

Pengembangan Kesehatan Tanah Berbasis Zeolit: Strategi Perbaikan Sifat Kimia Tanah Secara Berkelanjutan

Oviyanti Mulyani¹⁾, Rija Sudirja¹⁾, Eso Solihin¹⁾, Dirga Sapta Sara¹⁾ & Anne Yuliana Husein²⁾

¹⁾ Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran

²⁾ Laboratorium Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran
Jln. Ir. Soekarno km. 21 Jatinangor, Kab. Sumedang 45363 Jawa Barat

Korespondensi : oviyanti.mulyani@unpad.ac.id

ABSTRACT

These chemical residues affect the natural balance of soil biota, leading to a decrease in soil pH, a reduction in Cation Exchange Capacity (CEC), and a general decline in land productivity. If not treated promptly, this damage could harm health and food sustainability. The application of eco-friendly products in modifying soil characteristics, including high-quality zeolite, remains common today. This study aims to examine the effects of zeolite application on the dynamics of soil chemical characteristics to promote the development of a sustainable agricultural system. This study employed a Randomized Block Design (RBD) containing six different treatments such as five varying recommendation dosages of zeolite (0.5, 1, 1.5, 2, and 2.5) and one control treatment devoid of zeolite for comparative analysis. Each treatment was reproduced three times, yielding a total of eighteen experimental plots. Soil chemical parameters (pH and CEC) are the primary focus of this experiment. The study's results indicated that during the last weeks of testing, applying 1.5 to 2 doses of zeolite proved to be the most beneficial, as it continuously raised the pH and CEC levels. Both Pearson and Spearman tests indicate that the correlation between variables improves from first week to week fourth week. This suggests that the effects of the treatment, possibly zeolite application or an alternative treatment, start after several weeks. The results of this investigation indicate that incubation time in zeolite application important for exhibits effective buffering properties and functions efficiently, significantly improving the chemical properties in soil.

Keywords: zeolite, sustainable agriculture, food security, soil fertility

1. PENDAHULUAN

Penggunaan pupuk kimia tidak hanya diperlukan untuk meningkatkan produktivitas pertanian saat ini, tetapi juga metode yang dapat mempertahankan dan meningkatkan kualitas tanah dalam jangka panjang (Nisiyari *et al.*, 2025). Akan tetapi, aplikasi pupuk kimia secara terus menerus akan menyebabkan penurunan kualitas tanah, diantaranya rendahnya kapasitas tukar kation (KTK), tingginya tingkat pencucian hara dan kerusakan struktur tanah yang terus dihadapi oleh lahan pertanian dengan penggunaan yang intensif, terutama di daerah tropis (Soekamto & Fahrizal, 2019). Oleh karena itu, diperlukan suatu bahan pembenah tanah yang dapat memperbaiki sifat tanah menjadi lebih baik lagi.

Zeolit merupakan salah satu bahan amelioran yang sangat potensial untuk mendukung

sistem pertanian yang efisien dan ramah lingkungan. Bahan ini merupakan mineral aluminosilikat dengan struktur mikropori, yang memiliki kemampuan luar biasa untuk menyerap dan mempertahankan ion hara seperti NH_4^+ dan K^+ , serta memperbaiki retensi air dan menjaga keseimbangan pH tanah (Lestari, 2010). Kemampuan ini membuat zeolit berfungsi sebagai material untuk memperbaiki sifat kimia tanah dan dapat meningkatkan efisiensi pupuk, terutama dalam sistem pemupukan organik dan anorganik. Penambahan zeolit juga dapat meningkatkan penyerapan hara tanaman, memperpanjang ketersediaan nutrisi di zona perakaran, dan mengurangi pencemaran lingkungan akibat pupuk kimia yang berlebihan (Diatna *et al.*, 2024). Zeolit merupakan salah satu bahan amelioran anorganik yang telah lama dikenal karena kemampuannya dalam memperbaiki

sifat fisik dan kimia tanah, terutama pada tanah-tanah tropis yang umumnya miskin hara dan memiliki kapasitas tukar kation (KTK) rendah. Meskipun bukan material baru, penelitian terkait zeolit terus dikembangkan hingga saat ini. Semakin banyak bukti ilmiah yang menunjukkan efektivitasnya dalam efisiensi pupuk, memperpanjang ketersediaan unsur hara, dan meningkatkan produktivitas tanaman (Abdelrahman *et al.*, 2016).

Zeolit telah lama menarik perhatian dalam penelitian pertanian karena kemampuannya memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah secara berkelanjutan. Material aluminosilikat berpori ini memiliki struktur kristalin bermuatan negatif yang memiliki kemampuan untuk menjaga ketersediaan hara makro dalam tanah (Lestari, 2010). Zeolit juga berperan sebagai *buffer* pH, menetralkan tanah masam, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan porositas dan kemampuan menahan air (Diatna *et al.*, 2024). Kombinasi zeolit dengan pupuk organik atau mikroorganisme tanah, mampu meningkatkan aktivitas biologi tanah dan efisiensi serapan hara oleh tanaman, serta mengurangi emisi gas rumah kaca dan pencucian nitrogen (Cely *et al.*, 2015).

Berbagai penelitian zeolit saat ini banyak difokuskan pada berbagai mekanisme kimia dan pemanfaatannya di lingkungan. Akan tetapi, mekanisme inkubasi sebagai tahapan dasar yang penting seringkali terlupakan, yakni bagaimana durasi dan kondisi inkubasi zeolit dalam tanah mempengaruhi dinamika perubahan pH, ketersediaan P, kejenuhan basa, dan penurunan ion Al^{3+} secara bertahap (Satriani *et al.*, 2024). Kajian ini menjadi penting karena menunjukkan bahwa efisiensi zeolit sebagai pembenah tanah bukan hanya bergantung pada dosis, tetapi juga pada waktu kontak dan interaksinya dengan fraksi tanah aktif, sehingga mendukung optimalisasi pemanfaatan zeolit dalam skema pertanian berkelanjutan (Singh *et al.*, 2025).

