

Status dan Ketersediaan Unsur Hara Mikro Seng (Zn) pada Lahan Sawah Berdasarkan Indeks Pertanaman

Status and Availability of Micronutrient Zinc (Zn) in Rice Fields based on Cropping Index

Nurul Khalishah Nahumarury*, Muh. Jayadi, Sartika Laban
Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin
*Corresponding email: nurulkhalishah17@gmail.com

ABSTRACT

Zn is one of the essential micronutrients for rice plants. Increasing the Cropping Index (CI) to enhanced rice productivity, leads to increased Zn absorption. Without proper micronutrient fertilization, the soil can potentially be deficient in Zn. This study aims to study the differences in the status and availability of Zn micronutrients in paddy fields based on the Rice Cropping Index. The research was conducted in Tanete village, Simbang sub-district, Maros. Sample points were determined using purposive sampling method. There were eight sample points, namely two points each in CI300 rice fields with 10 years of application, CI300 with more than 10 years, CI200 with less than 30 years, and CI200 with more than 30 years of application. The parameters observed were texture, pH, C-organic, Zn-total, and Zn-available. Correlation analysis was conducted to see the relationship between soil properties. Zn availability ranged from 0.05 - 2.47 ppm. The availability of Zn in CI300 and CI200 rice fields is lower in those with a longer age of use. This is related to the length and intensity of land use, where more Zn nutrients are mined, resulting in reduced Zn availability in the soil. Available Zn increases with the increase of soil C-Organic and Zn-total. Zn availability is classified as low to high. Zn availability in CI300 rice fields with <10 years of use is higher than with >10 years of use. The availability of Zn in CI200 rice fields with <30 years of use is higher than that of >30 years of use. Zn availability has a strong positive correlation with Zn-total and soil C-Organic, and a moderate correlation with soil pH.

Keywords: Cropping index; micronutrients; rice; zinc; Zn availability

ABSTRAK

Zn merupakan salah satu hara mikro esensial bagi tanaman padi. Peningkatan Indeks Pertanaman (IP) untuk meningkatkan produktivitas padi menyebabkan penyerapan Zn semakin banyak. Tanpa pemupukan hara mikro, tanah dapat berpotensi kekurangan Zn. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perbedaan status dan ketersediaan unsur hara mikro Zn pada lahan sawah berdasarkan Indeks Pertanaman Padi. Penelitian dilaksanakan di Desa Tanete, Kec. Simbang, Maros. Titik sampel ditentukan menggunakan metode purposive sampling. Terdapat 8 titik sampel yaitu masing-masing 2 titik pada sawah IP300 penerapan dibawah 10 tahun, IP300 diatas 10 tahun, IP200 dibawah 30 tahun, dan IP200 diatas 30 tahun. Parameter yang diamati yaitu tekstur, pH, C-Organik, Zn-total, dan Zn-tersedia. Analisis korelasi dilakukan untuk melihat hubungan antar sifat tanah. Ketersediaan Zn berkisar antara 0,05 – 2,47 ppm. Ketersediaan Zn pada sawah IP300 dan IP200 sama-sama memiliki nilai yang lebih rendah pada sawah dengan penerapan yang lebih lama, hal ini berkaitan dengan lama dan intensifitas penggunaan lahan tersebut, dimana penambangan hara Zn akan semakin banyak sehingga Zn di dalam tanah semakin berkurang. Zn-tersedia meningkat seiring dengan meningkatnya C-Organik dan Zn-total tanah. Ketersediaan Zn tergolong rendah sampai tinggi. Ketersediaan Zn pada sawah IP300 dan IP200 sama-sama memiliki nilai yang lebih rendah pada sawah dengan penerapan yang lebih lama, dan sebaliknya. Ketersediaan Zn memiliki korelasi positif yang kuat dengan Zn-total dan C-Organik tanah, dan korelasi yang cukup dengan pH tanah.

Keywords: Indeks pertanaman; unsur hara mikro; padi; seng; ketersediaan Zn

1. PENDAHULUAN

Unsur hara tanah merupakan elemen penting yang mendukung pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Tanaman menyerap unsur hara yang diinginkan dari tanah dalam proporsi yang berbeda sesuai dengan kebutuhannya (Shukla *et al.*, 2021). Unsur hara dibagi menjadi unsur hara makro dan mikro berdasarkan jumlah relatif unsur hara yang dibutuhkan, dimana unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah besar dikategorikan sebagai unsur hara makro (Dhanapriya & Mahehwari, 2015), sedangkan unsur hara mikro dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah yang relatif kecil untuk pertumbuhan yang optimal (Behera *et al.*, 2025). Meskipun berbeda dalam jumlah yang dibutuhkan, masing-masing kategori unsur hara memainkan peran spesifik dalam berbagai aspek siklus hidup tanaman (Sharef *et al.*, 2024).

Unsur hara mikro berperan penting dalam menjaga pertumbuhan tanaman secara keseluruhan, dengan terlibat dalam berbagai proses fisiologis dan biokimia yang masing-masing berkontribusi secara unik terhadap kesuburan dan produktivitas tanaman (Aftab & Hakeem, 2020). Unsur hara mikro jika tersedia pada tingkat yang memadai, akan meningkatkan pertumbuhan dalam karakteristik fisiologis, biokimia dan metabolisme tanaman. Namun, jika kandungan unsur hara mikro pada tanah mengalami defisiensi hara mikro, maka hal tersebut dapat mendorong pertumbuhan yang abnormal pada tanaman (Dubey *et al.*, 2015).

Salah satu unsur hara mikro esensial yang dibutuhkan oleh tanaman adalah Seng (Zn). Zn berperan penting dalam pertumbuhan tanaman, ekspresi gen, struktur enzim, fotosintesis, pengembangan serbuk sari, transformasi gula, sintesis protein, permeabilitas membran, transduksi sinyal, dan metabolisme auksin pada tanaman (Hacisalihoglu, 2020). Selain pada proses pertumbuhan tanaman, Zn juga dapat berperan dalam pertahanan tanaman melawan patogen dan herbivora (Cabot *et al.*, 2019). Tanaman mengambil Zn dari tanah, namun jika terjadi defisiensi Zn, hal tersebut akan mengganggu fungsi dasar metabolisme tanaman, yang menyebabkan hambatan pertumbuhan dan klorosis pada daun (Saleem *et al.* 2022).

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan pangan, hasil panen dalam segi kualitas dan kuantitas harus ditingkatkan. Peningkatan produktivitas tanaman pangan, terkhususnya komoditas padi sebagai sumber makanan pokok di Indonesia, dijalankan dengan melakukan peningkatan Indeks Pertanaman (IP) padi dari kegiatan menanam sekali dalam satu tahun menjadi dua, tiga atau empat kali dalam satu tahun. Mira dan Fahrizal (2019), menyatakan bahwa sistem penanaman intensif akan melibatkan penambahan unsur hara tanaman secara

terus-menerus, dan menyebabkan terkurasnya unsur hara dan turunnya kualitas tanah serta menurunkan produktivitas.

Pada umumnya, praktik pemberian unsur hara tanah hanya berfokus pada unsur hara makro melalui pemberian pupuk sintetis tanpa mempertimbangkan pemberian pupuk hara mikro (Baldantoni *et al.*, 2019). Unsur hara mikro pada tanah sebagian besar berasal dari bahan induk. Namun, sifat tanah dan praktik pengelolaan pertanian konvensional yang intensif dengan penggunaan varietas produktifitas tinggi maupun penggunaan pupuk NPK anorganik, dapat menyebabkan pasokan unsur hara mikro tidak mencukupi bagi tanaman (Denton-Thompson & Sayer, 2022).

