sangat penting untuk merumuskan dosis pupuk kompos yang paling optimal bagi Desa Antutan dan Pejalin. Ketersediaan N, P, dan K yang berimbang akan mendukung pertumbuhan tanaman padi yang lebih sehat dan tahan cekaman. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa pencapaian hasil padi yang tinggi dalam sistem pertanian berkelanjutan hanya dapat dicapai melalui pengelolaan dinamika hara yang presisi dan berbasis bahan organik lokal.

2.4 Pupuk Kompos sebagai Bahan Pembenah Tanah (*Soil Conditioner*)

Pupuk kompos merupakan bahan organik yang telah mengalami proses dekomposisi atau pelapukan secara biologis sehingga berubah menjadi material yang stabil dan kaya akan hara. Sebagai bahan

pembenah tanah (*soil conditioner*), kompos memiliki keunggulan multifungsi yang tidak dimiliki oleh pupuk kimia, yaitu kemampuan untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah secara simultan. Menurut Sutari (2023), aplikasi kompos di lahan sawah bertujuan untuk mengembalikan fungsi ekologis tanah yang telah mengalami degradasi akibat penggunaan input sintetis yang berlebihan dalam jangka panjang.

Efektivitas kompos sebagai pembenah tanah sangat ditentukan oleh tingkat kematangannya dan kualitas bahan baku yang digunakan. Kompos yang matang sempurna memiliki rasio C/N yang rendah, aroma tanah yang segar, dan tidak lagi menghasilkan panas berlebih yang dapat membakar akar tanaman. Sebagaimana dijelaskan oleh Zulkarnain dkk. (2024), peran utama kompos bukan hanya sebagai penyedia nutrisi langsung bagi padi, melainkan sebagai agen stabilisator struktur tanah yang menjamin keberlanjutan produktivitas lahan sawah di masa depan.

2.4.1 Definisi dan Proses Dekomposisi

Definisi kompos secara ilmiah adalah hasil dekomposisi parsial dari campuran bahan-bahan organik yang dipercepat secara artifisial oleh populasi berbagai macam mikroba dalam kondisi lingkungan yang hangat, lembap, dan aerobik atau anaerobik. Proses ini merupakan siklus alami pengembalian unsur hara dari biomassa kembali ke tanah. Menurut Hayati (2021), pengomposan mengubah limbah pertanian yang sulit terurai menjadi material organik sederhana yang lebih mudah diserap oleh tanaman dan bermanfaat bagi struktur tanah.

Tahapan pengomposan dimulai dengan fase mesofilik, di mana mikroorganisme pemula mulai merombak senyawa organik sederhana seperti gula dan asam amino. Pada fase ini, aktivitas mikroba menyebabkan peningkatan suhu tumpukan kompos secara bertahap. Noviana et al. (2023) menjelaskan bahwa keberhasilan tahap awal ini sangat bergantung pada kelembapan dan aerasi yang cukup untuk mendukung pertumbuhan bakteri dan jamur pendekomposisi yang bekerja pada suhu moderat.

Setelah fase mesofilik, proses berlanjut ke fase termofilik di mana suhu tumpukan dapat mencapai 55°C hingga 70°C. Suhu tinggi ini sangat penting untuk membunuh patogen dan biji gulma yang terbawa dalam bahan baku. Sari (2022) menyatakan bahwa pada tahap termofilik, mikroorganisme termofilik seperti *Actinomycetes* bekerja intensif merombak polimer kompleks seperti selulosa dan hemiselulosa menjadi senyawa yang lebih sederhana.

Peran mikroorganisme pendekomposisi bersifat suksesi, di mana jenis mikroba yang mendominasi akan berganti seiring dengan perubahan suhu dan ketersediaan substrat. Bakteri, jamur, dan aktinomisetes bekerja sama dalam memutus rantai karbon yang kompleks. Nur dkk. (2021) menyebutkan bahwa tanpa aktivitas mikroba ini, residu tanaman seperti jerami padi akan menumpuk di lahan sawah tanpa memberikan manfaat nutrisi, bahkan dapat mengganggu keseimbangan nitrogen tanah jika dibenamkan dalam kondisi mentah.

Tahap akhir dari pengomposan adalah fase pematangan (*cooling phase*) di mana suhu kembali menurun dan aktivitas mikroba mulai melambat. Pada fase ini, senyawa-senyawa antara yang tidak stabil akan mengalami polimerisasi membentuk zat humik yang berwarna gelap. Damayanti (2023) menegaskan bahwa kompos yang benar-benar matang dicirikan oleh hilangnya bau amonia dan munculnya tekstur remah yang menyerupai tanah, menandakan proses dekomposisi telah selesai dengan sempurna.

Kualitas kompos juga dipengaruhi oleh rasio Karbon terhadap Nitrogen (C/N) dari bahan baku yang digunakan. Rasio C/N yang terlalu tinggi akan memperlambat dekomposisi, sementara rasio yang terlalu rendah dapat menyebabkan hilangnya nitrogen melalui penguapan amonia. Manfarizah dkk. (2020) menjelaskan bahwa keseimbangan nutrisi mikroba selama dekomposisi sangat menentukan kandungan hara akhir dalam kompos yang dihasilkan sebagai pembenah tanah sawah.

Faktor lingkungan seperti pH dan oksigen sangat mengontrol laju dekomposisi di dalam tumpukan kompos. Kondisi yang terlalu asam dapat menghambat bakteri, sementara kondisi terlalu basah dapat memicu proses anaerobik yang menghasilkan bau tidak sedap. Lumbanraja (2021) mencatat bahwa manajemen pengomposan yang baik harus mampu menjaga keseimbangan udara dan air agar mikroba aerobik dapat bekerja optimal dalam menghasilkan produk akhir yang berkualitas tinggi.

Mikroorganisme pendekomposisi juga menghasilkan enzim-enzim ekstraseluler yang membantu memecah lignin, senyawa yang paling sulit terurai pada sisa tanaman. Enzim ini bertindak sebagai pemotong rantai molekul besar menjadi fragmen kecil yang dapat diserap mikroba. Yulnafatmawita & Adrinal (2020) menambahkan bahwa keberadaan lignin yang terdekomposisi sebagian menjadi cikal bakal terbentuknya asam humat yang sangat bermanfaat bagi kapasitas tukar kation tanah.

Dalam ekosistem sawah, penggunaan kompos yang telah didekomposisi dengan baik mencegah terjadinya persaingan nitrogen antara mikroba dan tanaman padi. Pembenaman bahan organik mentah sering kali menyebabkan fiksasi nitrogen sementara (*immobilization*) yang membuat tanaman padi menguning. Zulaikha dkk. (2021) menyarankan bahwa penggunaan kompos matang adalah solusi terbaik untuk menjamin ketersediaan hara langsung sejak bibit padi mulai ditanam di lahan.

Secara keseluruhan, pemahaman mengenai tahapan pengomposan dan peran mikroba sangat penting bagi keberhasilan program pertanian berkelanjutan. Kompos yang diproduksi secara benar akan menjadi mesin penggerak kesuburan tanah yang mandiri. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa pemanfaatan limbah lokal melalui proses dekomposisi yang terkontrol merupakan langkah nyata dalam menekan biaya produksi dan memulihkan kesehatan lahan sawah secara permanen.

2.4.2 Kandungan Asam Humat dan Fulvat

Asam humat dan asam fulvat merupakan komponen utama dari zat humik yang terbentuk selama proses humifikasi bahan organik. Zat ini adalah senyawa organik kompleks yang memiliki berat molekul tinggi dan bersifat sangat stabil di dalam tanah. Menurut Lumbanraja (2021), asam humat memiliki peran sentral dalam memperbaiki agregasi tanah karena kemampuannya mengikat partikel-partikel primer tanah menjadi butiran sekunder yang lebih mantap dan tahan terhadap erosi.

Peran senyawa organik kompleks ini dalam memperbaiki agregasi tanah bekerja melalui pembentukan jembatan kation antara partikel liat dan bahan organik. Gugus fungsional pada asam humat, seperti karboksil dan hidroksil, bertindak sebagai lem biologis yang merekatkan butiran debu dan liat. Sutari (2023) menjelaskan bahwa struktur tanah yang mantap hasil dari pengaruh zat humik akan meningkatkan porositas dan permeabilitas tanah, yang sangat penting bagi sirkulasi udara di lahan sawah.

Asam fulvat memiliki ukuran molekul yang lebih kecil dibandingkan asam humat dan bersifat lebih larut dalam air pada berbagai rentang pH. Hal ini memungkinkan asam fulvat bergerak lebih bebas di dalam larutan tanah dan membantu transportasi unsur hara ke akar tanaman. Nur dkk. (2021) menyatakan bahwa asam fulvat berperan sebagai agen pengkhelat alami yang dapat membawa mikronutrien melewati membran sel akar dengan lebih efisien, sehingga meningkatkan status gizi tanaman padi.