Pada mekanisme inkubasi zeolit di dalam tanah, diyakini mampu meningkatkan kemampuan zeolit dalam melepaskan dan menyerap ion-ion hara penting, memperbaiki pH tanah, meningkatkan KTK, dan menstabilkan nitrogen dalam bentuk amonium sehingga lebih tersedia bagi tanaman dalam jangka panjang (Vinayak & Ad, 2023). Studi tentang dinamika inkubasi zeolit juga menunjukkan bahwa lama waktu inkubasi dan kondisi lingkungan seperti kelembapan dan suhu tanah dapat mempengaruhi perubahan signifikan terhadap sifat kimia tanah, seperti peningkatan ketersediaan P, Ca, dan Mg, serta menurunkan keasaman tanah secara bertahap.

Studi ini menekankan pendekatan inkubasi terhadap perubahan dua parameter penting dalam kimia dan kesuburan tanah (pH dan KTK) dan bertujuan memahami dan mengoptimalkan mekanisme kerjanya secara lebih sistematis dalam konteks pertanian. Hal ini menjadi penting, terutama dalam menghadapi tantangan degradasi tanah dan ketergantungan tinggi terhadap pupuk kimia yang menyebabkan penurunan efisiensi penggunaan hara (Liu *et al.*, 2010). Oleh karena itu, riset yang mendalami hubungan antara durasi dan metode inkubasi zeolit terhadap perubahan sifat kimia tanah sangat dibutuhkan sebagai bagian dari inovasi pengelolaan lahan yang berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh aplikasi zeolit terhadap dinamika sifat kimia tanah guna mendukung implementasi sistem pertanian berkelanjutan. Aplikasi zeolit telah ditambahkan ke dalam berbagai strategi inovatif untuk memperbaiki tanah, seperti penggabungannya dengan pupuk organik, mikroba fungsional, dan sistem pertanian berbasis perubahan iklim. Oleh karena itu, penggunaan zeolit masih sangat relevan dan penting, terutama untuk menyelesaikan masalah dalam membangun sistem pertanian yang efisien, produktif, dan

berkelanjutan serta mengatasi degradasi tanah yang disebabkan oleh peningkatan intensitas pertanian.

2. BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada tahun 2023 di Lahan Percobaan Laboratorium Kimia Tanah dan Nutrisi Tanaman Universitas Padjadjaran, Jatinangor. Rancangan percobaan menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) yang terdiri enam perlakuan, yaitu lima perlakuan dosis zeolit (0,5, 1, 1,5, 2 dan 2,5 dosis rekomendasi zeolit) dan satu perlakuan kontrol sebagai pembanding. Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga total petak percobaan adalah delapan belas petak percobaan.

Pengamatan analisis perubahan sifat kimia tanah dilakukan pada 1, 2, 4, dan 7 Minggu Setelah Aplikasi (MSA) (Nursanti & Kemala, 2019). Analisis tanah awal (lengkap) juga dilakukan untuk melihat kondisi awal media yang dipergunakan, serta analisis parameter pH dan Kapasitas Tukar Kation (KTK) hingga minggu ketujuh setelah aplikasi.

Data yang diperoleh dari hasil analisis laboratorium dan lapangan diuji perbedaan rata-rata pengaruh perlakuan dengan uji F pada taraf 5% berdasarkan analisis variansi (ANOVA) untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap parameter teramati dari setiap perlakuan yang diberikan, dan perbedaan rata-rata perlakuan dilanjutkan dengan uji rentang berganda Duncan pada taraf 5%. Data diuji menggunakan program *Statistical Product and Service Solution* (SPSS).

2.1 Analisis Tanah Awal dan Parameter Kimia

Analisis tanah awal dilakukan untuk mengetahui karakteristik awal tanah yang akan dijadikan media untuk proses inkubasi. Analisis ini meliputi sifat kimia dan fisika tanah, serta analisis pH dan KTK setelah

aplikasi, yang mengikuti referensi dari (Balitan, 2005).

2.2 Persiapan Media Tanam

Media tanam yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah tanah Inceptisols asal Jatinangor. Setiap polibag diisi tanah sebanyak 10 kg yang disiapkan sesuai dengan tata letak, selanjutnya ditambahkan zeolit dengan cara diaduk di dalam polibag, sampai komposit dengan tanah, kemudian disiram sampai kondisi kapasitas lapang. Perhitungan kapasitas lapang secara gravimetrik menurut Haridjaja *et al.* (2013) dapat dilihat pada persamaan (1).

$$KL = \frac{W_t - W_k}{W_k} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :
 KL : Kandungan air pada saat kapasitas lapang (%)
 W_t : Berat tanah basah setelah jenuh air (g)
 W_k : Berat tanah kering oven (g)

2.3 Analisis Data

a. Uji Korelasi Pearson

Uji korelasi *Pearson* dilakukan dengan menggunakan persamaan (2) yang mengacu kepada Kumar *et al.* (2024).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :
 r = koefisien korelasi Pearson
 X_i = nilai ke-i dari variabel ke-X
 Y_i = nilai ke-i dari variabel ke-Y
 \bar{X} = rata-rata dari seluruh nilai X
 \bar{Y} = rata-rata dari seluruh nilai Y
 n = jumlah pasangan data (X,Y)
 \sum = simbol penjumlahan

b. Uji Korelasi Spearman

Untuk melihat uji korelasi menggunakan metode korelasi *Spearman* dapat menggunakan persamaan (3) dari Ali & Al-Hameed (2022).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

- r_s = koefisien korelasi Spearman
 d_i = selisih antara peringkat rank X_i dan Y_i
 untuk observasi ke- i , yaitu $d_i = RX_i - RY_i$
 $\sum d_i^2$ = jumlah kuadrat selisih perangkat antar variabel
 n = jumlah pasangan data

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kualitas Zeolit

Zeolit yang dipergunakan mengandung beberapa syarat utama mutu pembenah tanah mineral zeolit untuk pertanian berdasarkan SNI 13-7168-2006 dan syarat pembenah tanah berdasarkan Permentan Nomor 02/Pert/HK.060/2006.