Defisiensi unsur hara mikro, tak terkecuali Zn, saat ini telah banyak dilaporkan dari berbagai wilayah. Demo (2017) menyatakan bahwa kadar unsur hara mikro Fe, Zn, dan B pada lahan pertanian di Kecamatan Kabile, Gorontalo, tergolong dalam kriteria rendah karena tidak pernah dilakukan pemupukan hara mikro, sehingga mempercepat menurunnya kandungan unsur hara mikro dalam tanah. Selain itu, Arsita (2024), pada penelitiannya juga menemukan bahwa Kandungan Zn tersedia pada tanah sawah di Lampung berkisar 1,70-13,99 mg kg⁻¹ dengan terdapat 2 lokasi berstatus defisiensi dan 8 lokasi berstatus cukup.

Menurut BPS (2024), Kabupaten Maros saat ini menjadi salah satu wilayah penghasil beras di Sulawesi Selatan dengan luas panen tanaman padi sebesar 40.354,73 hektar. Lahan sawah di daerah ini didominasi dengan praktik dua kali tanam dalam setahun (IP 200) dan praktik tiga kali tanam dalam setahun (IP 300). Pertanian intensif menghilangkan sejumlah besar nutrisi dari tanah, termasuk unsur hara mikro, serta rendahnya penggunaan pupuk hara mikro dapat meningkatkan prevalensi kekurangan Zn-tersedia (Praharaj *et al.* 2021). Status ketersediaan unsur hara Zn di Kabupaten Maros secara keseluruhan masih terbatas. Fatahillah (2023) menemukan bahwa kandungan hara mikro Zn di Kelurahan Kallabirang, Kecamatan Bantimurung tergolong dalam kriteria tinggi dengan nilai antara 1 – 200 ppm.

Desa Tanete berada di Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros dengan luas area sebesar 12,2 km². Pertanian menjadi salah satu sektor mata pencaharian di desa ini, dengan luas area pertanian sebesar ± 500 hektar. Desa ini telah menerapkan praktik IP 200 dan IP 300 sehingga berpotensi mengalami penurunan unsur hara mikro Zn akibat intensnya frekuensi tanam. Namun, saat ini belum ada penelitian yang mengkaji status ketersediaan unsur hara Zn di wilayah tersebut. Berdasarkan uraian diatas, maka dipandang perlu untuk dilakukan penelitian ini untuk mempelajari perbedaan status dan ketersediaan unsur hara mikro Zn serta hubungan

antara sifat kimia tanah dengan unsur hara Zn pada lahan sawah berdasarkan Indeks Pertanaman Padi di desa Tanete, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros. Data yang diperoleh dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam pengolahan kesuburan tanah pada wilayah pertanian di daerah terkait.

2. METODOLOGI

2.1. Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilakukan di desa Tanete, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros. Secara geografis, $5^{\circ}1'0'' - 5^{\circ}3'0''$ LS dan $119^{\circ}36'0'' - 119^{\circ}38'0''$ BT. Analisis sampel tanah dilakukan di Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah, Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin, Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar, dan Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah, Departemen Tanah, Universitas Gajah Mada.

2.2. Alat dan Bahan

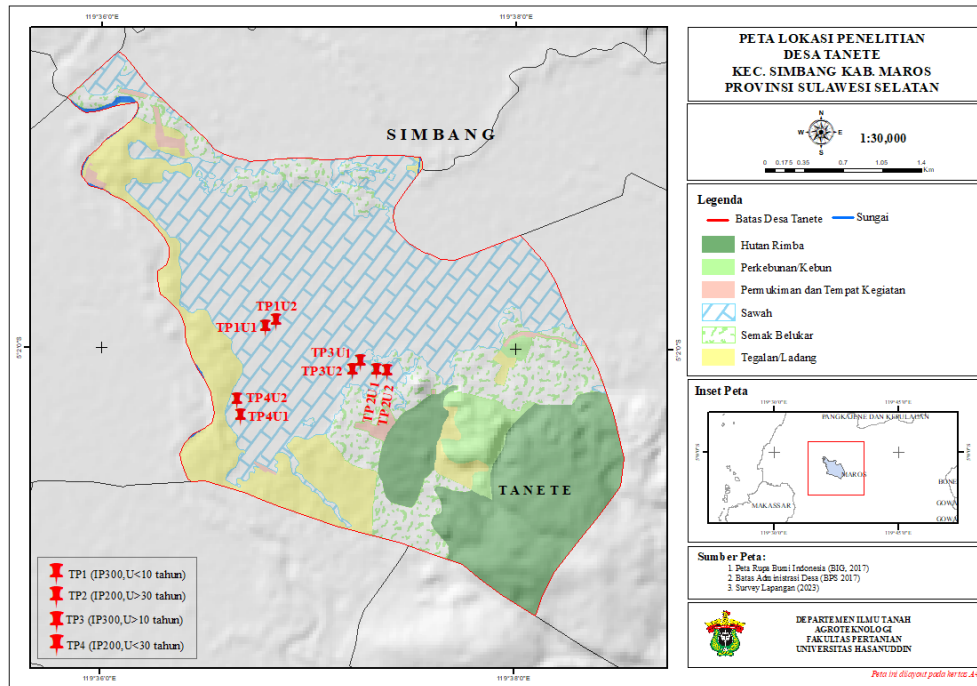
Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas peralatan survei tanah seperti cangkul, linggis, pisau lapangan, meteran bar, plastik sampel, kamera, GPS (*Global Positioning System*), dan alat tulis dan alat laboratorium. Bahan yang digunakan yaitu sampel tanah terganggu pada setiap titik pengambilan sampel dan bahan kimia untuk analisis laboratorium sesuai petunjuk teknis analisis fisik dan kimia tanah.

2.3. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini berupa tahap persiapan, studi pustaka, penentuan lokasi pengambilan sampel, pembuatan peta kerja, perizinan lokasi, pengambilan sampel tanah dan wawancara, analisis laboratorium dan analisis data.

2.3.1. Tahap Persiapan, Studi Pustaka dan Pembuatan Peta Lokasi

Tahap persiapan dilakukan dengan melakukan penyusunan rencana penelitian, melakukan survei pendahuluan seperti pencarian lokasi sesuai dengan parameter penelitian dan pengambilan titik koordinat, pengumpulan data peta yang dibutuhkan, dan pembuatan kuisisioner. Tahapan studi pustaka berfungsi untuk mengumpulkan informasi dan data sekunder yang dibutuhkan sebagai referensi. Peta kerja (Gambar 1) dibuat dengan menggunakan data peta administrasi Desa Tanete dan peta penggunaan lahan di Kabupaten Maros.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian di Desa Tanete

2.3.2. Penentuan Titik Lokasi Pengambilan Sampel

Penentuan titik lokasi pengambilan sampel dilakukan dengan metode *pusposive sampling*. Titik pengambilan sampel ditentukan secara sengaja berdasarkan batas-batas yang telah ditentukan. Lokasi pengambilan sampel berada pada wilayah desa Tanete, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros. Titik lokasi pengambilan sampel terdiri atas 4 kategori berdasarkan Indeks Pertanian (IP) dengan umur penerapan IP yang berbeda, dimana umur penerapan terhitung sejak IP 200 atau IP 300 pertama kali diterapkan pada lahan sawah. Kategori tersebut terdiri dari IP 300 yang telah diterapkan dibawah 10 tahun, IP 300 diatas 10 tahun, IP 200 dibawah 30 tahun, dan IP 200 diatas 30 tahun. Sampel diambil pada 4 Titik Pengamatan (TP) dengan Ulangan (U) masing-masing sebanyak dua kali. Sehingga jumlah total titik pengambilan sampel adalah 8 titik (Gambar 1).

