



Karakterisasi Zeolit Alam Ende Teraktivasi NaOH sebagai Carrier Pupuk Lepas Lambat dan Pengaruhnya terhadap Produktivitas Tanaman Kangkung Darat

Sanherip Laalobang¹, Gregorio Antonny Bani¹, Arnoldus Laka Atson¹, Mario Donald Bani^{4*}

¹Fakultas Sains dan Pertanian, Universitas Aryasatya Deo Muri, Indonesia

²Program Studi Bioteknologi, Institut Bio Scientia Internasional Indonesia

*Korespondensi: mario.bani@i3l.ac.id

Info Artikel

Diterima 22
Oktober 2025

Disetujui 11
November 2025

Dipublikasikan 30
November 2025

Keywords:
Zeolit Ende;
Aktivasi Naoh;
Pupuk Lepas
Lambat;
Produktivitas
Kangkung Darat;
Karakterisasi
Material

©2025 The
Author(s): This is
an open-access
article distributed
under the terms of
the Creative
Commons
Attribution
ShareAlike (CC BY-
SA 4.0)



Abstrak

Peningkatan kebutuhan pokok masyarakat mendorong konversi lahan pertanian menjadi kawasan permukiman, sehingga mengurangi area produksi pangan. Kondisi ini menuntut inovasi teknologi budidaya untuk meningkatkan efisiensi pemupukan dan produktivitas tanaman pada lahan yang semakin terbatas. Penelitian ini bertujuan mengkaji karakteristik zeolit alam Ende yang diaktivasi secara fisika dan kimia menggunakan larutan NaOH pada konsentrasi 1M, 3M, dan 5M sebagai carrier pupuk lepas lambat, serta menganalisis pengaruhnya terhadap produktivitas tanaman kangkung darat. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif model eksperimen dengan analisis MANOVA (Multivariate Analysis of Variance) untuk melihat perbedaan antarperlakuan secara simultan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa media tanam berbasis zeolit teraktivasi memberikan peningkatan pertumbuhan dan produktivitas kangkung darat yang signifikan dibandingkan kontrol tanpa zeolit. Aktivasi menggunakan larutan basa terbukti dapat meningkatkan kapasitas tukar ion zeolit sehingga mampu melepaskan nutrisi secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman. Temuan ini mengindikasikan bahwa modifikasi zeolit alam Ende berpotensi menjadi teknologi pemupukan ramah lingkungan yang efektif untuk sistem budidaya hortikultura, sekaligus mendukung keberlanjutan pertanian di tengah keterbatasan lahan.

Abstract

The increasing demand for basic necessities has accelerated the conversion of agricultural land, which originally served as a food production area, into residential zones, thus reducing the availability of farmland. This situation requires innovative cultivation technologies that can improve fertilization efficiency and crop productivity even when land resources are limited. This study aims to examine the characteristics of natural Ende zeolite that was activated through physical and chemical methods using NaOH solutions at concentrations of 1M, 3M, and 5M as a carrier for slow release fertilizer, and to analyze its effects on the productivity of upland kangkung (*Ipomoea reptans*). The research used a quantitative experimental approach, and data were analyzed with MANOVA (Multivariate Analysis of Variance) to identify differences among treatments. The results show that growing media made from activated zeolite significantly improved the growth and productivity of upland kangkung compared to the control group. The activation process using alkaline solutions increased the ion

exchange capacity of the zeolite and allowed nutrients to be released gradually in accordance with plant needs. These findings indicate that modified natural Ende zeolite has strong potential as an environmentally friendly fertilization technology that supports horticultural cultivation, increases productivity, and promotes sustainable agricultural practices in areas with decreasing farmland.

1. Pendahuluan

Peningkatan jumlah penduduk selalu diiringi dengan peningkatan permintaan kebutuhan sandang, pangan dan papan. Sayangnya, peningkatan kebutuhan pokok ini menimbulkan penurunan lahan pertanian penyedia pangan karena dikonversi menjadi lahan pemukiman penyedia papan (Prihatin, 2016). Untuk meningkatkan ketersediaan pangan, peningkatan intensitas penanaman suatu komoditas pertanian menjadi penting (Riyadh, 2015), tetapi berpengaruh pada menurunnya ketersediaan hara (Azurianti, Wulansari, Athallah, & Prijono, 2022). Untuk menyediakan kebutuhan hara tanaman, pupuk kimia digunakan (Yuniarti, Solihin, & Arief Putri, 2020).

Tingginya penggunaan pupuk kimia mengakibatkan salinitas tanah turut meningkat dan berpengaruh pada menurunnya kapasitas tukar kation (KTK) tanah, serta kualitas tanah secara keseluruhan (Wahyunto & Dariah, 2014). Ketika hal ini terjadi, pupuk kimia yang digunakan akan lebih mudah hilang terbawa *run off* dan/atau menguap karena pemanasan sinar matahari. Masalah yang sama tetap terjadi ketika pupuk organik atau campuran organik-kimia digunakan (Narka, Kusmawati, & Merit, 2017; Rahmadani, Nurrochmad, & Sujono, 2020; Roidah, 2013; Yusmayani, 2019). Semua ini akan tetap berpengaruh pada menurunnya produktivitas tanaman pertanian. Petani sering mengambil pilihan untuk meningkatkan frekuensi pemupukan tanpa mempertimbangkan kapan waktu tanaman memerlukan tambahan unsur-unsur hara (Zainuddin. & Jufri, 2019).