Berdasarkan analisis laboratorium (Tabel 1) dan perbandingan dengan standar SNI 13-7168-2006 dan Permentan No. 02/Pert/HK.060/2006, zeolit yang dievaluasi memiliki kualitas yang sangat baik untuk digunakan sebagai pembenah tanah pertanian. Zeolit ini memiliki kadar 51,50%, dengan syarat minimum yang dianjurkan yaitu 50% sebagaimana ditentukan oleh SNI. Hal ini menunjukkan bahwa bahan tersebut memiliki kandungan mineral aktif yang sesuai untuk meningkatkan kualitas tanah.

Tabel 1 Hasil Analisis Kualitas Produk Zeolit

| No. | Parameter | Unit | Hasil |
|-----|--------------|--------------------------|--------|
| 1 | Zeolit | % | 51,50 |
| 2 | KTK | (cmol.kg ⁻¹) | 116,12 |
| 3 | Kadar Air | % | 4,38 |
| 4 | Ukuran Butir | % | 100 |
| 5 | Logam berat | | |
| | As | ppm | 0,00 |
| | Hg | ppm | 0,00 |
| | Pb | ppm | 10,82 |
| | Cd | ppm | 0,50 |

Kapasitas Tukar Kation (KTK) sebesar 116,12 cmol.kg⁻¹, menunjukkan pemenuhan persyaratan minimum, baik menurut SNI (100 cmol.kg⁻¹) atau Permentan (80 cmol.kg⁻¹). Hal ini menunjukkan kemampuan zeolit untuk mempertahankan dan mempertukarkan unsur hara secara efisien, yang sangat penting untuk

menyediakan kebutuhan nutrisi bagi pertumbuhan tanaman secara seimbang (Purnomo *et al.*, 2017). Kadar air yang dimiliki oleh material ini juga tergolong rendah (4,38%) yang mengandung arti memenuhi ambang batas minimumnya yaitu sebesar 10%, dimana kadar air ini dapat mempengaruhi terhadap stabilitas dan umur produk. Ukuran partikel material ini 100% lolos uji sehingga memenuhi persyaratan yang ditentukan dimana setidaknya harus memenuhi 90%, untuk memastikan kemudahan penggunaan dan pencampuran.

Selain itu, unsur-unsur seperti arsen (As), merkuri (Hg), dan kadmium (Cd) ditemukan pada tingkat rendah atau sangat rendah, tepat di bawah jumlah maksimum yang diizinkan, yang menunjukkan syarat terkait kesehatan lingkungan terpenuhi. Sebaliknya, kandungan timbal (Pb) sekitar 10,82 ppm, yang menurut Permentan berada di bawah tingkat minimum. Secara keseluruhan, hasilnya menunjukkan bahwa zeolit ini termasuk kedalam kualitas ameliorant yang memenuhi persyaratan yang dianjurkan sehingga memiliki banyak potensi untuk dapat digunakan dalam sistem yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

3.2 Hasil Analisis Tanah Awal

Tanah yang digunakan sebagai media untuk proses inkubasi adalah tanah Inceptisol yang berasal dari lahan percobaan Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran Jatinangor. Hasil analisis diuraikan pada Tabel 2. Nilai pH sebesar 5,45, yang termasuk kategori agak masam. Kandungan C-organik sekitar 1,64% dan N-total 0,14%, yang merupakan kategori deplesi hara yang akan mempengaruhi aktivitas makhluk hidup berkurang dan C/N sekitar 12 menunjukkan bahwa dekomposisi bahan organik berlangsung secara normal. Menurut data hasil analisis, kadar P yang ada sangat tinggi, baik dari Bray (10,33 ppm) maupun ekstraksi HCl 25% (52,88 mg/100g).

Namun, jumlah K sangat rendah (5,43 mg.100g⁻¹), dan jumlah K-dd hanya 0,17

cmol/kg. Sebaliknya, Ca-dd (11,90 cmol/kg) dan Mg-dd (3,50 cmol.kg⁻¹) tinggi dan berkontribusi terhadap kejenuhan basa yang masuk ke dalam kriteria rendah (40,50%). Nilai KTK berkisar 5,26 cmol.kg⁻¹, yang menunjukkan kapasitas tanah untuk menyerap dan mempertukarkan kation tergolong rendah. pH KCl (4,48) lebih rendah daripada H₂O, yang berarti bahwa ada lebih banyak aktivitas yang dipengaruhi oleh kadar kation yang lebih rendah. Al-dd dan Kejenuhan Al adalah 0%, yang menunjukkan bahwa tidak ada toksisitas Al, yang biasanya dapat menghambat pertumbuhan akar.