2.3.3. Pengambilan Sampel Tanah dan Wawancara

Tahapan ini dilakukan dengan mengambil sampel tanah terganggu pada 8 titik lokasi yang telah ditentukan sebelumnya. Pada setiap titik pengambilan sampel tanah dibuat minipit sampai pada lapisan tapak bajak dengan ukuran panjang x lebar x kedalaman yaitu 50 x 50 x 30 cm. Kemudian profil tanah dibagi menjadi 4 lapisan dan diambil sampel tanah terganggu dari setiap lapisan. Sehingga dari 8 titik lokasi pengambilan sampel tanah, diperoleh total 32 sampel tanah.

Tahapan pelaksanaan selanjutnya yaitu melakukan wawancara dengan petani setempat untuk mendapatkan informasi pendukung dalam analisis data penelitian. Wawancara ini dilakukan dengan menggunakan daftar pertanyaan (*questionnaire*). Variabel yang akan ditanyakan meliputi luas lahan sawah petani, penggunaan lahan dan aktivitas sawah petani, hasil produksi tanaman padi petani, pupuk yang digunakan. Berdasarkan hasil wawancara, ditemukan bahwa rata-rata luas sawah petani adalah 1700-2000 m²/petak, sawah digarap sebanyak 2 dan 3 kali dalam setahun, pengolahan jerami padi pada lahan sawah di lokasi rata-rata dibakar, produksi padi pada sawah 3 kali tanam berkisar antara 1-1,2 ton/petak sawah dalam satu musim dan produksi sawah 2 kali tanam berkisar antara 600-800 kg/petak sawah dalam satu musim, pupuk yang digunakan adalah Urea + NPK Phonska dan petani tidak menggunakan pupuk organik maupun pupuk hara mikro.

2.3.4. Analisis Laboratorium

Analisis sifat fisik dan kimia tanah dilakukan dengan menggunakan sampel tanah terganggu yang telah diambil dari masing-masing titik lokasi penelitian. Metode yang digunakan untuk analisis sifat tanah dapat dilihat pada Tabel 1. Pengkelasan C-Organik (Tabel 3) dan pH tanah (Tabel 4) dilakukan berdasarkan kriteria oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian (2012). Sedangkan kategori pengkelasan untuk ketersediaan Zn (Tabel 2) dilakukan sesuai klasifikasi dari Soniya *et al.* (2021).

Tabel 1. Metode Analisis Sifat Fisik dan Kimia Tanah

Parameter	Metode analisis
Tekstur tanah	<i>Hydrometer</i>
pH tanah	pH Meter
C-Organik	Walkey and Black
Zn-total	Pengabuan basah
Zn-tersedia	Ekstraksi DTPA

Tabel 2. Kategori Ketersediaan Zn (Soniya *et al.*, 2021).

Zn-tersedia (mg kg⁻¹)	Kategori
≤ 1,2	Rendah
1,2 – 1,8	Sedang
> 1,8	Tinggi

Tabel 3. Kriteria Penilaian C-Organik (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian, 2012).

C-Organik (%)	Kategori
<1	Sangat rendah
1 - 2	Rendah
2 - 3	Sedang
3 - 5	Tinggi
>5	Sangat tinggi

Tabel 4. Kriteria Penilaian pH (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian, 2012).

pH	Kategori
<4,5	Sangat masam
4,5 – 5,5	Masam
5,6 – 6,5	Agak masam
6,6 – 7,5	Netral
7,6 – 8,5	Agak alkalis
>8,5	Alkalis

2.3.5. Analisis Data

Tahapan ini dilakukan dengan mengolah data hasil laboratorium yang telah diperoleh. Data hasil penelitian dilakukan analisis korelasi untuk melihat hubungan antar sifat kimia tanah dengan Zn-tersedia dan hubungan antara indeks pertanaman dengan sifat kimia tanah. Selanjutnya, untuk menguji signifikansi statistik dari korelasi, dilakukan analisis regresi linear sederhana untuk memperoleh nilai p-value. Nilai koefisien korelasi dihitung menggunakan teknik analisis Korelasi Pearson dengan persamaan :

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (1)$$

r = Koefisien korelasi

n = Banyaknya pasangan data X dan Y

$\sum x$ = Total jumlah data dari variabel X

$\sum y$ = Total jumlah data dari variabel Y

$\sum x^2$ = Total dari variabel X yang dikuadratkan

$\sum y^2$ = Total dari variabel Y yang dikuadratkan

$\sum xy$ = total dari hasil perkalian variabel X dan Y

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

3.1.1 Analisis Sifat Fisik dan Kimia Tanah

Hasil analisis sifat fisik dan kimia sampel tanah berdasarkan Indeks pertanian dari lahan sawah di Desa Tanete, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros, dapat dilihat pada Tabel 5. Analisis kandungan C-Organik pada sawah IP 300 dengan umur penerapan kurang dari 10 tahun bernilai antara 1,82 – 2,07 %, sedangkan IP 300 dengan penerapan lebih dari 10 tahun memiliki nilai C-Organik dengan kisaran antara 1,29 – 1,70 %. Kemudian, kandungan C-Organik pada sawah IP 200 dengan umur penerapan kurang dari 30 tahun bernilai antara 1,70 – 1,82 %, sedangkan pada sawah IP 200 dengan umur penerapan lebih dari 30 tahun berkisar antara 1,25 – 1,48 %. Nilai kandungan C-organik pada semua lahan sawah tergolong dalam kategori Rendah.

Tabel 5. Hasil Analisis Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Sawah berdasarkan Indeks Pertanian di Desa Tanete