Zeolit alam dapat digunakan sebagai pupuk alternatif dan amelioran yang mampu meningkatkan kadar unsur hara tanpa memberikan pengaruh buruk bagi tanah (Narulita, Widodo, & Afany, 2023). Zeolit merupakan mineral yang ditemukan dalam jumlah besar di Indonesia, termasuk di Kabupaten Ende, Nusa Tenggara Timur (Harahap, Abidin, Utoyo, Djumhana, & Yuniarni, 2015). Kandungan unsur alami di dalam zeolit alam di antaranya adalah kalium (K), kalsium (Ca), dan fosfor (P), sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pupuk. Akan tetapi, zeolit alam tidak mengandung nitrogen (N) yang merupakan salah satu unsur hara penting bagi tanaman (Bani, 2022). Sehingga, untuk memperkaya komponen hara di dalam zeolit alam, maka diperlukan bahan lain yang mengandung nitrogen (Rosadi, 2015). Dalam hal ini, zeolit dapat dicampurkan dengan pupuk kimia yang akan diserap ke dalam struktur kerangkanya (Sudirja, Rosniawaty, Setiawan, & Yuniarto, 2016).

Kemampuan zeolit dalam mengadsorpsi zat lain juga dapat dimanfaatkan untuk menjebak unsur hara, sehingga tidak mudah hilang akibat *run off* (Amin & Djabri, 2017). Tambahan pula, zeolit dapat menjadi adsorber unsur berbahaya dari dalam tanah dan menjaga kestabilan sifat kimia dan fisika tanah, serta kesehatan tanaman (Gaol, Hanum, & Sitanggung, 2014; Hertati & Ifansyah, 2022). Untuk meningkatkan kemampuan sebagai pelepas hara lambat, zeolit alam umumnya hanya diaktivasi dengan satu dari dua cara: fisika atau kimia (Rajiman, Yekti, &

Munambar, 2021). Aktivasi fisika umumnya dilakukan melalui pemanasan untuk mengeluarkan molekul air yang telah mengkristal di dalam pori-pori mineral ini (Kurniasari, Djaeni, & Purbasari, 2011). Aktivasi kimia dilakukan dengan perlakuan asam atau basa untuk membersihkan pengotor dari permukaan zeolit (Zaharah, Aprilianti, & Wahyuni, 2023).

Penelitian ini akan dilakukan dengan mengombinasikan dua cara aktivasi sekaligus: fisika dan kimia. Aktivasi fisika dilakukan dengan memanaskan zeolit pada suhu 500 °C agar mengeluarkan molekul air yang telah mengkristal dari dalam kerangka zeolit. Lalu dilanjutkan dengan aktivasi kimia menggunakan larutan basa natrium hidroksida (NaOH). Penggunaan NaOH dapat membersihkan permukaan dan interior kerangka zeolit sekaligus (Al Muttaqii, 2021). Unsur natrium (Na) dari NaOH ini akan menyebabkan desilikalisasi dari dalam kerangka zeolit (Soltanian, Lee, & Lam, 2020). Ketika natrium menarik keluar silika, ruang kosong yang ditinggalkan silika akan digantikan oleh aluminium yang juga berada di dalam kerangka zeolit. Proses ini akan menjadikan permukaan zeolit bermuatan negatif, sehingga mampu mengikat kation dari luar (Sufriadin, Fuad Bawazir, Sri Widodo, 2022). Selain itu, dalam penelitian ini zeolit alam teraktivasi akan dicampurkan dengan pupuk NPK, agar muatan negatif pada permukaan zeolit diseimbangkan oleh unsur N, P, dan K dari pupuk. Dengan demikian, produk akhir setelah perlakuan adalah zeolit alam Ende teraktivasi dengan kandungan NPK yang dapat dimanfaatkan sebagai pelepas hara lambat dan amelioran.

Kesenjangan utama dalam pemanfaatan zeolit alam sebagai carrier pupuk lepas lambat terletak pada keterbatasan penelitian yang secara spesifik mengkaji karakteristik zeolit Ende setelah proses aktivasi NaOH dan hubungannya dengan peningkatan produktivitas tanaman hortikultura, khususnya kangkung darat. Masalah muncul karena sebagian besar petani masih menggunakan pupuk konvensional yang bersifat cepat larut, sehingga efisiensi penyerapan unsur hara rendah dan berdampak pada tingginya frekuensi pemupukan, biaya produksi, serta potensi pencemaran lingkungan. Dampaknya, produktivitas tanaman tidak optimal dan keberlanjutan sistem budidaya menjadi terancam. Tantangan yang dihadapi meliputi kemampuan menentukan kondisi aktivasi zeolit yang tepat, memastikan stabilitas pelepasan hara secara bertahap, serta menguji konsistensi performa zeolit teraktivasi pada media tanam yang berbeda. Penelitian ini menjadi menarik karena menawarkan pendekatan ilmiah untuk memaksimalkan sumber daya alam lokal Ende melalui rekayasa material sederhana namun bernilai tinggi, sekaligus memberikan solusi agronomis yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berpotensi mendukung kemandirian pupuk nasional.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif model eksperimen dengan analisis MANOVA (*Multivariate Analysis of Variance*). Mineral zeolit digiling hingga lolos ayakan ukuran ± 40 mesh. Zeolit akan dikarakterisasi meliputi kristalinitas dengan Fourier Transform Infrared Spectroscopy dan X-ray diffractogram, analisis luas permukaan dengan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET), jejari dan volume pori dengan metode Barret-Joyner-Halenda (BJH). Serbuk zeolit diaktivasi secara fisika melalui proses pemanasan dalam tanur pada suhu 500 °C selama 3 jam (Bani, 2022). Setelah aktivasi fisika, zeolit direndam dalam larutan NaOH dengan variasi molar (1 M, 3 M, dan 5 M) (Soltanian et al., 2020). Zeolit yang telah diaktivasi ini dikarakterisasi lagi dengan menggunakan FTIR, XRD, BET dan