Di dalam tanah sawah yang tergenang, asam humat berperan sebagai electron acceptor yang dapat memodifikasi kondisi oksidasi-reduksi tanah. Hal ini membantu mencegah fluktuasi kimiawi yang terlalu ekstrem yang dapat merusak sistem perakaran. Putra & Hakim (2024) menegaskan bahwa kandungan zat humik yang tinggi dalam kompos memberikan daya lenting (resilience) bagi tanah sawah terhadap tekanan lingkungan, seperti kekeringan atau salinitas tinggi.

Peningkatan stabilitas agregat melalui zat humik juga secara signifikan menurunkan berat isi (bulk density) tanah. Tanah menjadi lebih remah dan tidak mudah memadat meskipun menerima tekanan mekanis. Sari (2022) mengamati bahwa lahan sawah yang kaya akan asam humat memiliki perkembangan akar yang lebih dalam dan ekstensif karena hambatan mekanis tanah yang rendah, sehingga tanaman padi mampu menyerap air dari lapisan bawah dengan lebih baik.

Selain memperbaiki fisik, asam humat juga berperan sebagai agen detoksifikasi aluminium (Al^{3+}) dan besi (Fe^{2+}) pada tanah masam. Melalui mekanisme pembentukan kompleks khelat, asam humat mengikat ion-ion logam beracun tersebut sehingga tidak lagi aktif dalam larutan tanah. Zulaikha dkk. (2021) menyebutkan bahwa peran ini sangat krusial di lahan sawah Kalimantan yang sering menghadapi kendala kelarutan besi yang tinggi, yang dapat memicu gejala "penyakit fisiologis" pada padi.

Asam fulvat juga memiliki kemampuan untuk merangsang aktivitas enzimatis di dalam tanaman padi secara langsung. Senyawa ini bertindak sebagai biostimulan yang mempercepat metabolisme dan pembelahan sel. Noviana et al. (2023) melaporkan bahwa tanaman yang diberi asupan kompos dengan kandungan asam fulvat tinggi menunjukkan laju fotosintesis yang lebih baik dan pembentukan anakan padi yang lebih produktif dibandingkan tanpa asupan organik.

Kemampuan zat humik dalam menyimpan air juga sangat luar biasa, di mana asam humat mampu menahan air berkali-kali lipat dari berat molekulnya sendiri. Ini membantu menjaga kelembapan tanah di zona perakaran tetap stabil. Hayati (2021) menjelaskan bahwa keberadaan senyawa organik kompleks ini menciptakan lingkungan mikro yang lembap bagi biota tanah, sehingga proses mineralisasi hara dapat berlangsung secara kontinu meskipun pasokan air irigasi sedang terbatas.

Secara kimiawi, asam humat menyumbang sebagian besar kapasitas tukar kation (KTK) dari bahan organik. Jumlah gugus aktif yang sangat banyak memungkinkan jerapan kation hara makro seperti K, Ca, dan Mg menjadi sangat efektif. Manfarizah dkk. (2020) menyatakan bahwa tanpa adanya fraksi humik dalam kompos, kemampuan tanah dalam menyimpan cadangan nutrisi jangka panjang akan hilang, dan tanah akan menjadi sangat tergantung pada pemupukan kimia harian.

Oleh karena itu, kualitas pupuk kompos yang diaplikasikan di Desa Antutan dan Pejalin harus dipastikan memiliki kandungan zat humik yang memadai melalui proses pematangan yang cukup. Pemanfaatan asam humat dan fulvat adalah kunci dalam mereformasi struktur tanah sawah yang telah mengalami kerusakan fisik dan kimia. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa fokus penelitian pada penguatan agregasi tanah melalui zat humik merupakan langkah saintifik yang tepat untuk mendukung visi pertanian berkelanjutan.

2.4.3 Pengaruh Kompos terhadap Perbaikan Sifat Fisika Tanah

Pengaruh kompos terhadap perbaikan sifat fisika tanah bersifat fundamental dan jangka panjang, terutama dalam mengubah tekstur yang keras menjadi struktur yang lebih gembur. Mekanisme penggemburan tanah melalui bahan organik terjadi ketika kompos menyisip di antara partikel-partikel mineral tanah yang padat dan menciptakan ruang-ruang pori baru. Menurut Sutari (2023), penambahan kompos secara nyata menurunkan kepadatan massa tanah, yang diindikasikan oleh penurunan nilai berat isi (bulk density) yang signifikan pada lahan sawah intensif.

Tanah sawah yang gembur memfasilitasi penetrasi akar tanaman padi untuk tumbuh lebih dalam dan luas tanpa hambatan fisik yang berarti. Akar yang berkembang baik memiliki luas permukaan penyerapan hara yang lebih besar. Pratiwi et al. (2021) menjelaskan bahwa perbaikan sifat fisik ini secara langsung berkorelasi dengan

ketahanan tanaman terhadap rebah, karena sistem perakaran memiliki cengkeraman yang lebih kuat pada struktur tanah yang mantap dan beragregat baik.

Mekanisme perbaikan fisik juga mencakup peningkatan total porositas tanah, khususnya pori-pori makro yang berfungsi untuk aerasi dan infiltrasi air. Pada tanah sawah yang tergenang, pori-pori ini penting untuk memastikan gas-gas hasil metabolisme tanah dapat bertukar dengan atmosfer. Zulkarnain dkk. (2024) menyatakan bahwa aplikasi kompos mencegah terbentuknya kondisi anaerobik ekstrem yang dapat memicu pembusukan akar, melalui penyediaan sistem pori yang lebih terorganisir.

Kapasitas menahan air (Water Holding Capacity) juga mengalami peningkatan drastis seiring dengan bertambahnya kandungan kompos di dalam tanah. Bahan organik bertindak seperti spons yang menyerap dan menyimpan air di dalam struktur porinya. Hayati (2021) mencatat bahwa lahan sawah yang diberi kompos menunjukkan daya tahan yang lebih baik terhadap cekaman kekeringan singkat dibandingkan lahan konvensional, karena tanah memiliki cadangan air tersedia yang lebih melimpah.

Kompos juga berperan dalam menstabilkan suhu tanah dari fluktuasi ekstrim siang dan malam. Bahan organik yang berwarna gelap mampu menyerap panas dengan baik namun juga bertindak sebagai isolator yang mencegah kehilangan panas terlalu cepat. Nur dkk. (2021) menjelaskan bahwa suhu tanah yang stabil sangat mendukung aktivitas enzimatis dan pertumbuhan mikroba bermanfaat, yang pada gilirannya akan mempercepat ketersediaan nutrisi bagi tanaman padi.

Daya hantar air jenuh (permeabilitas) tanah sawah juga diperbaiki oleh aplikasi kompos melalui pembentukan saluran-saluran pori yang kontinu. Hal ini mencegah air menggenang terlalu lama di permukaan tanah yang dapat menyebabkan perlapisan hara yang tidak merata. Manfarizah dkk. (2020) menyatakan bahwa infiltrasi yang

lebih baik membantu pencucian zat-zat beracun dari lapisan olah ke lapisan bawah, sehingga kesehatan lingkungan perakaran tetap terjaga.

Pemberian kompos juga mengurangi sifat lekat dan plastisitas pada tanah bertekstur liat yang sering menyulitkan pengolahan lahan. Tanah menjadi lebih mudah dibajak dan tidak membentuk bongkahan-bongkahan keras saat kering. Damayanti (2023) menemukan bahwa efisiensi tenaga kerja dan penggunaan alsintan meningkat pada lahan sawah yang telah diberi amandemen organik secara rutin karena struktur tanahnya yang jauh lebih remah dan gampang dikerjakan.

Mekanisme penggemburan oleh kompos juga melibatkan peran fauna tanah seperti cacing tanah yang populasinya meningkat seiring bertambahnya bahan organik. Cacing tanah membuat liang-liang (biopores) yang semakin meningkatkan porositas tanah. Noviana et al. (2023) menegaskan bahwa sinergi antara bahan organik kompos dengan aktivitas makrofauna tanah merupakan cara alami yang paling efektif dalam memperbaiki struktur fisik tanah tanpa merusak ekosistem.

Secara estetis dan praktis, tanah sawah yang kaya bahan organik memiliki warna yang lebih hitam dan tekstur yang tidak "bantat" atau keras. Kondisi fisik yang sehat ini merupakan prasyarat agar fungsi kimiawi tanah dapat bekerja optimal. Sari (2022) berpendapat bahwa tanpa perbaikan sifat fisik terlebih dahulu, pemberian pupuk kimia dosis tinggi sekalipun tidak akan mampu memberikan hasil maksimal karena akar tanaman tercekam oleh lingkungan fisik yang buruk.

Oleh karena itu, dalam penelitian di Desa Antutan dan Pejalin, parameter fisik tanah menjadi indikator keberhasilan aplikasi kompos yang sangat krusial. Perubahan fisik tanah ke arah yang lebih baik merupakan bukti nyata dari restorasi kesehatan lahan. Lestari dkk. (2021) menyimpulkan bahwa optimasi sifat fisik melalui kompos

adalah langkah dasar bagi terciptanya sistem pertanian padi yang tangguh dan berkelanjutan di wilayah Kalimantan Utara.