Tabel 2 Hasil Analisis Kimia dan Fisika Tanah Awal

| No. | Parameter | Unit | Hasil |
|-----------------|---|--------------------------|-------|
| 1 | pH H ₂ O | - | 5,45 |
| 2 | pH KCl 1 N | - | 4,48 |
| 3 | C-organik | (%) | 1,64 |
| 4 | N-total | (%) | 0,14 |
| 4 | C/N | - | 12 |
| 6 | P ₂ O ₅ (HCl 25%) | (mg.100g ⁻¹) | 52,88 |
| 7 | P ₂ O ₅ (Brays) | (ppm P) | 10,33 |
| 8 | K ₂ O (HCl 25%) | (mg.100g ⁻¹) | 5,43 |
| Susunan Kation: | | | |
| 9 | K-dd | (cmol.kg ⁻¹) | 0,02 |
| 10 | Na-dd | (cmol.kg ⁻¹) | 0,03 |
| 11 | Mg-dd | (cmol.kg ⁻¹) | 1,61 |
| 12 | Ca-dd | (cmol.kg ⁻¹) | 0,47 |
| 13 | KTK | (cmol.kg ⁻¹) | 5,26 |
| 14 | Kejenuhan Basa | (%) | 40,50 |
| 15 | Al-dd | (cmol.kg ⁻¹) | 0 |
| 16 | H-dd | (cmol.kg ⁻¹) | 0,23 |
| 17 | Kejenuhan Al | (%) | 0 |
| Tekstur: | | | |
| 18 | Pasir | (%) | 7 |
| 19 | Debu | (%) | 42 |
| 20 | Liat | (%) | 51 |

Hasil analisis tekstur menunjukkan tanah tergolong liat berdebu (51% tanah liat, 42% debu, dan hanya 7% pasir), yang secara fisik berkontribusi terhadap tingginya kapasitas menahan air tetapi juga dapat meningkatkan aerasi dan drainase tanah.

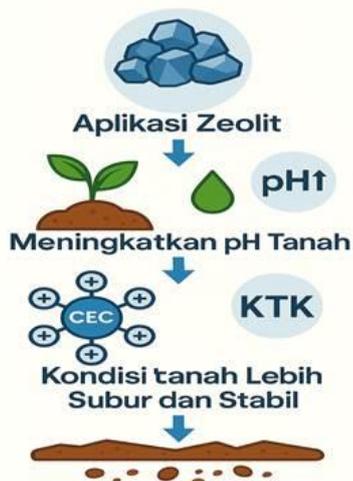
Secara umum tanah yang dianalisis memiliki reaksi masam (pH 5,45), namun tidak

menunjukkan adanya kejenuhan aluminium, sehingga aman dari toksisitas Al. Kandungan C-organik dan nitrogen total termasuk sedang, dengan rasio C/N yang ideal untuk proses dekomposisi bahan organik. Ketersediaan fosfor tergolong tinggi, sementara kalium tersedia dalam jumlah sedang. Kapasitas Tukar Kation (KTK) tergolong tinggi, namun kejenuhan basanya masih rendah, menandakan perlunya peningkatan kandungan kation basa, khususnya kalsium dan kalium. Tekstur tanah termasuk kelas liat dimana menunjukkan kemampuan menyimpan air dan unsur hara yang baik, namun membutuhkan pengelolaan agar struktur tanah tetap gembur dan aerasi baik. Tanah ini berpotensi untuk budidaya, terutama dengan penyesuaian pH dan penambahan bahan organik serta pupuk dasar. Sangat disarankan untuk meningkatkan kadar pH, dan K dengan menggunakan bahan amelioran seperti zeolit atau pupuk organik. Hal ini disebabkan zeolit secara khusus dapat meningkatkan KTK dan meningkatkan ketersediaan K melalui mekanisme pertukaran kation yang efektif (Ahmed *et al.*, 2006).

3.3 Kandungan Sifat Kimia Tanah

Mekanisme zeolit dapat mempengaruhi beberapa sifat kimia tanah (Gambar 1). Zeolit adalah mineral aluminosilikat berpori dengan struktur tiga dimensi yang memiliki kemampuan tukar kation tinggi (Diatna *et al.*, 2024). Zeolit alam, banyak digunakan dalam pertanian karena kemampuannya dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Al-Jabri & Soegianto, 2014). Zeolit dapat menaikkan pH tanah yang asam. Ini terjadi karena zeolit mengandung kation basa seperti kalsium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), natrium (Na⁺), dan kalium (K⁺) yang dapat menetralkan ion hidrogen (H⁺) dan aluminium (Al³⁺) yang menyebabkan keasaman tanah. Aplikasi zeolit dapat berpengaruh terhadap peningkatan pH tanah (netralisasi keasaman), peningkatan KTK, dan pelepasan nutrisi secara

lambat. Efek langsung pada pertumbuhan tanaman adalah akar tanaman lebih sehat, penyerapan hara lebih optimal serta tahan akan terhadap perubahan iklim ekstrim (kering atau basah).



Gambar 1 Mekanisme Zeolit Mempengaruhi Tanah

3.3.1 Nilai pH Tanah

Berdasarkan analisis tingkat kemasaman tanah (pH) memperlihatkan bahwa aplikasi amelioran zeolit dapat memberikan respon yang berbeda terutama apabila dibandingkan dengan tanpa perlakuan pemberian zeolit. Proses inkubasi yang dilakukan selama tujuh minggu memberikan pengaruh yang nyata terhadap beberapa perlakuan terutama antara perlakuan kontrol dan berbagai perlakuan dosis zeolit (Tabel 3).

Pada minggu pertama (1 MSA), semua perlakuan termasuk kontrol dan berbagai dosis zeolit, menunjukkan pH yang relatif konstan (5,06–5,34) namun tidak berbeda secara statistik. Hal ini menunjukkan bahwa pada minggu pertama, zeolit tidak berinteraksi secara aktif dengan larutan tanah untuk mengubah pH secara signifikan. Menurut (Nursanti & Kemala, 2019), perubahan pH yang disebabkan oleh zeolit dimulai setelah beberapa bulan inkubasi.