BJH. Zeolit alam Ende sebelum dan sesudah aktivasi akan dicampurkan dengan pupuk NPK dengan rasio 1:1 (b/b) di dalam air bebas ion selama 24 jam. Setelah itu, pengeringan akan dilakukan di dalam oven pada suhu 100 °C. Zeolit yang sudah dicampurkan selanjutnya disebut sebagai Zeolit-NPK dan kembali dikarakterisasi dengan menggunakan Scanning Elektron Micrograph (SEM) untuk mengamati keberadaan pupuk di dalam mineral zeolit alam Ende yang telah diaktivasi.

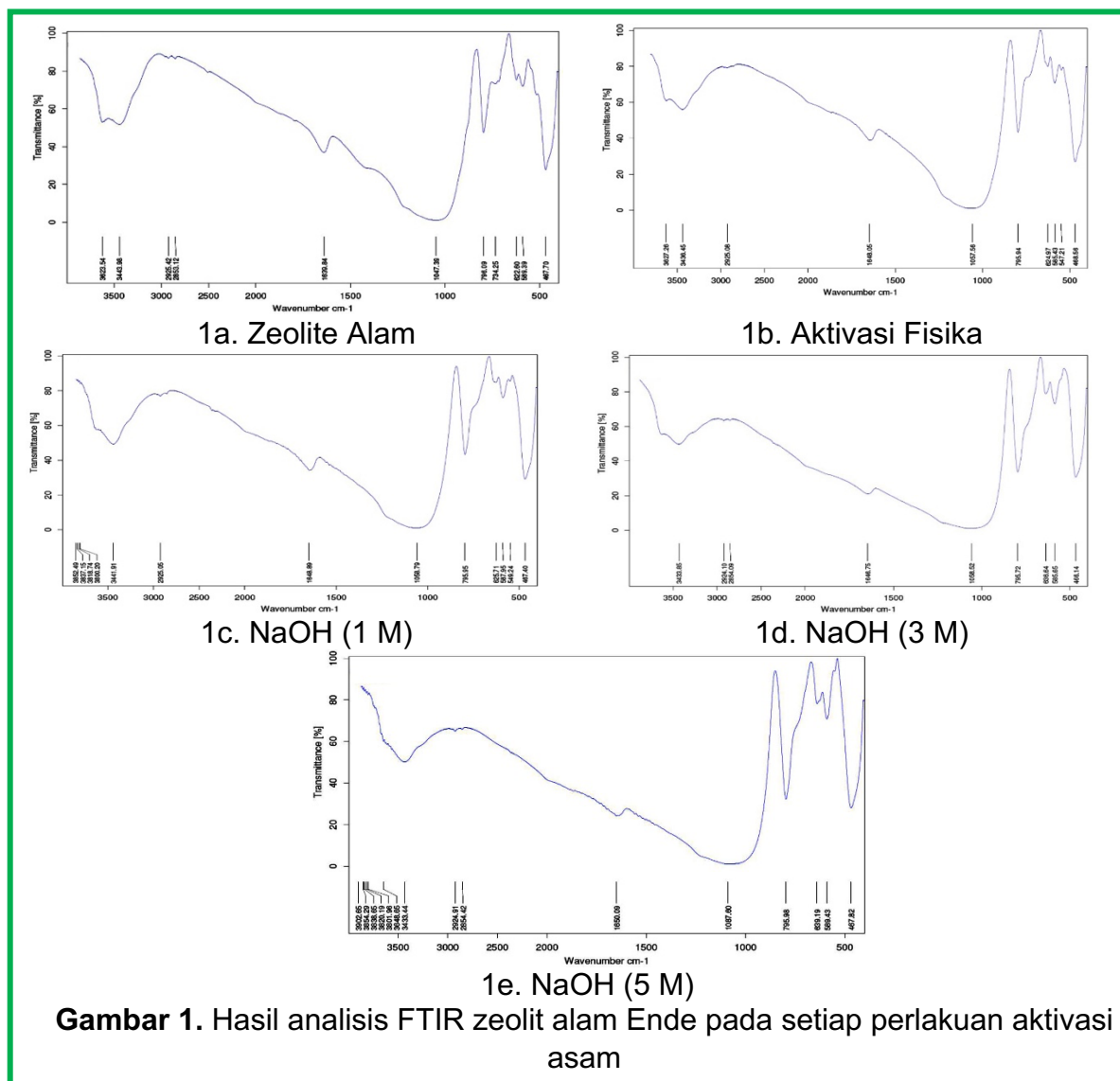
Tanah yang sudah disiapkan dimasukkan ke dalam *polybag* ukuran 8 x 9, setelah dikarakterisasi meliputi pH, kelembapan, rasio C/N, kadar nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Selanjutnya, tanah akan diberi perlakuan Zeolit-NPK dengan komposisi 0% (kontrol) dan 50% untuk setiap variasi perlakuan aktivasi (1M, 3M, dan 5M). Masing-masing perlakuan komposisi disiapkan sebanyak 30 buah *polybag*. Tanah yang sudah diberi perlakuan Zeolit-NPK lalu kembali dikarakterisasi untuk mengetahui perubahan dari pencampuran dengan zeolit-NPK. Setelah karakterisasi tanah, maka dilakukan uji tanam dengan menggunakan bibit tanaman kangkung darat yang diberi perlakuan 5 biji per *polybag*. Tanah di dalam *polybag* kembali dikarakterisasi sebanyak 10 kali per 3 hari sejak dilakukan penanaman. Pengamatan dilakukan terhadap pertumbuhan kangkung meliputi tinggi, jumlah daun, lebar daun, panjang daun dan warna daun.