2.4.4 Pengaruh Kompos terhadap Perbaikan Sifat Kimia Tanah

Pengaruh kompos terhadap perbaikan sifat kimia tanah mencakup spektrum yang luas, mulai dari peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) hingga penyediaan hara secara berkelanjutan. Mekanisme peningkatan KTK terjadi karena penambahan koloid organik yang memiliki situs-situs muatan negatif yang sangat padat pada permukaannya. Menurut Lumbanraja (2021), situs-situs ini berasal dari disosiasi gugus karboksil dan fenolik pada bahan organik yang mampu menjerap kation hara dan melindunginya dari proses pencucian air irigasi.

Peningkatan KTK secara langsung berdampak pada efisiensi pemupukan, di mana tanah mampu menahan cadangan nutrisi lebih banyak untuk dilepaskan secara perlahan sesuai kebutuhan tanaman. Hal ini sangat menguntungkan pada tanah sawah yang memiliki kandungan liat rendah atau didominasi liat kaolinit. Putra & Hakim (2024) menjelaskan bahwa dengan KTK yang tinggi, kation-kation tersimpan dengan aman pada kompleks pertukaran, sehingga meminimalisir pemborosan input pertanian.

Penyediaan hara *slow release* (pelepasan lambat) adalah salah satu keunggulan utama kompos dibandingkan pupuk kimia sintetis. Unsur hara dalam kompos terikat dalam bentuk senyawa organik yang kompleks dan hanya akan terlepas menjadi bentuk tersedia melalui proses mineralisasi oleh mikroba. Noviana et al. (2023) menyatakan bahwa pola pelepasan hara ini sangat sesuai dengan kurva kebutuhan tanaman padi yang memerlukan nutrisi secara bertahap dari fase anakan hingga pengisian bulir.

Mekanisme pelepasan lambat ini mencegah terjadinya lonjakan konsentrasi hara yang tiba-tiba di dalam larutan tanah yang dapat memicu keracunan atau pertumbuhan vegetatif yang berlebihan (rebah). Selain itu, hara yang dilepaskan secara perlahan akan terus

tersedia di zona perakaran dalam waktu yang lebih lama. Nur dkk. (2021) menambahkan bahwa kompos bertindak sebagai reservoir nutrisi yang menjamin tanaman tidak kekurangan gizi pada fase-fase kritis pertumbuhannya.

Kompos juga berperan aktif dalam meningkatkan ketersediaan hara makro lainnya, seperti Fosfor (P), melalui mekanisme pelarutan batuan fosfat dan pencegahan fiksasi. Asam organik hasil dekomposisi kompos mampu mengkhelat aluminium dan besi yang biasanya mengikat fosfat pada tanah masam. Zulaikha dkk. (2021) menyatakan bahwa aplikasi kompos terbukti meningkatkan nilai P-tersedia dalam tanah sawah secara signifikan tanpa perlu menambah dosis pupuk SP-36.

Perbaikan pH tanah juga merupakan salah satu pengaruh kimiawi dari pemberian kompos. Bahan organik bertindak sebagai *buffer* atau penyangga yang mampu meredam kenaikan atau penurunan pH yang drastis akibat pemupukan urea atau kondisi lingkungan. Sari (2022) menjelaskan bahwa dengan pH yang lebih stabil, efektivitas penyerapan hara oleh akar padi menjadi lebih optimal karena sebagian besar nutrisi berada dalam bentuk yang mudah diserap pada pH mendekati netral.

Kandungan mikronutrien dalam kompos, meskipun dalam jumlah kecil, sangat lengkap dan esensial bagi metabolisme tanaman padi. Unsur hara seperti Zn, Cu, Mn, dan B sering kali tidak tersedia dalam pupuk NPK standar. Manfarizah dkk. (2020) menegaskan bahwa aplikasi kompos melengkapi kebutuhan hara mikro tersebut, sehingga tanaman padi tumbuh lebih sehat dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap serangan hama dan penyakit.

Bahan organik juga membantu menekan akumulasi residu pestisida dan logam berat dalam tanah sawah melalui proses adsorpsi dan degradasi biologis yang dipercepat. Mikroba yang melimpah dalam kompos membantu merombak senyawa kimia kompleks menjadi produk yang tidak berbahaya. Damayanti (2023) menemukan

bahwa tanah yang diberi amandemen organik secara rutin memiliki tingkat residu kimia yang lebih rendah, sehingga menghasilkan beras yang lebih sehat untuk dikonsumsi.

Secara keseluruhan, perbaikan sifat kimia melalui kompos memberikan dampak sistemik pada kesuburan tanah jangka panjang. Tanah tidak hanya menjadi lebih subur, tetapi juga lebih efisien dalam mengelola siklus nutrisi internalnya. Hayati (2021) menekankan bahwa penggunaan kompos merupakan strategi cerdas untuk mengurangi ketergantungan pada pupuk subsidi sekaligus meningkatkan kualitas hasil panen secara berkelanjutan.

Oleh karena itu, dalam penelitian di Desa Antutan dan Pejalin, kajian mengenai peningkatan KTK dan dinamika hara *slow release* menjadi fokus utama untuk membuktikan efektivitas kompos. Data kimia tanah ini akan menjadi dasar kuat dalam memberikan rekomendasi dosis pemupukan yang presisi bagi petani setempat. Lestari dkk. (2021) menyimpulkan bahwa penguatan status kimia tanah melalui bahan organik lokal adalah solusi fundamental bagi kedaulatan pangan di wilayah Kalimantan Utara.

2.5 **Konsep** Pertanian Berkelanjutan (*Sustainable Agriculture*)

Pertanian berkelanjutan merupakan sistem budidaya tanaman yang mengintegrasikan aspek lingkungan, keadilan sosial, dan profitabilitas ekonomi untuk menjamin produktivitas jangka panjang. Konsep ini muncul sebagai respons terhadap kegagalan revolusi hijau yang terlalu fokus pada output kuantitas namun mengabaikan degradasi sumber daya lahan. Menurut Lestari dkk. (2021), pertanian berkelanjutan bukan berarti kembali ke cara tradisional yang primitif, melainkan penggunaan teknologi modern yang selaras dengan daya dukung

ekosistem untuk memenuhi kebutuhan pangan generasi sekarang tanpa mengorbankan masa depan.

Dalam konteks budidaya padi sawah, keberlanjutan sangat bergantung pada kesehatan tanah sebagai modal utama produksi. Pengelolaan yang berkelanjutan menuntut adanya keseimbangan antara apa yang diambil dari tanah (hasil panen) dengan apa yang dikembalikan ke tanah (bahan organik). Sebagaimana ditegaskan oleh Hayati (2021), sistem ini bertujuan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencucian hara dan emisi gas rumah kaca, sekaligus meningkatkan kemandirian petani terhadap input eksternal yang mahal dan tidak ramah lingkungan.

2.5.1 Prinsip Dasar Pertanian Berkelanjutan

Prinsip dasar pertanian berkelanjutan berdiri di atas tiga pilar utama yang saling berhubungan: kelestarian ekologi, kelayakan ekonomi, dan keadilan sosial. Aspek ekologi menekankan pada pemeliharaan kualitas sumber daya alam, terutama tanah dan air, melalui konservasi hayati dan minimalisasi residu kimia. Menurut Manfarizah dkk. (2020), ekosistem sawah yang berkelanjutan harus mampu mempertahankan siklus nutrisi secara alami dengan mengoptimalkan peran mikroorganisme tanah sebagai mesin dekomposisi hara.

Dari aspek ekonomi, pertanian berkelanjutan harus mampu memberikan keuntungan yang stabil bagi petani melalui efisiensi biaya produksi. Ketergantungan yang tinggi pada pupuk dan pestisida

kimia sintetis sering kali menjerat petani dalam biaya tinggi yang tidak sebanding dengan harga jual gabah. Noviana et al. (2023) menjelaskan bahwa pemanfaatan sumber daya lokal seperti kompos dapat menekan biaya pembelian pupuk anorganik, sehingga meningkatkan pendapatan bersih keluarga petani di pedesaan.

Aspek sosial dalam pertanian berkelanjutan berkaitan dengan penerimaan teknologi oleh masyarakat dan keberlanjutan budaya bertani. Sistem ini mendorong kemandirian komunitas lokal dalam mengelola sumber daya mereka sendiri. Sari (2022) menyatakan bahwa edukasi mengenai pembuatan kompos secara mandiri memperkuat solidaritas sosial antar petani dan mengurangi ketergantungan pada kebijakan subsidi pupuk pemerintah yang sering kali mengalami kendala distribusi di lapangan.

Budidaya padi sawah berkelanjutan juga mengedepankan prinsip diversifikasi dan integrasi. Penggunaan varietas unggul yang adaptif terhadap lingkungan setempat dikombinasikan dengan pemupukan organik terpadu. Nur dkk. (2021) menegaskan bahwa menjaga keanekaragaman hayati di atas dan di bawah permukaan tanah akan menciptakan keseimbangan alami yang menekan populasi hama secara mandiri tanpa harus selalu menggunakan pestisida kimia dosis tinggi.