Pada minggu kedua (2 MSA), setiap perlakuan zeolit menunjukkan peningkatan pH

H₂O yang signifikan dibandingkan dengan kontrol (5,09), dengan kisaran 7,26 hingga 7,60, yang menunjukkan bahwa pH telah berubah dari asam menjadi netral. Dosis zeolit 1,5 dan 2 menghasilkan pH tertinggi (7,60 dan 7,57), hal ini menunjukkan bahwa zeolit secara aktif dapat menarik ion H⁺ atau Al³⁺ yang terdapat bebas di tanah, seperti yang dinyatakan oleh (Purnomo *et al.*, 2017) bahwa zeolit memiliki sifat alami dan dapat menarik ion-ion dengan kation tanah.

Tabel 3 Pengaruh Zeolit Terhadap Analisis pH Tanah

| Perlakuan | pH tanah | | | |
|------------------|----------|--------|---------|--------|
| | 1 MSA | 2 MSA | 4 MSA | 7 MSA |
| Kontrol | 5,13 a | 5,09 a | 5,85 a | 5,28 a |
| ½ Dosis Zeolit | 5,15 a | 7,30 b | 7,04 b | 7,22 b |
| 1 Dosis Zeolit | 5,06 a | 7,26 b | 7,04 b | 7,24 b |
| 1,5 Dosis Zeolit | 5,34 a | 7,60 b | 7,17 bc | 7,24 b |
| 2 Dosis Zeolit | 5,11 a | 7,57 b | 7,18 bc | 7,29 b |
| 2,5 Dosis Zeolit | 5,14 a | 7,48 b | 7,33 c | 7,38 b |

Keterangan: Angka rerata yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata antar Minggu berdasarkan Uji Jarak Berganda Duncan pada Taraf 5%.

Pada minggu keempat (4 MSA), terjadi peningkatan pH pada dosis rekomendasi 2,5 yang menghasilkan nilai tertinggi (7,33). Hal ini menunjukkan bahwa pada minggu keempat, reaksi kation yang diinduksi zeolit mencapai maksimum karena struktur zeolit yang bersesuaian dengan kation Ca²⁺, Na⁺, dan Mg²⁺ dapat menghambat ion H⁺ dan Al³⁺ yang merupakan penyebab kemasaman. Hal ini sejalan dengan penelitian Gholamhoseini *et al.* (2020) yang menjelaskan bahwa ketika zeolit diberikan dalam bentuk granular dan dikombinasikan dengan kondisi kelembaban yang ideal selama masa inkubasi, pH air dapat meningkat secara signifikan.

Pada minggu ketujuh (7 MSA), pH tanah pada semua perlakuan menunjukkan kondisi stabil dan tinggi (7,22–7,38), yang menunjukkan bahwa efek zeolit pada pH bersifat menguntungkan (berkaitan dengan efek

penyangga). Hal ini menunjukkan bahwa zeolit tidak hanya menaikkan pH pada waktu tertentu, tetapi juga memiliki kemampuan untuk mengubah dalam jangka panjang sehubungan dengan kondisi tanah (Nursanti, 2020). Dapat disimpulkan bahwa efek tersebut dapat bertahan hingga akhir pengamatan. Aplikasi zeolit secara signifikan dapat menaikkan pH tanah serta peningkatan pH tertinggi terjadi pada dosis rekomendasi 1,5–2,5, yang menunjukkan bahwa dosis rekomendasi tinggi memberikan hasil terbaik dibandingkan dengan semua perlakuan.

3.3.2 Kapasitas Tukar Kation

Berdasarkan hasil analisis kandungan KTK tanah (Tabel 4), bahwa terdapat pengaruh yang nyata terhadap beberapa perlakuan yang

diberikan selama masa inkubasi zeolit (1, 2, 4, dan 7 minggu setelah aplikasi). Secara umum, terjadi peningkatan KTK pada tanah seiring bertambahnya waktu dan dosis zeolite yang diberikan, terutama pada minggu keempat.

Pada minggu pertama (1 MSA) semua perlakuan termasuk kontrol dan berbagai dosis zeolit, menunjukkan data yang seragam dan relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi zeolit tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap parameter tanah yang diukur dalam waktu yang sangat singkat. Respon ini konsisten dengan Nursanti & Kemala (2019), yang menyatakan bahwa reaksi zeolit di tanah terutama dalam peningkatan sifat kimia, memerlukan waktu tertentu karena mekanisme kation dan adsorpsi yang bertahap.

Tabel 4 Hasil Analisis KTK Tanah selama Masa Inkubasi

| Perlakuan | KTK Tanah (cmol.kg ⁻¹) | | | |
|------------------|------------------------------------|----------|----------|----------|
| | 1 MSA | 2 MSA | 4 MSA | 7 MSA |
| Kontrol | 5,45 a | 11,53 a | 19,35 a | 10,59 a |
| ½ Dosis Zeolit | 5,25 a | 24,45 b | 42,30 ab | 23,10 b |
| 1 Dosis Zeolit | 5,60 a | 26,65 bc | 47,67 bc | 22,58 bc |
| 1,5 Dosis Zeolit | 5,55 a | 26,40 c | 50,46 bc | 27,90 bc |
| 2 Dosis Zeolit | 5,10 a | 26,10 bc | 49,38 c | 24,28 c |
| 2,5 Dosis Zeolit | 5,35 a | 24,35 bc | 48,75 c | 23,41 bc |

Keterangan: Angka rerata yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata antar Minggu berdasarkan Uji Jarak Berganda Duncan pada Taraf 5%.