Data pengukuran kadar N, P, dan K ditentukan dengan menggunakan analisis spektrofotometer UV-Vis, sedangkan data laju pertumbuhan tanaman juga diukur dengan menggunakan meteran. Data pengamatan dari hari pertama hingga hari ke-3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, dan hari ke-30 akan dimasukkan pada model persamaan regresi linear ($Y = aX + b$) untuk mendapatkan konstanta laju pelepasan hara dan laju pertumbuhan tanaman kangkung darat. Data pelepasan hara dan laju pertumbuhan tanaman dari setiap variasi konsentrasi NaOH diuji lagi dengan analisis MANOVA (*Multivariate Analysis of Variance*) dengan tingkat kepercayaan 99% ($\alpha = 0,01$).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

sAktivasi zeolit alam Ende untuk dijadikan sebagai pelepas hara lambat dilakukan secara fisika dan kimia. Aktivasi fisika dilakukan terlebih dahulu dengan cara memanaskan zeolit alam di dalam tannur pada suhu 500 °C. Selanjutnya zeolit didinginkan pada suhu ruangan dan diaktivasi dengan mencampurkan zeolit dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) (variasi konsentrasi 1 M, 3 M, dan 5 M). Perlakuan dengan NaOH ini dilakukan agar pengotor yang berupa logam alkali dan alkali tanah yang menempel pada permukaan zeolit dapat ikut tercuci oleh larutan NaOH (Cruz, Melo, & Pergher, 2020). Proses ini juga akan menarik keluar sebagian atom silika (Si) dari kerangka bagian dalam zeolit dan membentuk struktur baru di kerangka tengahnya (Soltanian et al., 2020). Akibatnya, permukaan zeolit yang sudah kehilangan logam alkali dan alkali tanah pun menjadi bermuatan negatif (Ginting et al., 2021) dan mampu mengikat kation hara dari pupuk NPK. Untuk memastikan proses aktivasi fisika dan kimia berjalan dengan baik, maka dilakukan uji analisis laboratorium tentang kristalinitas, rasio Si/Al, luas permukaan, dan volume pori zeolit. Analisis kristalinitas dilakukan dengan menggunakan FTIR sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil analisis FTIR zeolit alam Ende pada setiap perlakuan aktivasi asam