Prinsip efisiensi energi juga menjadi bagian tak terpisahkan dalam konsep ini. Pertanian konvensional sangat boros energi fosil, baik untuk mesin maupun pembuatan pupuk kimia (Proses Haber-

Bosch). Hayati (2021) menjelaskan bahwa pertanian organik dan berkelanjutan lebih hemat energi karena mengandalkan proses biologis alami. Hal ini sangat krusial dalam menghadapi krisis energi global dan upaya penurunan jejak karbon di sektor pertanian nasional.

Kelestarian sumber daya air dalam ekosistem sawah berkelanjutan dikelola melalui pengaturan irigasi yang presisi. Tanah yang sehat secara fisik karena asupan organik memiliki kemampuan retensi air yang lebih baik, sehingga menghemat penggunaan air irigasi. Putra & Hakim (2024) mencatat bahwa manajemen air yang baik juga mencegah terjadinya kondisi tanah yang terlalu masam atau terlalu reduksi, yang dapat mengganggu ketersediaan hara bagi tanaman.

Ketahanan terhadap perubahan iklim merupakan salah satu output utama dari penerapan prinsip pertanian berkelanjutan. Tanah dengan kandungan bahan organik tinggi lebih resilien terhadap cekaman kekeringan maupun banjir. Damayanti (2023) menemukan bahwa sistem pertanian berkelanjutan meningkatkan daya lenting tanaman padi terhadap anomali cuaca, yang pada akhirnya menjamin stabilitas pasokan pangan di tingkat wilayah maupun nasional.

Prinsip keadilan antargenerasi menuntut agar praktik pertanian saat ini tidak meninggalkan "warisan" lahan yang rusak bagi generasi mendatang. Penggunaan input kimia yang tidak terkendali sering kali meninggalkan residu logam berat yang sulit hilang. Lestari dkk. (2021) menekankan bahwa setiap tindakan pemupukan harus

mempertimbangkan dampak jangka panjangnya terhadap struktur dan biologi tanah agar fungsi produksi lahan tetap terjaga selama puluhan tahun ke depan.

Penerapan prinsip berkelanjutan di tingkat desa, seperti di Antutan dan Pejalin, memerlukan pendekatan partisipatif. Petani bukan hanya objek, melainkan subjek yang harus memahami filosofi di balik penggunaan kompos. Wicara dkk. (2023) melaporkan bahwa keberhasilan transisi menuju pertanian berkelanjutan sangat ditentukan oleh kesadaran kolektif petani akan pentingnya menjaga "kesehatan" bumi tempat mereka berpijak melalui praktik-praktik agronomis yang bijak.

Secara keseluruhan, prinsip dasar ini merupakan satu kesatuan yang tidak dapat dipisahkan. Keberlanjutan ekologi memberikan landasan bagi keberlanjutan ekonomi, dan keberlanjutan ekonomi memberikan ruang bagi stabilitas sosial. Zulkarnain dkk. (2024) menyimpulkan bahwa penelitian mengenai optimasi kualitas tanah melalui kompos adalah wujud nyata penerapan prinsip pertanian berkelanjutan yang menghubungkan antara teori ilmiah dengan kebutuhan praktis petani di lapangan.

2.5.2 Reduksi Input Kimia melalui Amandemen Organik

Reduksi input kimia merupakan strategi krusial dalam pertanian berkelanjutan untuk memutus siklus kerusakan tanah yang diakibatkan oleh intensifikasi berlebihan. Amandemen organik, seperti pemberian kompos, menjadi substitusi strategis yang mampu

menggantikan peran pupuk kimia dalam menyediakan hara sekaligus memperbaiki struktur tanah. Menurut Nur dkk. (2021), pengurangan dosis pupuk anorganik yang diimbangi dengan peningkatan asupan organik terbukti mampu menjaga hasil panen tetap tinggi tanpa mengorbankan kualitas kesehatan lahan.

Fenomena kelelahan tanah (soil fatigue) sering terjadi pada lahan sawah yang terus-menerus dipacu dengan pupuk urea dan NPK tunggal tanpa jeda. Kondisi ini ditandai dengan penurunan respon tanaman terhadap pemupukan, meskipun dosisnya telah ditingkatkan. Lumbanraja (2021) menjelaskan bahwa soil fatigue disebabkan oleh hilangnya mikroflora bermanfaat dan kerusakan koloid tanah, yang hanya dapat diatasi dengan "mengistirahatkan" tanah dari bahan kimia dan memberikan asupan organik yang masif.

Mekanisme amandemen organik dalam mencegah soil fatigue bekerja melalui pemulihan kapasitas sangga (buffer) tanah. Bahan organik meningkatkan kapasitas tukar kation, sehingga tanah tidak lagi sensitif terhadap fluktuasi kimiawi yang ekstrim. Putra & Hakim (2024) menegaskan bahwa tanah dengan kandungan organik yang cukup memiliki kemampuan "penyembuhan diri" terhadap residu kimia dan penstabilan pH yang lebih baik dibandingkan tanah yang miskin karbon organik.

Strategi jangka panjang reduksi input kimia juga berdampak pada kesehatan mikroba tanah yang selama ini tertekan oleh garam-garam anorganik yang pekat. Aplikasi kompos menyediakan rumah

dan makanan bagi bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat alami. Noviana et al. (2023) menyatakan bahwa dengan pulihnya populasi mikroba fungsional, ketergantungan pada pupuk N dan P sintetis secara bertahap dapat dikurangi karena tanah mulai mampu menyediakan haranya sendiri secara mandiri.

Secara ekonomi, reduksi input kimia memberikan perlindungan bagi petani dari fluktuasi harga pupuk dunia yang sering kali tidak menentu. Dengan memanfaatkan limbah pertanian lokal sebagai kompos, petani memiliki kedaulatan atas asupan nutrisi tanaman mereka. Sari (2022) mengemukakan bahwa pengurangan 25-50% pupuk kimia melalui integrasi kompos tidak menurunkan produktivitas, justru meningkatkan keuntungan petani karena penurunan biaya operasional yang signifikan.

Amandemen organik juga berperan dalam memperbaiki efisiensi penggunaan pupuk (Fertilizer Use Efficiency). Pada tanah yang miskin bahan organik, sebagian besar pupuk kimia akan hilang menguap atau tercuci. Sutari (2023) menjelaskan bahwa bahan organik dalam kompos bertindak sebagai "jangkar" yang menahan hara kimia agar tetap berada di zona perakaran, sehingga setiap butir pupuk yang diberikan dapat diserap secara maksimal oleh tanaman padi.

Pencegahan soil fatigue melalui kompos juga mencakup perbaikan sifat fisik tanah yang masif. Tanah sawah yang lelah biasanya menjadi sangat padat dan sulit ditembus air. Zulkarnain dkk.

(2024) melaporkan bahwa amandemen organik memperbaiki porositas tanah, sehingga sirkulasi oksigen kembali lancar dan akar tanaman tidak lagi mengalami stres pernapasan. Fisik tanah yang gembur merupakan ciri utama dari lahan yang telah pulih dari fenomena kelelahan tanah.

Dalam perspektif lingkungan, reduksi input kimia melalui amandemen organik menurunkan risiko pencucian nitrat dan fosfat ke perairan umum yang dapat menyebabkan eutrofikasi. Pertanian berkelanjutan menuntut adanya tanggung jawab terhadap ekosistem di luar lahan sawah. Hayati (2021) menekankan bahwa penggunaan kompos jerami adalah langkah konservasi yang cerdas untuk menjaga kemurnian air tanah dan keberlangsungan hidup biota perairan di sekitar wilayah pertanian.

Keberhasilan strategi jangka panjang ini memerlukan konsistensi dalam pengembalian biomassa ke lahan. Pertanian berkelanjutan bukanlah hasil instan, melainkan proses akumulatif dari perbaikan sifat tanah dari musim ke musim. Yulnafatmawita & Adrinal (2020) menyarankan agar petani di wilayah seperti Antutan dan Pejalin mulai membiasakan penggunaan kompos secara bertahap untuk mereklamasi lahan sawah mereka yang telah jenuh dengan bahan kimia selama puluhan tahun.

Kesimpulannya, amandemen organik adalah kunci utama dalam menjamin masa depan pertanian padi di Indonesia. Reduksi input kimia bukan berarti menghilangkan pupuk anorganik sama

sekali, melainkan menggunakannya secara bijak dan proporsional dalam bingkai pemupukan terpadu. Lestari dkk. (2021) merumuskan bahwa kesehatan tanah yang terjaga melalui asupan organik adalah jaminan terbaik bagi ketahanan pangan nasional dan kesejahteraan petani di masa yang akan datang.