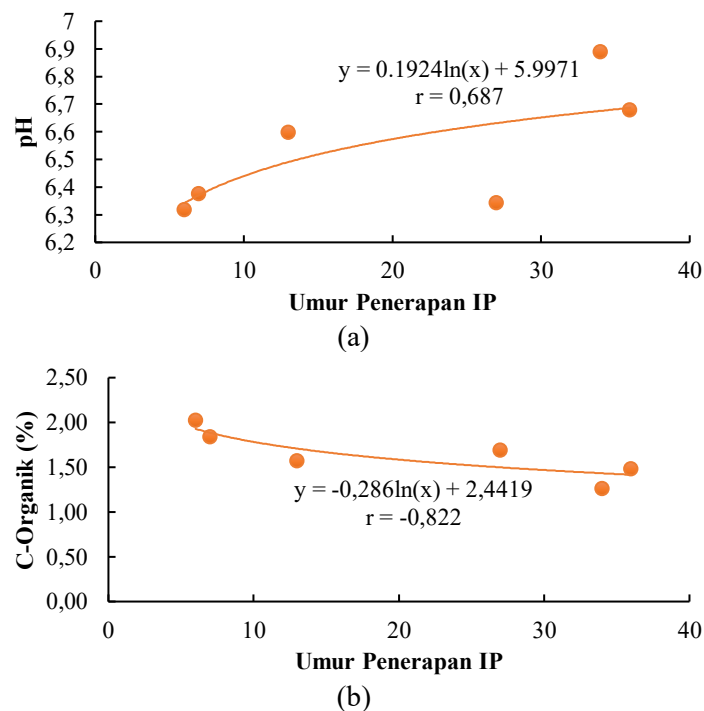
IP dan Umur Penerapan	Kedalaman (cm)	Tekstur			Kelas	pH	C-Organik (%)	Zn-tersedia (ppm)	Zn-total (ppm)	Zn-total yang tersedia (%)
		%Pasir	%Debu	%Liat						
IP300 <10tahun	0-7	2,77	56,43	40,80	Liat Berdebu	6,96 (N)	2,07 (S)	2,38 (T)	86,43	2,75
	8-15	2,98	57,18	39,84	Lempung Liat Berdebu	6,60 (N)	1,92 (R)	2,47 (T)	83,15	2,97
	16-23	1,51	55,00	43,49	Liat Berdebu	6,09 (AM)	1,91 (R)	1,37 (S)	84,65	1,62
	24-30	2,81	50,00	47,19	Liat Berdebu	5,74 (AM)	1,82 (R)	0,94 (R)	84,25	1,22
Rata-rata		2,52	54,65	42,83	Liat Berdebu	6,35 (AM)	1,93 (R)	1,79 (S)	84,62	2,11
IP300 >10tahun	0-7	5,39	39,94	54,66	Liat	7,09 (N)	1,70 (R)	1,42 (S)	63,15	2,25
	8-15	8,03	37,17	54,80	Liat	6,83 (N)	1,52 (R)	1,33 (S)	69,29	1,92
	16-23	4,71	34,81	60,49	Liat	6,45 (AM)	1,44 (R)	0,70 (R)	61,23	1,14
	24-30	4,98	28,23	66,78	Liat	6,34 (AM)	1,29 (R)	0,28 (R)	42,17	0,65
Rata-rata		5,78	35,04	59,18	Liat	6,68 (N)	1,49 (R)	0,93 (R)	58,96	1,49
IP200 <30tahun	0-7	8,47	53,16	38,37	Lempung Liat Berdebu	6,97 (N)	1,70 (R)	1,72 (S)	80,47	2,14
	8-15	10,49	40,62	48,89	Liat Berdebu	6,32 (AM)	1,82 (R)	1,61 (S)	81,92	1,96
	16-23	8,57	43,57	47,86	Liat Berdebu	5,69 (AM)	1,78 (R)	0,98 (R)	82,55	1,18
	24-30	8,16	35,71	56,14	Liat	5,52 (M)	1,79 (R)	0,63 (R)	77,06	0,84
Rata-rata		8,92	43,26	47,82	Liat Berdebu	6,12 (AM)	1,77 (R)	1,23 (S)	80,50	1,52
IP200 >30tahun	0-6	9,01	42,33	48,66	Liat Berdebu	7,01 (N)	1,48 (R)	1,68 (S)	60,27	2,78
	7-13	7,61	42,05	50,34	Liat Berdebu	6,77 (N)	1,44 (R)	1,38 (S)	60,14	2,29
	14-20	7,54	40,60	51,86	Liat Berdebu	6,72 (N)	1,32 (R)	1,04 (R)	63,63	1,63
	21-27	2,36	24,02	73,62	Liat	6,64 (N)	1,25 (R)	0,05 (R)	44,47	0,11
Rata-rata		6,63	37,25	56,12	Lempung Liat Berdebu	6,78 (N)	1,37 (R)	1,04 (R)	57,12	1,70

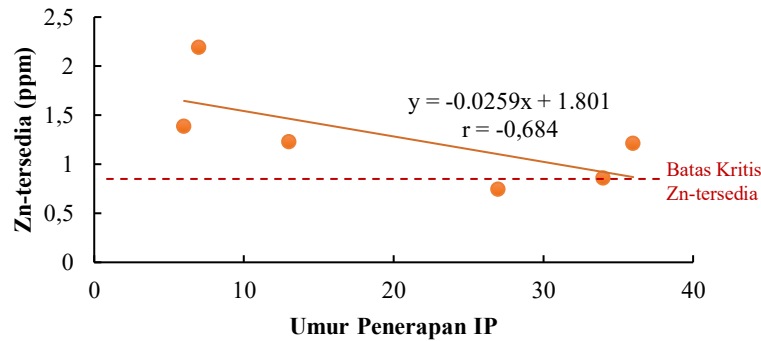
Keterangan : T = Tinggi, S = Sedang, R = Rendah, SR = Sangat Rendah, R = Rendah, S = Sedang, T = Tinggi, ST = Sangat Tinggi. SM = Sangat Masam, M = Masam, AM = Agak Masam, N = Netral, AI = Agak Ikalis, A = Alkalis

Hasil analisis pH tanah sawah pada lokasi penelitian, menunjukkan bahwa pH tanah pada sawah IP 300 dengan umur penerapan kurang dari 10 tahun berkisar antara 5,74 – 6,69, sedangkan IP 300 dengan penerapan lebih dari 10 tahun berkisar antara 6,36 – 7,09. Nilai pH pada sawah IP 200 dengan penerapan kurang dari 30 tahun berkisar antara 5,52 – 6,97, dan sawah IP 200 dengan penerapan lebih dari 30 tahun memiliki nilai berkisar antara 6,64 – 7,01. Hasil analisis tekstur tanah pada lokasi penelitian menunjukkan bahwa secara keseluruhan, tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh fraksi liat. Kelas tekstur yang diperoleh dari lokasi penelitian tergolong pada kelas tekstur Liat, Liat berdebu, dan Lempung liat berdebu.

3.1.2 Hubungan Umur Penerapan IP dengan Sifat Tanah

Analisis korelasi dilakukan antara pH tanah, C-Organik, dan Zn-tersedia dengan umur penerapan indeks pertanaman pada sawah di lokasi penelitian (Gambar 2). Hasil uji korelasi antara umur penerapan IP dan pH tanah menunjukkan nilai $r = 0,687$ dengan $p\text{-hitung } 0,1313 > 0,05$. Sedangkan hasil uji korelasi antara umur penerapan IP dengan C-Organik memperoleh nilai $r = -0,822$ dengan $p\text{-hitung } 0,0443 < 0,05$. Uji korelasi antara umur penerapan IP dengan Zn-tersedia menunjukkan nilai $r = -0,684$ dengan $p\text{-hitung } 0,1339 > 0,05$. Hal ini menunjukkan korelasi yang tidak signifikan antara umur penerapan IP dengan pH dan Zn-tersedia, tetapi menunjukkan korelasi signifikan dengan C-organik tanah.