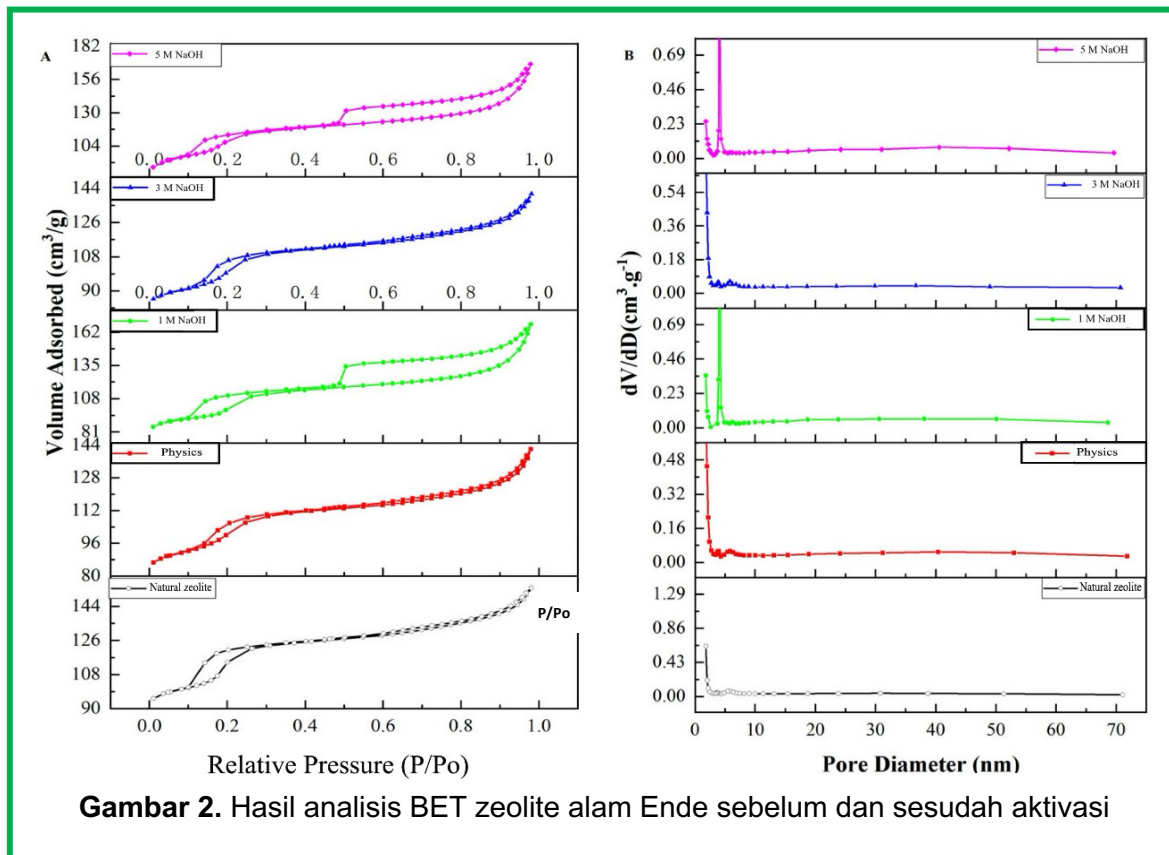
Gambar 1 menunjukkan terjadinya perubahan serapan pada nilai 3143.64. Sementara itu, nilai 3528.25 merupakan serapan dari vibrasi ulur gugus hidroksil (O-H); nilai 1068.52 merupakan serapan dari vibrasi gugus silanol (Si-O); nilai 579.43 dan 629.19 merupakan serapan vibrasi tekuk tetrahedral (T-O₄). Pemberian perlakuan aktivasi fisika dan perlakuan peningkatan konsentrasi larutan NaOH menunjukkan terjadinya pergeseran pita serapan gugus hidroksil (O-H) dan tetrahedral (T-O₄). Selain itu, terjadi juga pergeseran dan kenaikan intensitas vibrasi gugus silanol (Si-O) (An Naafi, Tjahjanto, & Prananto, 2023). Pergeseran nilai serapan dan kenaikan intensitas juga menjadi indikasi adanya peningkatan rasio Si/Al di dalam kerangka zeolit (Mamytbekov, Anatol, & Milts, 2024). Hal tersebut juga ditandai dengan perubahan ikatan tetrahedral (T-O₄) pada struktur alumina (Al₂O₃) dan silika (SiO₂) (Lestariningsih & Kurniawan, 2023) di dalam kerangka zeolit. Perubahan ikatan kimia silanol (Si-O) yang menjadi lebih pendek daripada ikatan kimia alumina (Al-O) mengindikasikan bahwa telah terjadi peningkatan luas permukaan dan ukuran saluran pori-pori zeolit (Li, Gao, Yan, & Yu, 2022). Peningkatan ukuran saluran pori-pori tersebut akan menjadikan semakin banyaknya unsur hara yang dapat terjerap di dalam kerangka zeolit alam Ende. Selain itu, saluran pori-pori zeolit juga dapat berperan sebagai bahan ameliorant yang

menjerap logam berat di dalam kristal zeolit (Abdelwahab & Thabet, 2023). Persentase komposisi Si dan Al di dalam kerangka zeolit pada setiap perlakuan aktivasi fisika dan kimia disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi rasio Si/Al dan keasaman total zeolit alam Ende sebelum dan sesudah aktivasi