2.6 Penelitian Terdahulu (*State of the Art*)

Penelitian mengenai aplikasi pupuk kompos pada lahan sawah telah menjadi fokus utama dalam upaya restorasi kesuburan tanah di berbagai wilayah Indonesia selama beberapa tahun terakhir. Pada tahun 2021, beberapa studi krusial memberikan fondasi mengenai pentingnya bahan organik. Lumbanraja (2021) menekankan bahwa integrasi bahan organik bukan sekadar penambah hara, melainkan komponen vital dalam memperbaiki Kapasitas Tukar Kation (KTK) pada tanah-tanah marginal. Sejalan dengan itu, Mirdat et al. (2021) melalui penelitiannya di Desa Sidera menunjukkan bahwa pemberian berbagai bahan organik secara nyata memperbaiki sifat kimia tanah sawah, terutama pada stabilitas pH dan ketersediaan hara makro. Masih di tahun yang sama, Pratiwi et al. (2021) membuktikan bahwa sistem pertanian organik yang mengandalkan kompos memiliki karakteristik fisik tanah (porositas dan stabilitas agregat) yang jauh lebih unggul dibandingkan dengan sistem konvensional yang terus-menerus terpapar pupuk kimia.

Memasuki tahun 2022, fokus penelitian mulai bergeser pada strategi praktis dan efisiensi tenaga kerja di tingkat petani. Sari (2022) dalam studinya menggarisbawahi bahwa pemanfaatan limbah lokal sebagai bahan baku kompos merupakan strategi paling efektif untuk meningkatkan kualitas tanah sawah di pedesaan sekaligus menekan biaya produksi. Penelitian ini memberikan gambaran bahwa keberhasilan amandemen organik sangat ditentukan oleh keberlanjutan pasokan bahan baku yang ada di sekitar lokasi lahan sawah.

Pada tahun 2023, pendalaman mengenai parameter fisik dan efektivitas berbagai jenis organik semakin detail. Sutari (2023)

melakukan kajian mendalam mengenai pengaruh berbagai dosis kompos terhadap berat isi (*bulk density*) dan porositas, menemukan bahwa dosis yang tepat mampu menurunkan kepadatan tanah secara signifikan. Di sisi lain, Damayanti (2023) dan Noviana et al. (2023) secara kolektif menyoroti peran amandemen organik dalam mengurangi ketergantungan pada input kimia. Mereka menemukan bahwa aplikasi organik tidak hanya memperbaiki tanah, tetapi juga memulihkan populasi mikroba fungsional yang sempat hilang akibat fenomena *soil fatigue*.

Terakhir, pada tahun 2024, penelitian terbaru oleh Zulkarnain dkk. (2024) serta Putra & Hakim (2024) memberikan konfirmasi kuat mengenai mekanisme *slow release* dari kompos. Mereka menyatakan bahwa C-organik dalam kompos bertindak sebagai indikator kesehatan tanah yang paling akurat, di mana peningkatannya secara otomatis diikuti oleh perbaikan sifat fisika dan kimia tanah sawah. Rangkaian penelitian terdahulu ini menunjukkan adanya *research gap* atau ruang penelitian untuk menguji dosis optimal kompos secara spesifik pada lokasi Desa Antutan dan Pejalin di Kalimantan Utara, yang memiliki karakteristik lingkungan dan tantangan biofisik yang unik dibandingkan lokasi-lokasi penelitian sebelumnya.

No	Peneliti & Tahun	Lokasi Penelitian	Parameter yang Diamati	Hasil Utama Penelitian
1	**Mirdat et al. (2021)**	Desa Sidera	Sifat Kimia (pH, KTK, Hara)	Bahan organik secara nyata meningkatkan pH dan KTK tanah sawah.
2	**Pratiwi et al. (2021)**	Indonesia (Umum)	Sifat Fisika (Agregat, Porositas)	Lahan organik memiliki porositas dan stabilitas agregat lebih baik dari konvensional.
3	**Sari (2022)**	Sentra Padi	Manajemen Bahan Organik Lokal	Pemanfaatan limbah lokal efektif memperbaiki kualitas tanah dan ekonomi petani.

4	**Sutari (2023)**	Lahan Sawah Intensif	*Bulk Density* & Porositas	Dosis kompos yang optimal signifikan menurunkan berat isi tanah (*bulk density*).
5	**Noviana et al. (2023)**	Wilayah Pedesaan	Reduksi Input Kimia	Aplikasi organik memicu pemulihan biota tanah dan mengurangi ketergantungan pupuk kimia.
6	**Zulkarnain dkk. (2024)**	Lahan Sawah	Fisika & Kimia Tanah	Kompos memperbaiki struktur tanah dan menyediakan hara secara *slow release*.
7	**Putra & Hakim (2024)**	Lahan Sawah	C-Organik & Kesuburan	C-Organik adalah indikator kunci; peningkatannya memperbaiki KTK dan daya sangga tanah.

Berdasarkan tinjauan terhadap berbagai penelitian terdahulu di atas, dapat disimpulkan bahwa aplikasi pupuk kompos secara konsisten memberikan dampak positif yang signifikan terhadap perbaikan kualitas fisik dan kimia tanah sawah di berbagai tipologi lahan di Indonesia. Namun, sebagian besar studi tersebut dilakukan pada ekosistem sawah di Pulau Jawa dan Sulawesi yang memiliki karakteristik tanah dan manajemen pengairan yang berbeda dengan wilayah Kalimantan. Terdapat celah penelitian (*research gap*) mengenai efektivitas dosis spesifik kompos pada tanah aluvial di wilayah pedesaan Kabupaten Bulungan, khususnya Desa Antutan dan Pejalin, yang menghadapi tantangan berupa tingkat kemasaman tanah yang tinggi dan kerentanan terhadap pencucian hara. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan menguji optimasi kualitas tanah melalui pendekatan organik lokal guna merumuskan strategi pertanian berkelanjutan yang aplikatif bagi petani di Kalimantan Utara.

Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada integrasi parameter fisik dan kimia tanah yang disesuaikan dengan kondisi biofisik

lokal, sehingga dapat dihasilkan rekomendasi pemupukan yang lebih presisi dan efisien.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.1.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di hamparan lahan sawah yang terletak di Desa Antutan dan Desa Pejalin, Kecamatan Tanjung Palas, Kabupaten Bulungan, Provinsi Kalimantan Utara. Secara geografis, lokasi ini berada pada zona transisi aluvial yang dipengaruhi oleh dinamika aliran Sungai Kayan. Pemilihan lokasi ini merepresentasikan tipologi lahan sawah di Indonesia yang umumnya terbentuk dari endapan kuarter, di mana pengelolaan air dan tanah menjadi faktor pembatas utama dalam mencapai produktivitas tanaman padi yang optimal.

Secara umum, ekosistem lahan sawah di Indonesia saat ini menghadapi tantangan besar berupa penurunan kualitas kesehatan tanah akibat praktik intensifikasi yang berlangsung selama beberapa dekade. Ketergantungan yang tinggi pada pupuk anorganik tanpa diimbangi dengan pengembalian bahan organik telah memicu kejenuhan lahan di banyak wilayah. Kondisi global ini menjadi landasan penting untuk meninjau kembali sejauh mana intervensi pembenah tanah organik dapat merevitalisasi fungsi-fungsi dasar tanah sawah yang telah mengalami penurunan daya dukung (Lestari dkk., 2021).

Kaitan antara kondisi makro tersebut dengan lokasi penelitian di Desa Antutan dan Pejalin terlihat dari pola budidaya masyarakat setempat yang mulai merasakan fluktuasi hasil panen. Sebagai salah satu wilayah penyangga pangan di Kabupaten Bulungan, kedua desa ini memiliki sejarah panjang dalam budidaya padi sawah. Namun, menurut laporan BPS Kabupaten Bulungan (2024), terdapat indikasi awal bahwa efisiensi pemupukan kimia di wilayah ini mulai menurun, yang diduga berkaitan dengan rendahnya cadangan karbon organik dan

ketidakstabilan struktur fisik tanah akibat proses pelumpuran yang monoton.

Lokasi di Desa Antutan dan Pejalin dipilih karena memiliki karakteristik tanah yang unik, yakni tanah aluvial masam dengan risiko pencucian hara yang tinggi saat curah hujan meningkat. Karakteristik ini sangat kontras dengan tanah sawah di Pulau Jawa, sehingga hasil penelitian di lokasi ini akan memberikan kontribusi ilmiah baru mengenai dosis optimal kompos pada tanah luar Jawa yang memiliki kendala biofisik spesifik (Kurniawan dkk., 2021). Penelitian di lokasi ini diharapkan mampu memberikan potret nyata mengenai efektivitas amandemen organik dalam memperbaiki sifat fisika dan kimia tanah pada ekosistem lokal.

Selain pertimbangan teknis pedologis, pemilihan Desa Antutan dan Pejalin juga didasarkan pada aspek representasi sosial ekonomi petani di Kalimantan Utara. Sebagian besar petani di lokasi ini masih memiliki akses terbatas terhadap informasi pemupukan organik yang presisi (Noviana et al., 2023). Dengan menetapkan kedua desa ini sebagai lokasi studi, penelitian tidak hanya berfungsi sebagai pengumpulan data ilmiah, tetapi juga sebagai upaya edukatif untuk menunjukkan kepada komunitas tani setempat bahwa perbaikan kualitas tanah secara organik adalah kunci utama dalam menjaga keberlanjutan usaha tani mereka di masa depan.