Pada minggu kedua terdapat perbedaan antara perlakuan kontrol dan perlakuan zeolit yang signifikan. Zeolit pada dosis rekomendasi 0,5 hingga 2,5 menunjukkan peningkatan nilai yang signifikan jika dibandingkan dengan kontrol. Nilai tertinggi disebabkan oleh penggunaan zeolit 1,5 dan 1 dosis (sekitar 26,65–26,40 cmol.kg⁻¹). Hal ini sesuai dengan kajian yang dilakukan oleh (Darajah *et al.*, 2018) bahwa zeolit bekerja secara efektif sebagai penyangga hara dengan mentransfer kation secara bertahap. Aplikasi zeolit pada minggu keempat dengan nilai tertinggi (50,46 cmol.kg⁻¹) dicapai oleh perlakuan 1,5 dosis rekomendasi, yang diikuti oleh dosis

rekomendasi 2 dan 2,5. Hal ini menunjukkan bahwa pada waktu inkubasi, kandungan kation dapat tukar mencapai tingkat mobilitas atau ketersediaan tertentu. Menurut (Nainggolan *et al.*, 2009) pelepasan hara oleh zeolit mencapai maksimum pada minggu ketiga hingga kelima, tergantung pada jenis tanah, kelembaban, dan suhu. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas zeolit sebagai pembenah tanah sangat dipengaruhi oleh waktu inkubasi.

3.4 Korelasi Antara pH dan KTK

3.4.1 Hasil Uji Korelasi Pearson

Hasil uji korelasi Pearson ini dapat dilihat pada Tabel 5. Hasil analisis menunjukkan

adanya hubungan positif yang signifikan antara pH dan KTK tanah. Pada minggu kesatu setelah aplikasi (1 MSA), dapat terlihat bahwa terdapat korelasi yang lemah, dan tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara dua variabel masih belum terlihat jelas setelah aplikasi selama satu minggu. Korelasi paling kuat terjadi pada MSA 2, 4, dan 7, dengan koefisien korelasi $> 0,94$ dan memberikan signifikansi secara statistik.

Tabel 5 Hasil Korelasi Per Minggu Setelah Aplikasi (MSA)

| MSA | Koefisien Korelasi (r) | Nilai p | Interpretasi |
|-------|------------------------|---------|-------------------------|
| 1 MSA | 0,25 | 0,636 | Lemah, Signifikan |
| 2 MSA | 0,98 | 0,0006 | Sangat Kuat, Signifikan |
| 4 MSA | 0,98 | 0,0006 | Sangat Kuat, Signifikan |
| 7 MSA | 0,94 | 0,0053 | Sangat Kuat, Signifikan |

Pada tanah tanpa perlakuan, KTK dan pH tidak selalu berkorelasi kuat, karena keduanya dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti bahan organik, jenis liat, atau aktivitas mikroba. Namun, dengan adanya aplikasi zeolit, terjadi perbaikan simultan terhadap KTK dan pH, sehingga terjadi peningkatan pH menurunkan ion Al^{3+} toksik yang biasa mendominasi koloid tanah masam. Selain itu, terjadi kenaikan KTK sehingga dapat memperkuat kemampuan tanah menahan dan menyuplai hara. Akibatnya, korelasi antara KTK dan pH menjadi lebih kuat, yang dapat terlihat dalam nilai koefisien korelasi (r) yang tinggi dan signifikan secara statistik dalam analisis korelasi minggu ke-2, ke-4, dan ke-7 setelah aplikasi zeolit.

3.4.2 Hasil Uji Korelasi Spearman

Hasil uji korelasi *Spearman* ini dapat dilihat pada Tabel 6. Korelasi *Spearman*

menunjukkan bahwa efek aplikasi MSA terhadap parameter tanah seperti pH dan KTK tidak langsung memberikan efek yang signifikan, namun cenderung menguat pada minggu ketiga. Pada minggu kesatu, nilai koefisien Spearman sangat lemah ($r_s = -0,09$) dan tidak signifikan ($p = 0,87$). Hal ini menunjukkan tidak adanya hubungan yang berarti antara variabel yang diamati pada minggu pertama. Pada minggu kedua, terdapat korelasi yang sedikit meningkat menjadi lemah ($r_s = 0,37$), namun masih tidak signifikan ($p = 0,47$), yang menandakan adanya indikasi awal terdapat korelasi, namun belum cukup kuat secara statistik.

Tabel 6 Hasil Korelasi Per Minggu Setelah Aplikasi (MSA)

| MSA | Koefisien Spearman (r_s) | Nilai p | Interpretasi |
|-------|------------------------------|---------|--------------------------------|
| 1 MSA | -0,09 | 0,87 | Sangat lemah, tidak signifikan |
| 2 MSA | 0,37 | 0,47 | Lemah, tidak signifikan |
| 4 MSA | 0,75 | 0,08 | Kuat, mendekati signifikan |
| 7 MSA | 0,61 | 0,20 | Sedang-kuat, tidak signifikan |