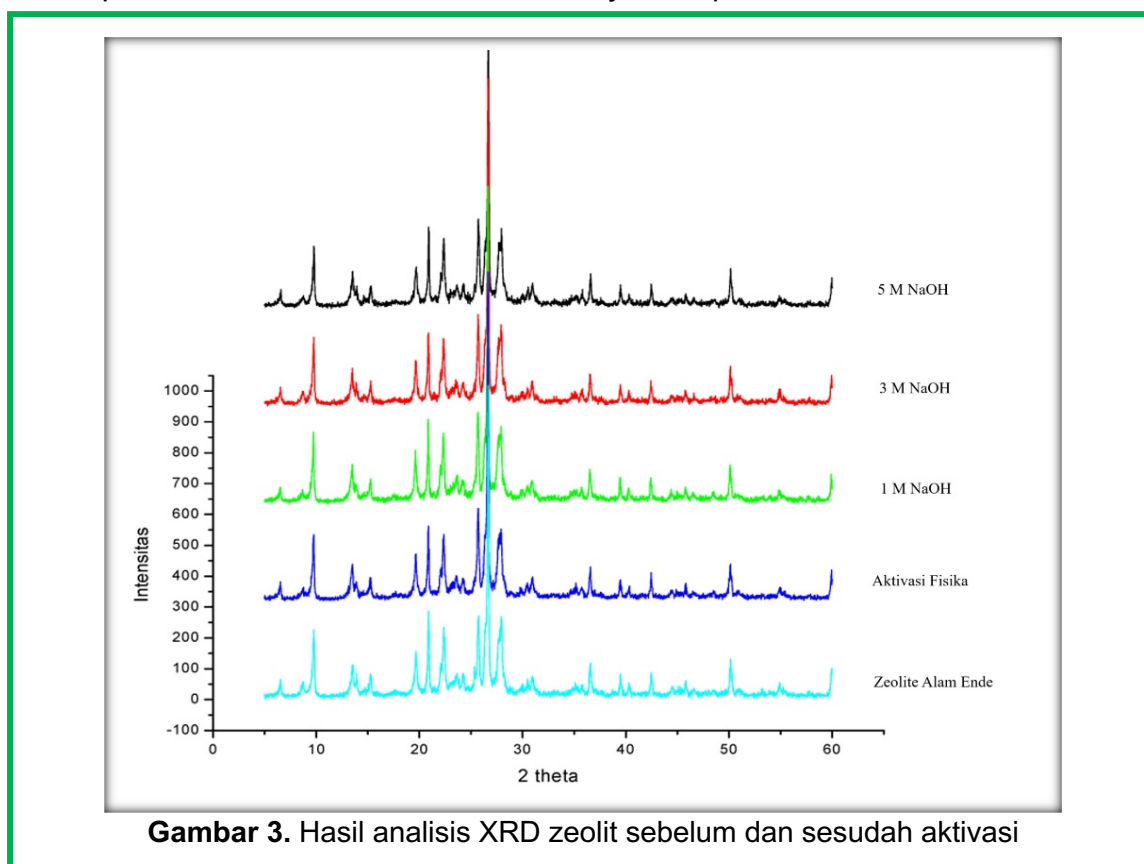
Zeolit	Rasio Si/Al	KTK
Tanpa perlakuan	2.46	119.65
Aktivasi fisika	4.57	137.44
1 M NaOH	12.66	236.77
3 M NaOH	24.34	267.45
5 M NaOH	34.24	337.73

Peningkatan rasio Si/Al juga meningkatkan luas permukaan dan ukuran saluran pori-pori zeolit (Tanwongwan et al., 2023), dan kemudian meningkatkan jumlah unsur hara terjerap di dalamnya yang berasal dari pupuk NPK (Legese, M. Tadesse, Kibret, & Wogi, 2024). Selain itu, terjadi pula peningkatan nilai kapasitas tukar kation (KTK) pada permukaan zeolit alam Ende. Hal ini menandakan bahwa pencampuran zeolit dengan pupuk NPK berlangsung baik, dan diharapkan dapat secara perlahan dilepaskan kembali ke tanah ketika dibutuhkan oleh akar tanaman. Hasil analisis luas permukaan dan volume pori-pori zeolit alam Ende ditunjukkan pada Gambar 2.



Besar luas permukaan memiliki korelasi dengan luas permukaan aktif yang dapat mengikat kation hara dari pupuk NPK (Jarosz, Szerement, Gondek, & Mierzwa-Hersztek, 2022). Peningkatan luas permukaan akan berbanding lurus

dengan peningkatan nilai KTK zeolit (Senila & Cadar, 2024). Hasil analisis BET menunjukkan bahwa proses aktivasi secara fisika dan kimia mampu meningkatkan luas permukaan zeolit alam Ende dari $43.17 \text{ m}^3/\text{g}$ menjadi $54.11 \text{ m}^3/\text{g}$ (aktivasi fisika), $74.32 \text{ m}^3/\text{g}$ (1 M NaOH), $95.22 \text{ m}^3/\text{g}$ (3 M NaOH), $124.54 \text{ m}^3/\text{g}$ (5 M NaOH). Selain itu, jejari rata-rata juga berubah dari 11.96 \AA menjadi 20.21 \AA (aktivasi fisika), 32.21 \AA (1 M NaOH), 44.57 \AA (3 M NaOH), 50.51 \AA (5 M NaOH). Volume pori berubah dari $22 \text{ cm}^3/\text{gram}$ menjadi $32 \text{ cm}^3/\text{gram}$ (aktivasi fisika), $45 \text{ cm}^3/\text{gram}$ (1 M NaOH), $52 \text{ cm}^3/\text{gram}$ (3 M NaOH), $72 \text{ cm}^3/\text{gram}$ (5 M NaOH). Peningkatan luas permukaan terjadi karena sebagian bahan pengotor yang semula menutup pori-pori zeolit telah larut dalam larutan pengaktif. Hal ini menyebabkan pori-pori zeolit menjadi terbuka dan dengan sendirinya kemampuan zeolit untuk menyerap kation unsur hara menjadi semakin baik (Vasconcelos et al., 2023). Pengaruh aktivasi terhadap kristalinitas zeolit alam Ende ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil analisis XRD zeolit sebelum dan sesudah aktivasi