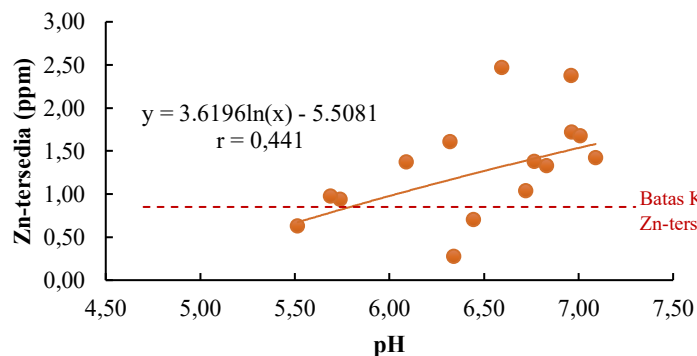


(c)

Gambar 2. Korelasi antara Umur Penerapan IP dengan pH tanah ($p > 0,05$) (a), C-Organik ($p < 0,05$) (b), dan Zn-tersedia ($p > 0,05$) (c) pada lahan sawah di Desa Tanete (Batas kritis 0,85 ppm berdasarkan Rahman *et al*, 2021)

3.1.3 Hubungan pH Tanah dengan Zn-tersedia

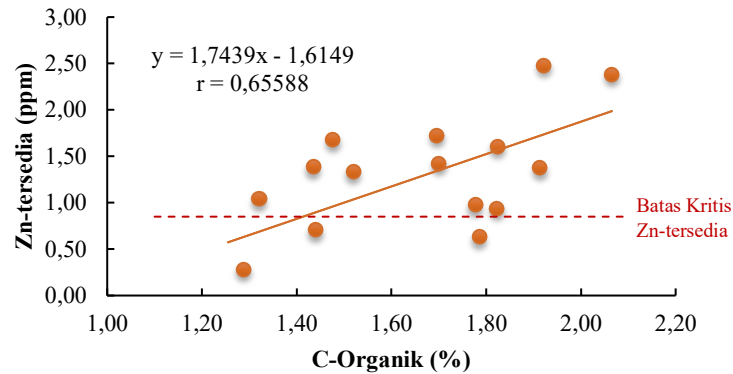
Hasil analisis korelasi yang dilakukan antara pH dan Zn-tersedia dapat dilihat pada grafik berikut (Gambar 3). Berdasarkan hasil analisis korelasi antara pH dengan Zn-tersedia, diperoleh nilai r sebesar 0,441 dengan nilai p -hitung $0,0917 > 0,05$. Hal ini menunjukkan hubungan korelasi yang tidak signifikan antara pH dengan Zn-tersedia.



Gambar 3. Korelasi pH dengan Zn-tersedia pada lahan sawah di Desa Tanete ($p > 0,05$) (Batas kritis 0,85 ppm berdasarkan Rahman *et al*, 2021)

3.1.4 Hubungan C-Organik dan Zn-tersedia

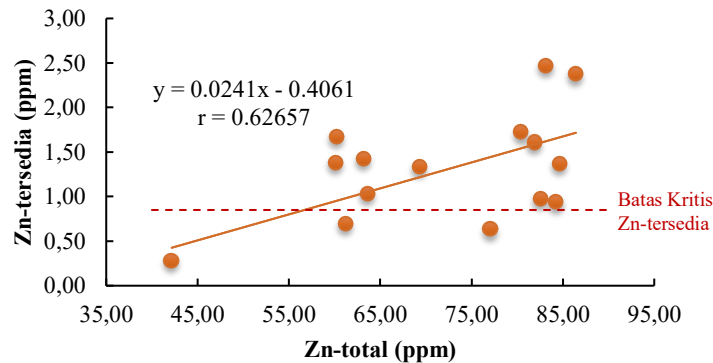
Hasil analisis korelasi yang dilakukan antara C-Organik dan Zn-tersedia dapat dilihat pada grafik dibawah (Gambar 4). Berdasarkan grafik analisis korelasi yang dilakukan, diperoleh nilai r sebesar 0,656 dengan nilai p -hitung $0,0056 < 0,05$. Hal ini menandakan bahwa terdapat korelasi positif yang signifikan antara C-Organik dengan Zn-tersedia.



Gambar 4. Korelasi C-Organik dengan Zn-tersedia pada lahan sawah di Desa Tanete ($p < 0,05$) (Batas kritis 0,85 ppm berdasarkan Rahman *et al*, 2021)

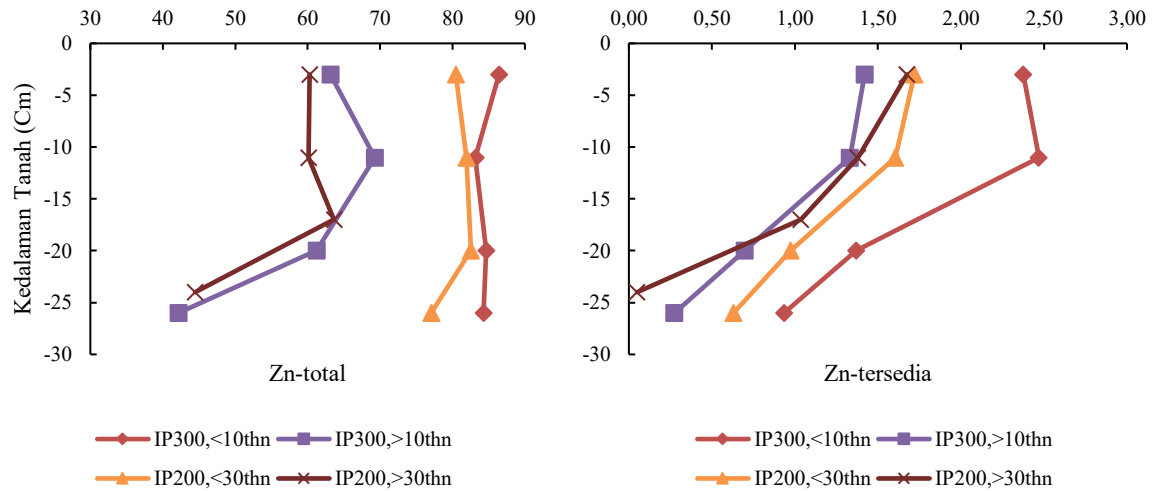
3.1.5 Total Zn dan Ketersediaan Zn

Berdasarkan analisis korelasi yang dilakukan antara Zn-total dan Zn-tersedia (Gambar 5), diperoleh nilai r sebesar 0,627 dengan nilai p -hitung $0,0089 < 0,05$. Hal ini menandakan bahwa terdapat korelasi positif yang signifikan antara Zn total dengan Zn-tersedia. Hasil analisis total dan ketersediaan Zn dalam tanah pada lokasi penelitian dapat dilihat pada grafik berikut (Gambar 5).



Gambar 5. Korelasi Total dan Ketersediaan Zn Tanah pada lahan sawah di Desa Tanete ($p > 0,05$) (Batas kritis 0,85 ppm berdasarkan Rahman *et al*, 2021)

Berdasarkan hasil analisis Zn-total pada sampel tanah, nilai total Zn yang berada pada lahan sawah di Desa Tanete berkisar antara 42,17 – 86,43 ppm (Gambar 6). Hasil analisis Zn-tersedia pada sampel tanah menunjukkan bahwa ketersediaan Zn lahan sawah pada lokasi penelitian memiliki kisaran nilai sebesar 0,05 – 2,47 ppm dengan kriteria ketersediaan yang tergolong dari rendah, sedang, dan tinggi.