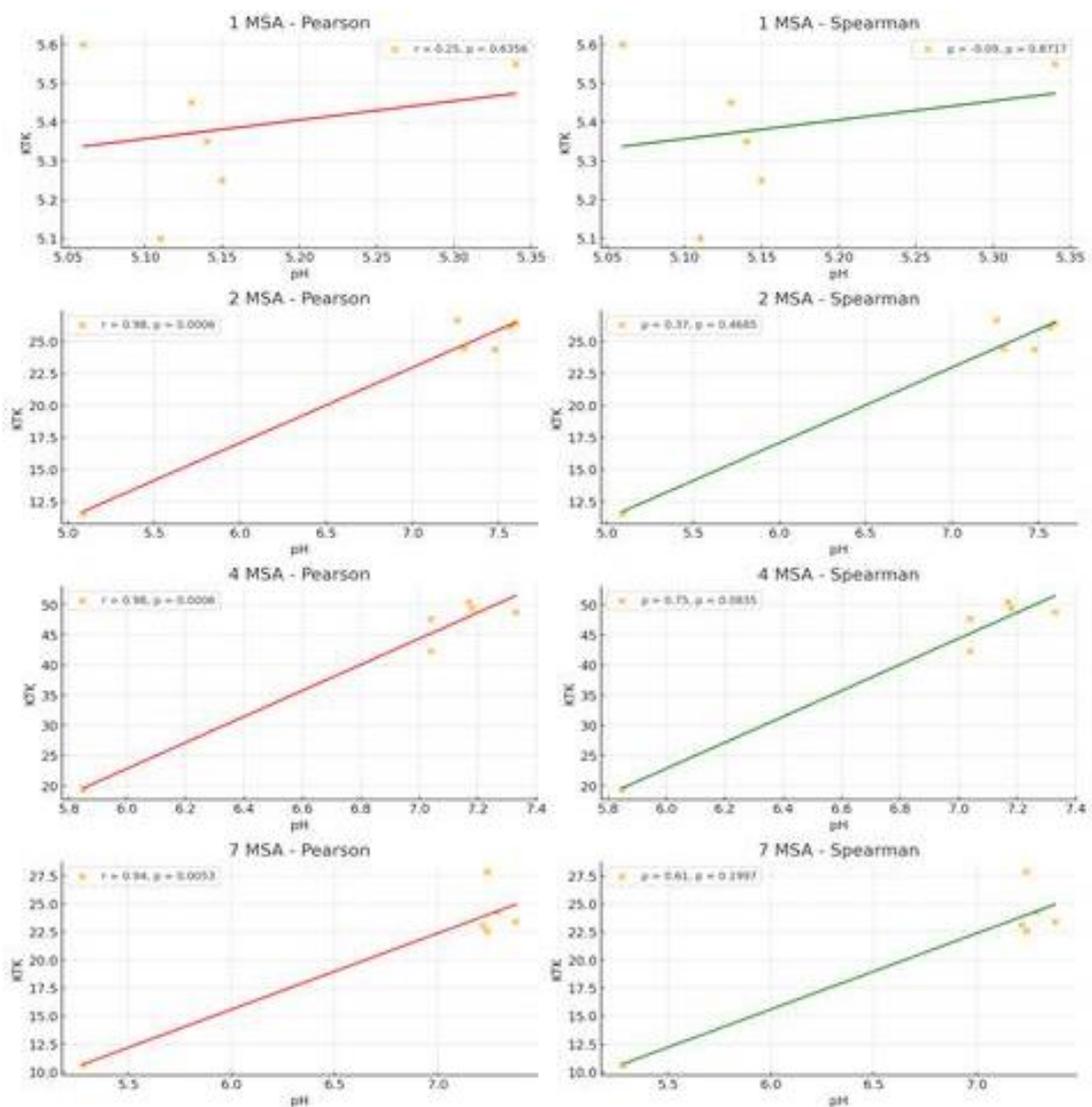
Pada minggu keempat terdapat korelasi yang menjadi kuat ($r_s = 0,75$) dan mendekati signifikan ($p = 0,08$). Ini menunjukkan bahwa pengaruh aplikasi mulai terlihat jelas, meskipun belum memenuhi kriteria signifikansi (biasanya $p < 0,05$). Pada minggu keempat, korelasi yang terjadi tetap antara sedang-kuat ($r_s = 0,61$) namun tidak signifikan ($p = 0,20$). Hal ini menunjukkan pengaruh aplikasi zeolit memberikan efek terhadap kedua parameter meskipun kekuatan hubungannya sedikit menurun dan belum signifikan secara statistik. Zeolit bekerja sebagai penstabil pH dan penambah KTK melalui kemampuan tukar ion yang tinggi dan struktur mikroporinya (Lestari, 2010). Penggunaan zeolit dalam tanah, terutama tanah masam, dapat secara signifikan meningkatkan kesuburan tanah,

efisiensi pemupukan, serta mendukung pertumbuhan tanaman melalui perbaikan sifat kimia tanah.

3.5 Perbandingan Hasil Uji Korelasi

Hasil perbandingan antar uji korelasi dapat dilihat pada Gambar 2. Hubungan kedua hasil uji digambarkan dalam grafik. Grafik pada kolom kiri menunjukkan hasil uji Pearson untuk mengukur hubungan linear antara parameter pH dan KTK, sedangkan kolom yang berada di sebelah kanan menunjukkan grafik berdasarkan uji *Spearman* yang mengukur *hubungan monotonik* (naik atau turun secara

umum, dan tidak harus linear). Pada MSA 2, 4, dan 7, grafik *Pearson* menunjukkan garis regresi yang sangat sesuai dengan distribusi data sehingga menunjukkan nilai interpretasi koefisien tinggi dan signifikan. Di sisi lain, grafik *Spearman* untuk MSA 4 dan 7 juga menunjukkan tren positif, tapi lebih konservatif ($\rho < r$), namun menunjukkan hubungan monotonik yang cenderung moderat dan tidak signifikan secara statistik pada sebagian besar MSA. Hal ini disebabkan oleh sensitivitas *Pearson* terhadap pola hubungan linear, sementara *Spearman* lebih mengutamakan urutan data.



Gambar 2 Hubungan Korelasi *Pearson* dan *Spearman* antara parameter pH dan KTK

Pada MSA kesatu, baik *Pearson* maupun *Spearman* menunjukkan hubungan lemah dan tidak signifikan yang mengandung arti pada satu minggu setelah aplikasi sebaran data masih memberikan karakter yang acak. Menurut (Kumar *et al.*, 2024), *Pearson* cocok digunakan ketika hubungan antar variabel diduga linear dan distribusi data mendekati normal. Sebaliknya, *Spearman* lebih tepat digunakan untuk data yang tidak memenuhi asumsi normalitas atau terdapat *outlier* signifikan. Dalam konteks ini, data hasil analisis antara parameter pH dan KTK cenderung mengikuti pola linear, sehingga analisis uji *Pearson* menjadi lebih sensitif mendeteksi hubungan tersebut.