Hasil uji kristalinitas dengan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) sebelum dan sesudah aktivasi fisika dan kimia, menunjukkan terjadi perubahan pola difraksi zeolit alam Ende. Puncak-puncak spesifik mordenit pada puncak 2θ $19,60^\circ$; $20,10^\circ$; $25,65^\circ$; $26,15^\circ$; $27,68^\circ$; $27,88^\circ$; $35,61^\circ$, dengan intensitas tertinggi mordenit terdapat pada 2θ $25,65^\circ$. Difraktogram zeolit alam yang diaktivasi secara fisika menunjukkan keberadaan puncak baru pada 2θ $25,25^\circ$; $37,82^\circ$; dan $48,10^\circ$. Telihat juga bahwa puncak 2θ yang ada belum terlihat begitu jelas karena pada dasarnya aktivasi fisika hanya bertujuan untuk mengeluarkan molekul air yang telah mengkristal di dalam kerangka zeolit. Puncak yang sama semakin terlihat setelah dilakukan aktivasi kimia (Van Vreeswijk & Weckhuysen, 2022). Hal tersebut terjadi karena perlakuan aktivasi kimia mampu membersihkan pengotor di dalam kerangka zeolit, sehingga meningkatkan kristalinitasnya (Azhari, Mardiana, & Kadja, 2023). Oleh karena itu,

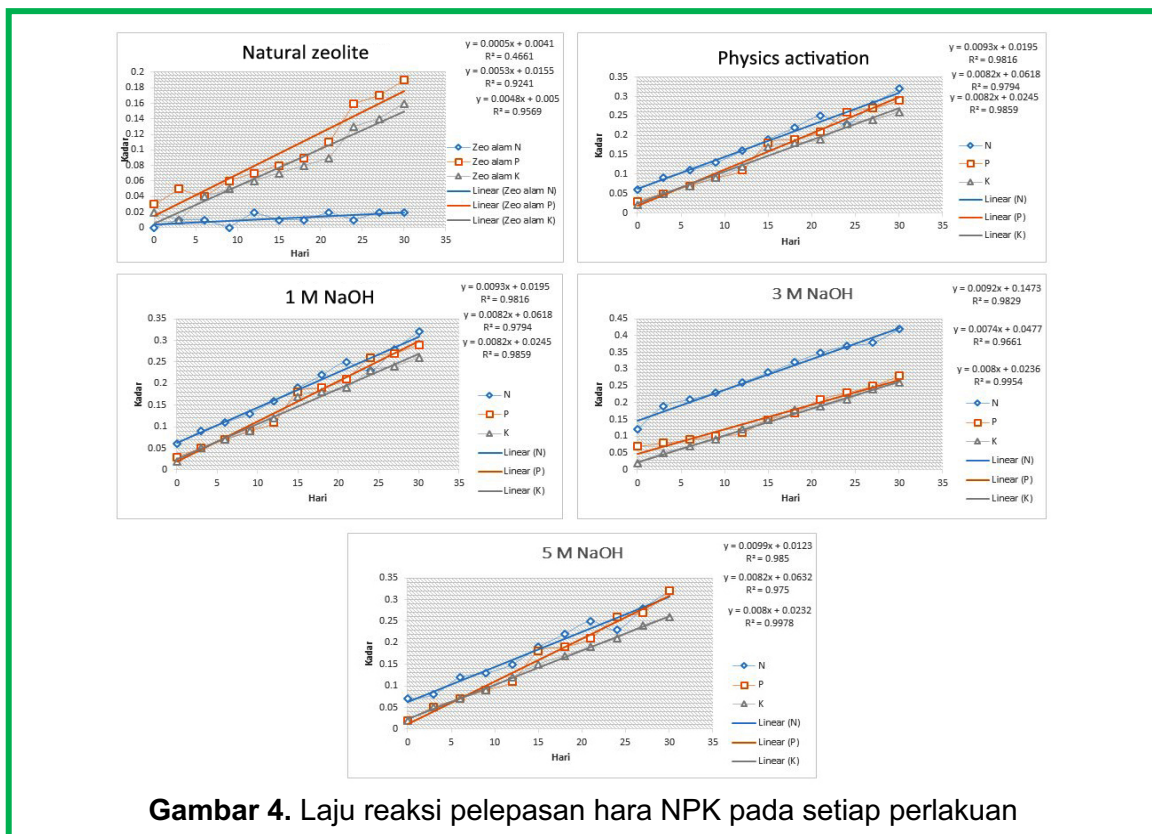
aktivasi fisika dan kimia mampu meningkatkan volume rongga zeolit tanpa merusak struktur kristalnya, sehingga sifat dasarnya sebagai pelepas hara lambat dapat tetap dipertahankan setelah dicampurkan dengan pupuk NPK.

Pencampuran zeolit alam aktif Ende dan pupuk NPK dilakukan di dalam wadah terbuka dengan rasio perbandingan 1:1. Hasil analisis spektrofotometer tentang kadar hara NPK yang dikandung di dalam zeolit disajikan pada Tabel 2. Diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi NaOH maka akan semakin banyak pula jumlah hara yang terjerap di dalam rongga zeolit alam Ende. Hal ini merupakan konsekuensi logis bahwa semakin tinggi kadar NaOH maka akan semakin banyak pula kotoran yang terkandung di dalam kristal zeolit alam Ende yang akan ikut larut di dalamnya (Neolaka et al., 2022). Diketahui pula bahwa peningkatan kadar unsur hara P dan K yang berada di dalam zeolit alam Ende tidak terlalu berbeda jauh. Hal ini disebabkan karena pada dasarnya di dalam kerangka penyusun zeolit alam sendiri sudah terdapat kandungan P dan K sebagai pengotor (Senila & Cadar, 2024). Jumlah pengotor yang dikeluarkan akan diseimbangkan kembali melalui peresapan unsur hara ke dalam kerangka zeolit alam Ende (Mondal et al., 2021).