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini direncanakan berlangsung selama lima bulan, mulai dari tahap observasi awal hingga penyusunan laporan akhir. Jangka waktu ini ditetapkan untuk memberikan kesempatan bagi pupuk kompos agar berinteraksi secara biologis dengan mineral tanah melalui masa inkubasi yang cukup. Menurut Sutari (2023), masa inkubasi bahan organik yang ideal diperlukan untuk mencapai keseimbangan reaksi biokimia sebelum parameter fisik dan kimia tanah diukur kembali. Rangkaian kegiatan disusun

secara sistematis agar pengambilan data dilakukan pada fase yang tepat, sehingga mencerminkan perubahan kualitas tanah secara akurat.

Pelaksanaan penelitian mengikuti tahapan yang terukur, dimulai dari survei lapangan untuk menentukan titik pengambilan sampel, diikuti dengan pengolahan lahan dan aplikasi dosis kompos yang diuji. Analisis laboratorium dilakukan setelah sampel tanah diambil secara periodik untuk melihat dinamika perubahan yang terjadi. Jadwal pelaksanaan kegiatan penelitian secara rinci disajikan pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3. 1. Waktu pelaksanaan penelitian

No	Tahapan Kegiatan	Bulan				
		1	2	3	4	5
1	Survei Lokasi & Sampling Tanah Awal					
2	Persiapan Bahan & Pengolahan Lahan					
3	Aplikasi Kompos & Masa Inkubasi					
4	Pemeliharaan Plot & Observasi Lapangan					
5	Pengambilan Sampel Tanah Akhir					
6	Analisis Laboratorium (Fisika & Kimia)					
7	Pengolahan Data & Penyusunan Laporan					

3.2 Bahan dan Alat

Penyediaan bahan dan alat yang tepat merupakan prasyarat utama dalam menjamin akurasi data hasil penelitian, baik pada tahap pengambilan sampel di lapangan maupun tahap analisis di laboratorium. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan standar prosedur analisis tanah sawah untuk memastikan bahwa interaksi antara amandemen organik (kompos) dengan mineral tanah dapat teramati dengan presisi. Sementara itu, instrumen atau alat yang digunakan

mencakup perangkat mekanis lapangan untuk pengambilan sampel tanah utuh dan terganggu, serta peralatan instrumen laboratorium yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi untuk mendeteksi perubahan parameter kimia dan fisika tanah.

3.2.1 Bahan Penelitian

Bahan utama dalam penelitian ini terdiri dari komponen biotik dan abiotik yang menjadi subjek maupun media perlakuan. Sampel tanah sawah diambil dari lapisan olah sebagai media tanam utama, sedangkan pupuk kompos lokal hasil dekomposisi limbah pertanian digunakan sebagai bahan amandemen organik yang diuji dosisnya. Selain bahan utama lapangan, digunakan pula berbagai reagen kimia murni (*Analytical Reagent*) untuk keperluan ekstraksi dan titrasi hara di laboratorium. Penggunaan bahan kimia seperti asam sulfat pekat dan kalium dikromat mengacu pada metode standar penetapan karbon organik tanah. Rincian bahan yang digunakan disajikan pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3. 2. Daftar Bahan Penelitian dan Fungsinya

No	**Bahan Penelitian**	**Spesifikasi/Jenis**	**Fungsi Utama**
1	Sampel Tanah	Tanah Sawah (Aluvial)	Media utama pengamatan dan analisis
2	Pupuk Kompos	Organik (Lokal)	Bahan amandemen (pembenah) tanah
3	Air Irigasi	Air Permukiman/Sungai	Media pelarut dan penggenangan sawah
4	Aquades	*Distilled Water*	Pelarut reagen dan pencucian alat lab
5	Asam Sulfat	Pekat	Oksidator pada analisis C-Organik
6	Kalium Dikromat	Larutan standar	Oksidator karbon pada metode *Walkley & Black*
7	Amonium Asetat	1 N pH 7,0	Ekstrak kation untuk analisis KTK

No	Bahan Penelitian	Spesifikasi/Jenis	Fungsi Utama
8	Reagen Bray / Olsen	Larutan Ekstrak	Penentuan ketersediaan Fosfor (P)
9	Larutan Buffer	pH 4,0 dan 7,0	Kalibrasi alat pH meter

3.2.2 Alat Penelitian

Peralatan penelitian diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar, yaitu alat lapangan dan alat laboratorium. Alat lapangan berfungsi untuk mendukung proses teknis budidaya, pengukuran koordinat, serta pengambilan sampel tanah agar tetap terjaga integritas fisiknya (khususnya untuk sampel tanah utuh). Alat laboratorium mencakup instrumen analisis kuantitatif yang digunakan untuk mengukur konsentrasi unsur hara dan sifat fisik tanah secara laboratoris. Penggunaan instrumen seperti spektrofotometer dan pH meter digital menjamin data yang dihasilkan memiliki tingkat galat (*error*) yang minimal. Daftar alat yang digunakan dalam penelitian ini dirinci pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3. 3. Daftar Alat Penelitian dan Kegunaannya

No	Nama Alat	Kategori	Kegunaan Utama
1	GPS (*Global Positioning System*)	Lapangan	Menentukan titik koordinat lokasi sampling
2	Bor Tanah (*Soil Auger*)	Lapangan	Mengambil sampel tanah terganggu (komposit)
3	*Ring Sample* (Tabung Tembaga)	Lapangan	Mengambil sampel tanah utuh untuk *Bulk Density*
4	Cangkul & Sekop	Lapangan	Pengolahan tanah dan pembuatan plot
5	Label & Kantong Plastik	Lapangan	Identifikasi dan wadah sampel tanah
6	Timbangan Analitik	Laboratorium	Menimbang sampel tanah dan bahan kimia (ketelitian 0,001 g)

No	Nama Alat	Kategori	Kegunaan Utama
7	pH Meter Digital	Laboratorium	Mengukur tingkat kemasaman tanah (pH H 2O dan KCl)
8	Spektrofotometer UV-Vis	Laboratorium	Mengukur kadar P-tersedia dan C-organik
9	*Flame Photometer*	Laboratorium	Menganalisis kandungan Kalium (K) dan Natrium (Na)
10	Tanur (*Muffle Furnace*)	Laboratorium	Pengabuan sampel untuk analisis bahan organik
11	Oven Pengering	Laboratorium	Mengeringkan sampel tanah untuk kadar air
12	Ayakan Tanah (2 mm & 0,5 mm)	Laboratorium	Menyeragamkan ukuran partikel sampel tanah

3.3 Metode Penelitian

Pendekatan metodologis dalam penelitian ini dirancang untuk menguji pengaruh aplikasi dosis pupuk kompos terhadap perubahan sifat fisika dan kimia tanah sawah secara kuantitatif. Penggunaan metode eksperimental lapangan memungkinkan peneliti untuk mengamati interaksi antara amandemen organik dengan kondisi lingkungan riil, termasuk pengaruh fluktuasi air dan suhu tanah. Seluruh prosedur statistik dan teknis plot dirancang untuk meminimalkan galat percobaan serta memastikan bahwa perubahan yang terjadi pada parameter tanah benar-benar merupakan representasi dari perlakuan yang diberikan.

3.3.1 Rancangan Percobaan

Rancangan statistik yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktor tunggal. Pemilihan RAK didasarkan pada kondisi lahan sawah di lokasi penelitian (Antutan dan Pejalin) yang memiliki tingkat heterogenitas tertentu, seperti kemiringan lereng yang landai atau gradien kesuburan tanah yang dipengaruhi oleh arah aliran air irigasi. Dengan pengelompokan (blok), pengaruh keragaman

lingkungan di luar perlakuan dapat dikontrol sehingga meningkatkan presisi percobaan.

Penelitian ini terdiri dari satu faktor utama, yaitu dosis pupuk kompos, yang diulang sebanyak 3 (tiga) kali sebagai blok atau kelompok. Penempatan unit percobaan di dalam setiap blok dilakukan secara acak menggunakan tabel angka acak atau undian untuk menjamin prinsip objektivitas dalam desain eksperimen. Data yang diperoleh kemudian diuji menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA) untuk melihat pengaruh nyata perlakuan terhadap parameter fisik dan kimia tanah.