Gambar 6. Total dan Ketersediaan Zn berdasarkan Kedalaman Tanah pada lahan sawah di Desa Tanete

3.2. Pembahasan

Tekstur tanah sawah di Desa Tanete menunjukkan tanah tersebut tergolong bertekstur halus sampai agak halus yang terdiri dari kelas tekstur liat, liat berdebu, dan lempung liat berdebu (Lopulisa, 2014). Hal tersebut menandakan bahwa rata-rata tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh fraksi liat. Selain itu, Distribusi partikel pada semua lahan sawah menunjukkan dominasi liat seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah menuju pada lapisan bajak. Hal ini dapat disebabkan oleh aktivitas pengolahan tanah dangkal yang dilakukan serta terjadinya proses illuviasi, dimana partikel tanah halus berpindah ke bawah bersama air hujan atau air irigasi dan perlahan-lahan mengisi celah-celah tanah dibagian bawah (Tran Ba *et al.*, 2016). Seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah, fraksi liat tanah cenderung bertambah dan nilai Zn-tersedia semakin berkurang. Hal yang serupa juga ditemukan oleh Amsili *et al.* (2021) bahwa rata-rata Zn yang dapat diekstraksi dari tanah dengan tekstur yang lebih kasar 2,5 kali lebih tinggi dibandingkan tanah bertekstur halus. Ini dapat terjadi karena tekstur tanah dapat mempengaruhi ketersediaan Zn dengan mempengaruhi kapasitas menahan air dan aerasi tanah, serta penyerapan dan desorpsi Zn (Zhao *et al.* 2025). Selain itu, Parveen *et al.* (2024) dan Singh *et al.* (2019) juga menyatakan bahwa kandungan Zn yang dapat diekstraksi umumnya lebih banyak ditemukan pada lapisan atas tanah, dan menurun pada lapisan bawah tanah.

Analisis hubungan antara umur penerapan dengan pH, C-organik, dan Zn-tersedia menunjukkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara umur penerapan IP dengan pH dan Zn-tersedia, tetapi menunjukkan korelasi yang signifikan dengan C-organik tanah. Meskipun korelasi dengan pH tidak signifikan, nilai pH tanah menunjukkan tren peningkatan nilai seiring

dengan semakin lama umur penerapan IP. Peningkatan pH tanah ke arah netral ini dapat disebabkan oleh penggenangan. Salah satunya sering terjadi reduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} saat penggenangan yang menghasilkan ion OH^- sehingga pH cenderung naik mendekati netral (Abduh & Annisa, 2016). Oleh karena itu, sawah yang diolah secara terus-menerus akan mengalami waktu penggenangan yang lama sehingga dapat meningkatkan pH tanah. Minasny *et al.* (2016), dalam penelitian yang dilakukannya juga mengidentifikasi adanya peningkatan nilai pH sawah sebesar 0.3 unit dalam satu dekade yang dapat disebabkan oleh seringnya penggenangan sawah maupun input unsur hara pada tanah. Sebaliknya, peningkatan umur penerapan IP memiliki hubungan signifikan dengan C-organik tanah, yang menunjukkan penurunan nilai C-organik seiring waktu dengan penggunaan lahan sawah secara intensif sehingga mengakibatkan hilangnya bahan organik dari tanah. Penurunan C-organik pada sawah ini dapat terjadi karena tidak adanya pemupukan organik dan pengolahan jerami yang dikumpul dan dibakar oleh petani menyebabkan pengembalian bahan organik ke tanah menjadi berkurang. Pinatih (2015), mengindikasikan bahwa C-Organik yang rendah disebabkan oleh tanah yang terlalu sering diolah sehingga menyebabkan kehilangan bahan organik melalui panen yang semakin tinggi.

Ketersediaan Zn pada tanah sawah di lokasi penelitian menunjukkan nilai yang berbeda-beda. Sawah IP 300 dengan lama penerapan kurang dari 10 tahun memiliki ketersediaan Zn yang lebih banyak dibandingkan sawah dengan penerapan lebih dari 10 tahun. Selain itu, sawah IP 200 dengan lama penerapan kurang dari 30 tahun juga memiliki ketersediaan Zn yang lebih banyak dibandingkan penerapan lebih dari 30 tahun. Ketersediaan Zn yang rendah pada sawah di lokasi penelitian berkaitan dengan lamanya penggunaan lahan tersebut. Semakin lama dan intensif penanaman padi, maka penambahan unsur hara mikro Zn akan semakin banyak sehingga Zn di dalam tanah semakin berkurang. Bersamaan dengan hal tersebut, petani pada lokasi penelitian juga mengungkapkan tidak adanya pemupukan unsur hara mikro Zn pada tanah, sehingga tidak ada pengembalian unsur hara Zn pada tanah. Rendahnya unsur hara Zn juga dilaporkan oleh Sukla *et al.* (2016), yang menemukan bahwa sekitar 15% dari 5000 sampel lahan pertanian intensif terindikasi memiliki ketersediaan Zn yang rendah.

Ketersediaan unsur hara Zn secara keseluruhan pada lokasi penelitian tergolong kelas Rendah – Sedang. Berdasarkan Pemetaan jenis tanah oleh FAO, karakteristik tanah di lokasi penelitian adalah Eutrik Fluvisol. Menurut Lameck *et al.* (2025), fluvisol merupakan tanah yang terbentuk dari proses pengendapan aktif sedimen aluvial yang dibawa oleh aliran sungai dan

umumnya dijumpai pada lembah sungai maupun dataran banjir. Tanah ini umumnya memiliki pH netral hingga basa. Kondisi pH yang cenderung lebih tinggi dapat menurunkan ketersediaan Zn karena kelarutan Zn berkurang pada pH basa (Saleem *et al.* 2022). Dengan demikian, pH yang relatif tinggi pada Lokasi penelitian kemungkinan besar menjadi faktor yang menyebabkan nilai Zn di lokasi penelitian berkisar pada kategori rendah hingga sedang.

Nilai Zn-total yang diperoleh dari lokasi penelitian berkisar antara 42,17 – 86,43 ppm yang menunjukkan total Zn yang diperoleh tergolong dalam kelas sedang. Wisawapipat *et al.* (2017) menggolongkan nilai Zn-total yang berkisar antara 40 – 100 mg.kg⁻¹ sebagai medium. Sedangkan nilai Zn-tersedia di lokasi penelitian memiliki kisaran sebesar 0,05 – 2,47 ppm dengan kriteria ketersediaan yang tergolong dari rendah, medium, sampai tinggi (Soniya *et al.*, 2021). Namun, secara keseluruhan rata-rata Zn-tersedia pada sawah di Desa Tanete masih berada diatas batas kritis ketersediaan Zn untuk tanaman padi. Menurut Rahman *et al.* (2021), batas kritis ketersediaan Zn pada tanah untuk pertumbuhan tanaman padi adalah 0.85 mg.kg⁻¹. Beberapa tanah pada lapisan bawah (16-23 dan 24-30 cm) memiliki nilai Zn-tersedia dibawah batas kritis, namun Zn-tersedia pada sawah di lokasi penelitian masih mampu menyuplai Zn karena pada umumnya zona perakaran padi berada di lapisan atas tanah (Nurrahma *et al.*, 2017).