4. KESIMPULAN

Efektivitas terbaik terlihat pada perlakuan zeolit 1,5–2 dosis rekomendasi yang secara konsisten menunjukkan perbaikan nilai pH dan KTK. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit memiliki sifat penyangga yang baik dan bekerja secara efisien, serta memiliki kinerja yang tinggi dalam meningkatkan kualitas sifat kimia tanah. Hasil analisis korelasi menunjukkan hubungan yang signifikan antara pH dan KTK seiring waktu, yang menegaskan efek sinergis zeolit terhadap kedua parameter uji. Hal ini menegaskan bahwa zeolit merupakan bahan pembenah tanah yang berpotensi dalam meningkatkan pH dan KTK tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran atas fasilitas laboratorium maupun lapangan untuk kajian ini serta tenaga laboran dan mitra terkait.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelrahman, M.A.E., Natarajan, A. & Hegde, R. 2016. Assessment of land suitability

and capability by integrating remote sensing and GIS for agriculture in Chamarajanagar district, Karnataka, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(1): 125–141.

Ahmed, O.H., Aminuddin, H. & Husni, M.H.A. 2006. Reducing ammonia loss from urea and improving soil-exchangeable ammonium retention through mixing triple superphosphate, humic acid and zeolite. *Soil Use and Management*, 22(3): 315–319.

Al-Jabri, M. & Soegianto, R. 2014. Teknologi Zeolite untuk Pengembangan Pertanian yang Sangat Menjanjikan. *Prosiding Seminar Nasional*, 500–508.

Ali, K. & Al-Hameed, A. 2022. Spearman's correlation coefficient in statistical analysis. *Int. J. Nonlinear Anal. Appl*, 13(October 2021): 2008–6822.

Balitan, B.D. 2005. Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk. Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk.

Cely, P., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J. & Méndez, A. 2015. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 111: 173–182.

Darojah, L.I., Jumaeri & Kusumastuti, E. 2018. Modifikasi zeolit A dengan surfaktan HDTMA dan aplikasinya sebagai adsorben ion nitrat. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 7(1): 1–8.

Diatna, E., Muspiah, A. & Farista, B. 2024. Effect of zeolite addition on urea fertilization efficiency in mustard greens (*Beassica juncea* L.). *Jurnal Biologi Tropis*, 24(1b): 710–717.

Haridjaja, O., Baskoro, D.P.T. & Setianingsih, M. 2013. Perbedaan nilai kadar air kapasitas lapang berdasarkan metode Alhricks, drainase bebas, dan pressure plate pada berbagai tekstur tanah dan hubungannya dengan pertumbuhan bunga matahari

- (*Helianthus annuus* L.). Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan, 15(2): 52.
- Kumar, A., Kumari, V. & Jha, A.K. 2024. Pearson correlation and regression analysis of sahibganj agricultural soil of Eastern Barharwa (SASEB). Global Journal of Research in Agriculture and Life Sciences, 04(04): 10–19.
- Lestari, D.Y. 2010. Kajian modifikasi dan karakterisasi zeolit alam dari berbagai negara. Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia 2010, 6.
- Liu, X.B., Zhang, X.Y., Wang, Y.X., Sui, Y.Y., Zhang, S.L., Herbert, S.J. & Ding, G. 2010. Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China. Plant, Soil and Environment, 56(2): 87–97.
- Nainggolan, G.D., Suwardi & Darmawan 2009. Pola pelepasan Nitrogen dari pupuk tersedia lambat (*slowrelease fertilizer*) urea - zeolit - asam humat. Journal Zeolit Indonesia, 8(2): 89–96.
- Nisiyari, H., Duha, F. A., Waruwu, A. S., Waruwu, L. P., Laoli, A., Giawa, B. B., Lawolo, A. J. & Zebua, H. B. 2025. Analisis perbandingan efektifitas pupuk kimia dan pupuk organik terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman cabai. Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman, 2(1): 246–256.
- Nursanti, I. 2020. Palm oil mill effluent - zeolite mixture improves acid and base cations in acid sulfate soil. Journal of Tropical Soils, 25(1): 21.
- Nursanti, I. & Kemala, N. 2019. Peranan zeolit dalam peningkatan kesuburan tanah pasca penambangan. Jurnal Media Pertanian, 4(2): 88.
- Purnomo, C.W., Lenora, B., Budhijanto, W. & Hinode, H. 2017. Sorption and ion exchange behaviour of natural zeolite packing. Makara Journal of Technology, 21(1): 33.
- Satriani, A., Belviso, C., Lovelli, S., di Prima, S., Coppola, A., Hassan, S.B.M., Rivelli, A.R. & Comegna, A. 2024. Impact of a synthetic zeolite mixed with soils of different pedological characteristics on soil physical quality indices. Geoderma, 451(April): 117084.
- Singh, V.K., Gill, A.A.S., Singh, O. & Singh, S. 2025. Encyclopedia of Green Materials. Springer Nature Link.
- Soekamto, M.H. & Fahrizal, A. 2019. Upaya peningkatan kesuburan tanah pada lahan kering di Kelurahan Aimas Distrik Aimas Kabupaten Sorong. ABDIMAS: Papua Journal of Community Service, 1(2): 14–23.
- Vinayak, K.P. & Ad, L. 2023. An incubation study on the effect of zeolite application on soil chemical properties, nitrogen and phosphorus release. 12(12): 581–583.