3.3.2 Perlakuan Penelitian

Perlakuan yang diuji dalam penelitian ini difokuskan pada gradasi dosis pupuk kompos untuk menentukan titik optimasi kualitas tanah. Penentuan dosis mengacu pada kebutuhan standar bahan organik tanah sawah dan mempertimbangkan hasil penelitian terdahulu mengenai dosis efektif amandemen organik di wilayah tropis. Perlakuan tersebut mencakup kontrol (tanpa kompos) hingga dosis tinggi (15 ton/ha) untuk melihat respon tanah secara linear maupun kuadratik. Rincian perlakuan disajikan pada Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3. 4. Simbol dan Dosis Perlakuan Pupuk Kompos

Simbol Perlakuan	**Dosis (ton/ha)**	**Dosis per Plot (20 m2)**	**Keterangan**
K_0	0	0 kg	Kontrol (Hanya pupuk anorganik)
K_1	2,5	5 kg	Dosis rendah (Stimulasi mikroba)
K_2	5,0	10 kg	Dosis sedang (Perbaikan struktur)
K_3	7,5	15 kg	Dosis tinggi (Optimasi hara)

3.3.3 Penentuan Plot Percobaan

Penentuan dimensi dan tata letak plot percobaan dilakukan secara sistematis guna menjamin akurasi sampling serta

menghindari gangguan antar unit percobaan (*inter-plot interference*). Luas total areal penelitian disesuaikan dengan jumlah plot, yaitu 12 unit percobaan yang berasal dari kombinasi 4 level perlakuan dosis kompos dan 3 ulangan (kelompok). Setiap unit percobaan dibuat dalam bentuk plot permanen dengan pembatas berupa pematang kecil setinggi 20–30 cm yang dilapisi plastik tipis. Hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya pencampuran bahan organik atau kontaminasi hara antar perlakuan akibat aliran air permukaan (*surface run-off*) maupun perembesan air irigasi.

Untuk menghindari efek tepi (*border effect*), pengambilan sampel tanah pasca-inkubasi nantinya hanya dilakukan pada area tengah plot (*effective area*), yakni dengan menyisakan jarak sekitar 0,5 meter dari pematang pembatas. Jarak antar plot di dalam satu blok serta jarak antar blok diatur sedemikian rupa untuk memfasilitasi mobilitas peneliti selama kegiatan pemeliharaan dan pengamatan, sehingga tidak merusak struktur tanah di dalam plot utama. Spesifikasi teknis tata letak plot yang telah disesuaikan dengan kebutuhan operasional di lapangan dirinci pada Tabel 3.5 sebagai berikut:

Tabel 3. 5. Spesifikasi Teknis Tata Letak Plot Percobaan

No	**Komponen Tata Letak**	**Ukuran / Spesifikasi**	**Keterangan**
1	Luas Plot Individu	4 \text{ m} \times 5 \text{ m}	Luas per unit percobaan 20 \text{ m}^2
2	Jumlah Perlakuan	4 Level (K_0, K_1, K_2, K_3)	Rentang dosis 0 - 7,5 ton/ha
3	Jumlah Ulangan (Blok)	3 Kelompok	Pengulangan berdasarkan gradien lahan
4	Total Unit Percobaan	12 Plot	Total luas pengamatan 240 \text{ m}^2
5	Kebutuhan Kompos Maksimal	15 kg / Plot	Untuk perlakuan K_3 (7,5 ton/ha)

No	Komponen Tata Letak	Ukuran / Spesifikasi	Keterangan
6	Lebar Pematang Pembatas	0,3 meter	Sekaligus berfungsi sebagai pembatas hara
7	Jarak Antar Blok	1,0 meter	Sebagai jalan akses dan saluran drainase
8	Area Sampling Efektif	3 \text{ m} \times 4 \text{ m}	Bagian tengah plot (menghindari *border effect*)

3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Prosedur pelaksanaan penelitian merupakan rangkaian tahapan teknis yang dilakukan secara berurutan untuk memastikan perlakuan kompos dapat berinteraksi secara optimal dengan tanah. Ketepatan dalam setiap tahapan, mulai dari penyiapan media hingga teknik pengambilan sampel, sangat menentukan representativitas data yang dihasilkan. Prosedur ini dirancang mengikuti kaidah agronomi standar untuk lahan sawah, dengan memperhatikan aspek homogenitas pengolahan dan akurasi dosis amandemen organik.

3.4.1 Persiapan Lahan dan Media

Persiapan lahan dimulai dengan pembersihan area penelitian dari sisa-sisa tanaman (gulma) dan batuan yang dapat mengganggu homogenitas tanah. Setelah lahan bersih, dilakukan pengolahan tanah awal melalui proses pembajakan dan penggaruan hingga mencapai kondisi lumpur yang stabil (*puddling*). Proses pelumpuran ini bertujuan untuk merusak bongkahan tanah, meningkatkan retensi air, dan memudahkan pencampuran bahan organik pada tahap berikutnya.

Selanjutnya, dilakukan pembuatan plot-plot percobaan sesuai dengan denah Rancangan Acak Kelompok (RAK). Setiap plot dibatasi dengan pematang yang kokoh dan dilapisi plastik pada bagian dalam untuk mencegah terjadinya pertukaran hara antar unit percobaan akibat aliran air (perkolasi lateral). Setelah plot terbentuk, dilakukan penggenangan lahan setinggi 2–5 cm

untuk menjaga kondisi anaerobik khas tanah sawah sebelum aplikasi perlakuan dimulai.

3.4.2 Aplikasi Pupuk Kompos

Aplikasi pupuk kompos dilakukan setelah kondisi lumpur di dalam plot mencapai tingkat kemantapan yang seragam. Teknik aplikasi dilakukan dengan cara penebaran secara merata (*broadcasting*) di atas permukaan plot sesuai dengan dosis perlakuan masing-masing. Setelah ditebar, kompos dicampur secara manual menggunakan cangkul atau alat pengaduk hingga terintegrasi sepenuhnya ke dalam lapisan olah tanah pada kedalaman 0–20 cm.

Setelah pencampuran, dilakukan masa inkubasi selama 14–21 hari. Masa inkubasi ini sangat krusial untuk memberikan kesempatan bagi mikroorganisme tanah melakukan dekomposisi lanjutan dan proses pertukaran kation antara gugus aktif kompos dengan kompleks jerapan tanah. Selama masa ini, ketinggian air dijaga pada kondisi macak-macak (jenuh air tanpa genangan dalam) untuk mendukung aktivitas biokimia tanah. Rincian prosedur aplikasi dan inkubasi disajikan pada Tabel 3.6 berikut:

Tabel 3. 6 Prosedur Aplikasi dan Masa Inkubasi Kompos

No	**Tahapan Aplikasi**	**Teknik Pelaksanaan**	**Tujuan Teknis**
1	Penimbangan Dosis	Menggunakan timbangan sesuai perhitungan kg/plot	Menjamin akurasi dosis perlakuan
2	Penebaran (*Broadcasting*)	Tebar merata pada seluruh permukaan plot	Distribusi bahan organik yang homogen
3	Pencampuran (*Mixing*)	Pengadukan hingga kedalaman 20 cm	Penempatan hara pada zona perakaran
4	Penggenangan Awal	Tinggi air 2 cm (macak-macak)	Menciptakan kondisi reduksi terkontrol
5	Inkubasi	Pendiaman lahan selama 2-3 minggu	Stabilisasi reaksi kimia dan hara

3.4.3 Pengambilan Sampel Tanah

Pengambilan sampel tanah dilakukan pada dua fase utama, yaitu sebelum perlakuan (*baseline*) dan setelah masa inkubasi selesai (*post-treatment*). Teknik pengambilan sampel dibedakan menjadi dua kategori berdasarkan parameter yang akan dianalisis, yaitu sampel tanah terganggu (komposit) dan sampel tanah utuh (*undisturbed*). Sampel tanah komposit diambil dari 5 titik per plot secara diagonal pada kedalaman 0–20 cm, kemudian dicampur rata untuk mewakili satu unit percobaan guna analisis kimia tanah (pH, C-organik, KTK, dan hara).

Sementara itu, sampel tanah utuh diambil menggunakan tabung tembaga (*ring sample*) untuk menjaga struktur asli tanah guna analisis sifat fisik, terutama berat isi (*bulk density*) dan porositas. Pengambilan sampel dilakukan dengan hati-hati agar tidak terjadi penekanan (*compression*) yang dapat merubah volume pori tanah. Rincian metode pengambilan sampel dirinci pada Tabel 3.7 sebagai berikut:

Tabel 3. 7. Teknik Pengambilan dan Peruntukan Sampel Tanah

No	**Jenis Sampel**	**Alat**	**Parameter Analisis**	**Cara Penanganan**
1	**Tanah Komposit**	Bor Tanah / Cangkul	pH, C-Org, N, P, K, KTK	Dikeringangi nkan, tumbuk, ayat 2 mm
2	**Tanah Utuh**	*Ring Sample*	*Bulk Density*, Porositas	Ditutup rapat, jaga kelembapan asli
3	**Sampel Fisik**	Sekop / Bor	Tekstur Tanah	Analisis fraksi pasir, debu, liat

3.5 Parameter Pengamatan

Parameter pengamatan dalam penelitian ini difokuskan pada indikator kunci kualitas tanah yang mencakup sifat fisika dan kimia. Pemilihan parameter ini didasarkan pada kemampuannya untuk

merespons aplikasi bahan organik (kompos) serta pengaruhnya yang signifikan terhadap media tumbuh tanaman padi. Analisis dilakukan menggunakan metode standar laboratorium untuk menjamin validitas dan reprodusibilitas data, sehingga perubahan kualitas tanah akibat berbagai dosis kompos dapat dikuantifikasi secara akurat.