Ketersediaan Zn pada tanah dapat dipengaruhi oleh sifat-sifat tanah (Moreno-Lora, 2020). Analisis korelasi antara Zn-tersedia dengan C-Organik (Gambar 4) menunjukkan adanya hubungan positif yang mengindikasikan bahwa ketersediaan Zn akan meningkat seiring dengan meningkatnya bahan organik di dalam tanah. Bahan organik dapat membantu perbaikan struktur dan aerasi sehingga mencegah pengendapan Zn menjadi bentuk Zn tidak tersedia. Oleh karena itu, ketersediaan Zn dapat meningkat seiring dengan peningkatan bahan organik (Padhan *et al.*, 2016). Selain itu, analisis korelasi menunjukkan ketersediaan Zn pada lokasi penelitian tidak memiliki hubungan yang signifikan dengan pH tanah (Gambar 3). Namun, nilai Zn-tersedia di lokasi penelitian tetap tinggi pada pH tanah yang meningkat. Hasil ini tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya (Thingujam *et al.*, 2019) yang menemukan korelasi negatif antara pH dan Zn-tersedia, dimana Zn-tersedia akan menurun seiring dengan meningkatnya pH tanah. Ketersediaan Zn yang tetap tinggi dengan meningkatnya pH tiap lapisan tanah di lokasi penelitian diduga dapat terjadi karena adanya Zn yang terikat dengan bahan organik tanah dalam bentuk khelat oleh gugus fungsi organik yang memiliki afinitas tinggi terhadap ion Zn²⁺ sehingga dapat meningkatkan kelarutan dan mobilitas Zn dalam tanah (Chen *et al.*, 2017). Selain itu, menurut Ganeshamurthy *et al.* (2019), Zn tersedia yang maksimum berada di kisaran

pH 5 – 7 pada tanah mineral. Hal ini juga sesuai dengan kisaran pH tanah pada lokasi penelitian (Tabel 5).

Ketersediaan Zn pada tanah juga dipengaruhi oleh jumlah total Zn yang terkandung dalam tanah. Analisis korelasi yang dilakukan menunjukkan adanya korelasi positif antara Zn-total dan Zn-tersedia (Gambar 5). Hal tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi Zn-total yang terkandung di dalam tanah, maka nilai Zn-tersedia juga akan semakin tinggi. Hubungan nilai total Zn terhadap ketersediaan Zn juga diteliti sebelumnya oleh Shen *et al.* (2022), bahwa ketersediaan Zn dalam tanah akan tergolong rendah jika total Zn < 25–50 mg.kg⁻¹. Jumlah Zn-total yang diperoleh memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan nilai Zn-tersedia. Hal ini mengindikasikan bahwa dari keseluruhan jumlah Zn yang berada dalam tanah, hanya beberapa persen yang tersedia bagi tanaman. Ketersediaan Zn biasanya hanya berkisar antara 1 – 2 % dari total Zn yang terkandung dalam tanah sawah (Wisawapipat *et al.*, 2017).

Berdasarkan data Zn-total dan Zn-tersedia pada Gambar 6, terlihat bahwa nilai Zn-total dan Zn-tersedia secara bersama mengalami penurunan nilai dengan semakin bertambahnya kedalaman tanah. Hal tersebut menunjukkan konsentrasi tertinggi Zn-total dan Zn-tersedia berada pada lapisan tanah atas. Hasil serupa juga dilaporkan oleh beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Kicinska, 2020., Dhaliwal, 2021). Jumlah Zn yang lebih banyak pada lapisan permukaan tanah dibandingkan lapisan dibawahnya dapat berkaitan dengan dekomposisi bahan organik yang terjadi di permukaan tanah. Opfergelt *et al.* (2017), menyatakan bahwa bahan organik dapat mempengaruhi Zn tanah dikarenakan Zn yang dilepaskan selama proses dekomposisi serasah dapat menjadi larut dalam tanah.

Ketersediaan Zn akan dipengaruhi oleh sifat-sifat tanah seperti hubungan yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada grafik total dan ketersediaan Zn berdasarkan kedalaman tanah (Gambar 6), dapat dilihat bahwa nilai Zn-total tanah sawah IP 300 dengan umur penerapan dibawah 10 tahun dan IP 200 dibawah 30 tahun memiliki jumlah yang tidak berbeda jauh, namun Zn-tersedia pada kedua lahan sawah tersebut menunjukkan nilai yang jauh berbeda. Hal ini diduga akibat pengaruh hubungan yang kuat dengan C-Organik tanah, dimana C-Organik pada sawah IP 300 dengan umur penerapan dibawah 10 tahun (1,93%) lebih banyak dibandingkan IP 200 dibawah 30 tahun (1,77%). Ketersediaan Zn secara signifikan berhubungan dengan C-Organik karena Zn membentuk kompleks larut dengan komponen organik tanah dan menjadi tersedia bagi tanaman (Thingujan *et al.*, 2019).

4. KESIMPULAN

Ketersediaan Zn pada tanah sawah di Desa Tanete, Kecamatan Simbang, Kabupaten Maros, tergolong rendah sampai tinggi. Ketersediaan Zn yang memadai untuk padi berada pada keladalam 0-20 cm. Ketersediaan Zn pada sawah IP 300 dengan lama penggunaan < 10 tahun lebih tinggi dibandingkan dengan lama penggunaan > 10 tahun. Ketersediaan Zn pada sawah IP 200 dengan lama penggunaan <30 tahun lebih tinggi dibandingkan dengan lama penggunaan > 30 tahun. Ketersediaan Zn memiliki korelasi positif yang signifikan dengan Zn-total dan C-Organik tanah, dan tidak ada korelasi yang signifikan dengan pH tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abduh, A.M., dan W. Annisa. (2016). Interaction of Paddy Varieties and Compost with Flux of Methane in Tidal Swampland. *J Trop Soils*, 21(3), 179-186.
- Aftab, T., & Hakeem, K. R. (2020). *Plant Micronutrients*. Springer C.
- Arsita, N. H. (2024). *Ketersediaan unsur hara mikro Cu dan Zn pada tanah sawah dan serapannya oleh tanaman padi (Oryza sativa L.) pada sentra pertanaman padi di Lampung* (Skripsi). Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian. (2012). *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk*. Edisi 2. Bogor. 204 hal.
- Amsili, J. P., van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. (2021). Cropping system and soil texture shape soil health outcomes and scoring functions. *Soil Security*, 4, 100012.
- Badan Pusat Statistik Provinsi Sulawesi Selatan. (2024). *Luas panen, produktivitas, dan produksi padi menurut kabupaten/kota di Provinsi Sulawesi Selatan*. BPS.
- Baldantoni, D., Saviello, G., & Alfani, A. (2019). Nutrients and Non-Essential Elements in Edible Crops Following Long-Term Mineral and Compost Fertilization of A Mediterranean Agricultural Soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 35353–35364.
- Behera, S. R., Bhatt, M., Gairola, A., Rana, S., Mohapatra, A., Joshi, D., & Tripathy, A. (2025). A Comprehensive Review of Micronutrients and Their Implications on Vegetable Quality. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(5), 284-299.
- Cabot C., Martos S., Llugany M., Gallego B., Tolrà R., & Poschenrieder C. (2019). A Role for Zinc in Plant Defense against Pathogens and Herbivores. *Front. Plant Sci.* 10(1171) doi: 10.3389/fpls.2019.01171
- Chen, Y., Cui, J., Tian, X., Zhao, A., Li, M., Wang, S., & Liu, K. (2017). Effect of straw amendment on soil Zn availability and ageing of exogenous water-soluble Zn applied to calcareous soil. *PLoS One*, 12(1), e0169776.
- Demo, Rosna. (2017). *Penilaian Status Hara Tanah Pada Lahan Pertanian Di Kecamatan Kabila Kabupaten Bone Bolango*. Skripsi. Universitas Negeri Gorontalo
- Denton-Thompson, S. M., dan Sayer, E. J. (2022). Micronutrients in food production: what can we learn from natural ecosystems?. *Soil Systems*, 6(1), 8.
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Kaur, J., Shukla, A. K., Hossain, A., Abdel-Hafez, S. H., & Singh,