3.5.1 Analisis Sifat Fisika Tanah

Analisis sifat fisika tanah bertujuan untuk mengevaluasi perubahan arsitektur tanah dan kemampuannya dalam mengelola fase cair serta gas. Aplikasi kompos diharapkan mampu memperbaiki ruang pori dan menurunkan kepadatan tanah sawah yang seringkali mengalami pemadatan akibat proses pelumpuran yang terus-menerus. Parameter fisika yang diamati meliputi tekstur tanah untuk mengetahui kelas fraksi, berat isi (*bulk density*) sebagai indikator kepadatan, porositas total untuk menilai ruang udara, serta kapasitas menahan air untuk mengetahui efisiensi retensi kelembapan.

3.5.2 Analisis Sifat Kimia Tanah

Analisis sifat kimia tanah dilakukan untuk mengetahui status kesuburan dan ketersediaan hara pasca-inkubasi kompos. Parameter kimia sangat sensitif terhadap penambahan bahan organik, terutama dalam hal peningkatan muatan negatif koloid dan penyediaan unsur hara esensial. Parameter yang diamati mencakup pH tanah untuk menentukan tingkat kemasaman, C-organik sebagai indikator keberhasilan amandemen, Kapasitas Tukar Kation (KTK) untuk menilai daya jerap hara, serta kandungan hara makro utama (*N, P, K*) yang sangat dibutuhkan untuk metabolisme tanaman padi.

Secara sistematis, rincian parameter pengamatan, metode analisis, dan alat yang digunakan disajikan dalam Tabel 3.8 sebagai berikut:

Tabel 3. 8 Parameter Pengamatan dan
Metode Analisis Laboratorium

No	Parameter Pengamatan	Satuan	Metode Analisis	Alat Utama
A	**Sifat Fisika Tanah**			
1	Tekstur Tanah	*%*	Pipet atau Hidrometer	Hidrometer & Ayakan
2	Berat Isi (*Bulk Density*)	*g/cm^3*	*Ring Sample* (Gravimetri)	Oven & Timbangan
3	Porositas Total	*%*	Perhitungan (BD & PD)	Rumus Matematis
4	Kapasitas Menahan Air	*%*	Gravimetri	Oven & Cawan
B	**Sifat Kimia Tanah**			
1	pH Tanah (H_2O & KCl)	-	Elektrometri (1:2,5)	pH Meter Digital
2	C-Organik	*%*	*Walkley and Black*	Spektrofotometer
3	KTK (Kapasitas Tukar Kation)	*cmol(+)/ kg*	Amonium Asetat 1N pH 7,0	*Flame Photometer*
4	Nitrogen Total (N)	*%*	*Kjeldahl*	Labu Destilasi
5	Fosfor Tersedia (P)	*ppm*	*Bray I* atau *Olsen*	Spektrofotometer
6	Kalium Tersedia (K)	*cmol(+)/ kg*	Amonium Asetat 1N pH 7,0	*Flame Photometer*

3.6 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian ini dirancang untuk menguji hipotesis mengenai pengaruh aplikasi pupuk kompos terhadap sifat fisika dan kimia tanah secara objektif. Proses analisis dilakukan melalui tiga tahapan utama: pengujian signifikansi menggunakan statistik inferensial, uji pembandingan rata-rata perlakuan, dan interpretasi kualitatif berdasarkan standar kesuburan tanah. Pendekatan ini menjamin bahwa kesimpulan yang diambil didasarkan pada kekuatan statistik yang dapat dipertanggungjawabkan serta relevansi praktis bagi kondisi lahan sawah di lokasi penelitian.

3.6.1 Analisis Statistik (*Analysis of Variance* - ANOVA)

Seluruh data yang diperoleh dari hasil pengamatan laboratorium terlebih dahulu diuji prasyaratnya(homogenitas dan normalitas).Selanjutnya,data diolah menggunakan analisis sidik

ragam atau *Analysis of Variance* (ANOVA) sesuai dengan model Rancangan Acak Kelompok (RAK) pada taraf kepercayaan 95%(α = 0, 05).Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui apakah variasi dosis kompos memberikan pengaruh yang nyata atau signifikan terhadap perubahan parameter kualitas tanah.Jika hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai F hitung > F tabelpada taraf 5%,maka hipotesis nol (H0) ditolak,yang berarti pemberian pupuk kompos berpengaruh nyata terhadap parameter yang diamati. Sebaliknya, jika F hitung F tabel, maka perlakuan dianggap tidak memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik.

3.6.2 Uji Lanjut (Post-Hoc Test)

Apabila hasil analisis sidik ragam menunjukkan pengaruh yang nyata,maka dilakukan uji lanjut untuk mengetahui perbedaan antar level perlakuan.Dalam penelitian ini,uji lanjut yang digunakan adalah Uji Beda Nyata Jujur (BNJ)atau sering disebut Tukey s HSD (*Honestly Significant Difference*) pada taraf 5%. Pemilihan uji BNJ bertujuan untuk membandingkan pasangan rata-rata perlakuan secara konservatif guna menentukan dosis kompos mana yang memberikan hasil optimasi terbaik bagi kualitas tanah sawah di Desa Antutan dan Pejalin.

3.6.3 Analisis Deskriptif dan Interpretasi Data

Data hasil laboratorium tidak hanya dianalisis secara statistik,tetapi juga diinterpretasikan secara deskriptif dengan membandingkan nilai rata-rata parameter kimia tanah terhadap standar baku yang dikeluarkan oleh Pusat Penelitian Tanah(PPT).Interpretasi ini sangat penting untuk memberikan makna praktis pada angka-angka laboratorium,misalnya untuk menentukan apakah nilai KTK atau C-Organik setelah aplikasi kompos sudah masuk dalam kategori ideal untuk pertumbuhan padi.Berikut adalah kriteria penilaian sifat kimia tanah yang digunakan sebagai acuan interpretasi.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pusat Statistik Kabupaten Bulungan. (2024). *Kecamatan Tanjung Palas Dalam Angka 2024*. Bulungan: BPS Kabupaten Bulungan.

Damayanti, N. D. (2023). *Pengaruh pemberian berbagai jenis pupuk organik terhadap sifat kimia tanah dan pertumbuhan tanaman padi* [Skripsi, Universitas Lampung]. Repositori Universitas Lampung.

Hayati, I. (2021). *Sistem Pertanian Organik*. Surakarta: UTP Press.

Kurniawan, A., Syaiful, A., & Hermawan, B. (2021). Efisiensi pemupukan hara makro pada lahan sawah intensif di wilayah Kalimantan. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, *23*(1), 30–38. https://doi.org/10.29244/jitl.23.1.30-38

Lestari, W., Mutryarny, E., & Darmadi, D. (2021). *Manajemen Pertanian Berkelanjutan*. Bogor: IPB Press.

Lumbanraja, J. (2021). *Kesuburan Tanah dan Bahan Organik*. Bandar Lampung: Universitas Lampung Press.

Manfarizah, M., Syakur, S., & Muyassir, M. (2020). *Buku Pengelolaan Sumber Daya Lahan*. Padang: Faperta Unand Press.

Mirdat, M., Patadungan, Y. S., & Isrun, I. (2021). Evaluasi sifat kimia tanah sawah akibat pemberian berbagai bahan organik di Desa Sidera. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomplek*, *2*(3), 200–210.

Noviana, E., Gunawan, I., & Setiawan, B. (2023). Analisis pemanfaatan pupuk organik pada lahan pertanian sawah di pedesaan. *Jurnal Wicara Desa*, *1*(4), 560–568.

Nur, M., Syamsuddin, S., & Mas'ud, H. (2021). *Ilmu Kesuburan Tanah dan Pemupukan*. Jakarta: ResearchGate Publication.

Pratiwi, E., Santoso, E., & Turmudi, E. (2021). Karakteristik fisik tanah pada lahan sawah dengan sistem pertanian organik dan konvensional. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, *26*(2), 210–218. https://doi.org/10.18343/jipi.26.2.210

Putra, A., & Hakim, L. (2024). Peran bahan organik terhadap sifat kimia tanah sawah. *Jurnal Melayani*, *2*(1), 15–25.

Sari, N. (2022). Strategi peningkatan kualitas tanah sawah melalui bahan organik lokal. *Jurnal Bina Desa*, *4*(2), 120–130.

Sutari, N. W. S. (2023). Karakteristik fisika tanah pada berbagai dosis pupuk kompos di lahan sawah. *Enviagro: Jurnal Pertanian*, *16*(1), 45–55.

Yulnafatmawita, Y., & Adrinal, A. (2020). *Pengelolaan Sumber Daya Hara Tanah Sawah*. Padang: Andalas University Press.

Zulaikha, S., Fitriani, N., & Rahmawati, A. (2021). Pengaruh asam humat dan fulvat terhadap agregasi tanah aluvial. *Jurnal Sains Tanah*, *18*(2), 88–97.

Zulkarnain, Z., Prasetyo, T., & Kasno, A. (2024). Pengaruh pemberian pupuk kompos terhadap sifat fisika dan kimia tanah sawah. *Jurnal Pengabdian Ilmiah Mahasiswa*, *3*(1), 71–80.