- V. K. (2021). The Pedospheric Variation of DTPA-Extractable Zn, Fe, Mn, Cu and Other Physicochemical Characteristics in Major Soil Orders in Existing Land Use Systems of Punjab, India. *Sustainability*, 14(1), 29.
- Dhanapriya, M., dan Mahehwari, R. (2015). Estimation of micro and macro nutrients in the soil of remote areas. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Science*, 10, 67-73.
- Dubey, N.K., Singh, Shweta., Singh, Swati., & Tripathi, D.K. (2015). Micronutrients and Their Diverse Role in Agricultural Crops. *Acta Physiologiae Plantarum*. 37(7):1-14.
- Fatahillah, Ahmad. (2023). *Ketersedian Hara Fosfor (P), Seng (Zn) dan C-Organik Tanah Sawah Berdasarkan Indeks Pertanaman (Studi Kasus di Kelurahan Kallabirang, Kecamatan Bantimurung, Kabupaten Maros)*. Skripsi. Universitas Hasanuddin.
- Ganeshamurthy, A. N., Rajendiran, S., Kalaivanan, D., & Rupa, T. R. (2019). Zinc Status in The Soils of Karnataka and Response of Horticultural Crops to Zinc Application: A Meta-Analysis. *Journal of Horticultural Sciences*, 14(2), 98-108.
- Hacisalihoglu G. (2020). Zinc (Zn): The Last Nutrient in the Alphabet and Shedding Light on Zn Efficiency for the Future of Crop Production under Suboptimal Zn. *Plants (Basel)*. 9(11):1471. doi: 10.3390/plants9111471.
- Kicińska, A. (2020). Lead and Zinc in Soils Around A Zinc-Works—Presence, Mobility and Environmental Risk. *Journal of Ecological Engineering*, 21(4)
- Lameck, A. S., Rotich, B., Ahmed, A., Kipkulei, H. K., Akos, P., & Boros, E. (2025). Influence of environmental variables and anthropogenic activities on soda-saline lakes chemistry in northern Tanzania: A remote sensing and GIS approach. *Heliyon*, 11(2).
- Nurrahma, A. H., Junaedi, A., Purnamawati, H., & Sakagami, J. I. (2017). Rice root distribution of four rice varieties to different depth of submergence. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 39(2), 119-127.
- Minasny, B., Hong, S. Y., Hartemink, A. E., Kim, Y. H., & Kang, S. S. (2016). Soil pH Increase Under Paddy in South Korea between 2000 and 2012. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 205–213. doi:10.1016/j.agee.2016.01.042
- Mira, H. S. & Fahrizal, A. (2019). *Upaya Peningkatan Kesuburan Tanah pada Lahan Kering di Kelurahan Aimas, Distrik Aimas, Kabupaten Sorong*. Fakultas Pertanian Univesitas Muhammadiyah Sorong, Sorong.
- Moreno-Lora, A., dan Delgado, A. (2020). Factors Determining Zn Availability and Uptake By Plants in Soils Developed Under Mediterranean Climate. *Geoderma*, 376, 114509.
- Opfergelt, S., Cornélis, J. T., Houben, D., Givron, C., Burton, K. W., & Mattielli, N. (2017). The Influence of Weathering and Soil Organic Matter on Zn Isotopes in Soils. *Chemical Geology*, 466, 140–148.
- Padhan, D., Sen, A., dan Pal, B. (2016). DTPA-extractable Zinc in Rice Soils and Its Availability to Rice. *Current World Environment*, 11(2), 662.
- Parveen, H., Paul, S. C., Kumar, S., Fatima, A., Sen, S., Mandal, A. K., ... & Kumar, A. (2024). *A review on Distribution and mobility of Zinc in soil under climate change scenario. AATCC Review*, 12(02), 90–97.
- Pinatih, I. D. A. S. P., Kusmiyarti, T. B., & Susila, K. D. (2015). Evaluasi Status Kesuburan Tanah pada Lahan Pertanian di Kecamatan Denpasar Selatan. *E-Jurnal Agroekoteknologi*

Tropika, 4(4), 282-292.

- Praharaj, S., Skalicky, M., Maitra, S., Bhadra, P., Shankar, T., Brestic, M., ... & Hossain, A. (2021). Zinc biofortification in food crops could alleviate the zinc malnutrition in human health. *Molecules*, 26(12), 3509.
- Rahman, M., Jahangir, M. M. R., Kibria, M. G., Hossain, M., Hosenuzzaman, M., Solaiman, Z. M., & Abedin, M. A. (2021). Determination of Critical Limit of Zinc for Rice (*Oryza sativa* L.) and Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivation in Floodplain Soils of Bangladesh. *Sustainability*, 14(1), 167.
- Saleem, M. H., Usman, K., Rizwan, M., Al Jabri, H., & Alsafran, M. (2022). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1033092.
- Sharef, A. A., Ahmed, C. A., & Mustafa, H. A. (2024). Analyzing growth Characteristics of F2 Hybrid Amaryllis Seedlings in Response to Substrates and Osmocote Fertilizers. *Journal of Kirkuk University for Agricultural Sciences*, 15(1).
- Shen, Y., Wiita, E., Nghiem, A. A., Liu, J., Haque, E., Austin, R. N., & Bostick, B. C. (2022). *Zinc Localization and Speciation in Rice Grain under Variable Nutrient Limitation Conditions*. Research Squares. Chinese Academy of Geological Sciences National Research Center for Geoanalysis.
- Shukla, A. K., Behera, S. K., Prakash, C., Patra, A. K., Rao, C. S., Chaudhari, S. K., & Green, A. (2021). Assessing Multi-Micronutrients Deficiency in Agricultural Soils of India. *Sustainability*, 13(16), 9136.
- Singh, N., Gill, R. S., & Dheri, G. S. (2019). Effect of integrated nutrient management on zinc fractions and rice yield.
- Soniya Purma, D. Muthumanickam dan Reshma, M. R. (2021). Delineation and Mapping of Soil Available Zinc and Boron Status in Soils of Vellore District of Tamil Nadu, India. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 10(01): 3347-3353.
- Thingujam, U., Kundu, D., Khanam, R., Mondal, S., & Hazra, G. C. (2019). Soil Available Zinc and Its Relationship with Soil Properties in Rice Soils of West Bengal, India. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 8(8), 486-491.
- Tran Ba, L., Le Van, K., Van Elsacker, S., & Cornelis, W. M. (2016). Effect of Cropping System on Physical Properties of Clay Soil under Intensive Rice Cultivation. *Land Degradation & Development*, 27(4), 973-982.
- Wisawapipat, W., Janlaksana, Y., & Christl, I. (2017). Zinc Solubility in Tropical Paddy Soils: A Multi-Chemical Extraction Technique Study. *Geoderma*, 301, 1-10.
- Zhao, D., Dong, J., & Li, Y. (2025). Zinc Translocation from Coastal Soil to Wheat as Mediated by Zinc Supply Levels and Soil Properties. *Plants*, 14(13), 1971.