Tabel 2. Kandungan kadar NPK hasil pencampuran

Zeolit	N	P	K
Tanpa Perlakuan	0.46	119.65	124.65
Aktivasi fisika	56.57	124.14	135.67
1 M NaOH	86.66	235.67	223.37
3 M NaOH	114.34	267.45	246.45
5 M NaOH	134.24	337.73	245.73

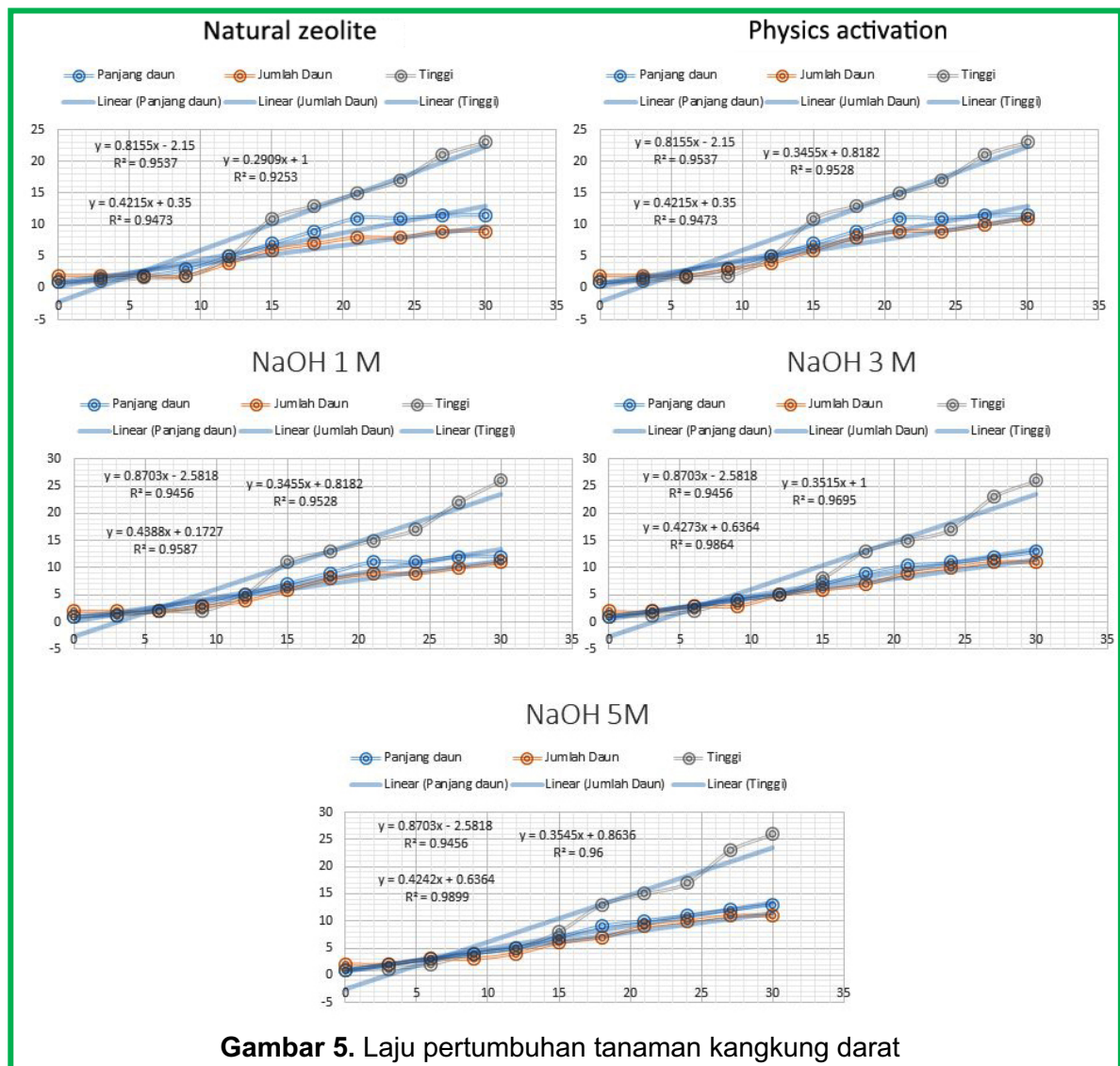
Hasil pelepasan hara N, P, K pada setiap perlakuan aktivasi disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Laju reaksi pelepasan hara NPK pada setiap perlakuan

Pencampuran zeolit tanpa perlakuan diketahui bahwa nilai koefisien regresi paling rendah pada pelepasan unsur hara nitrogen (N), dibandingkan pada pelepasan hara fosfor (P), dan kalium (K). Hal ini disebabkan karena zeolit alam merupakan batuan yang tidak memiliki kandungan hara nitrogen di dalamnya. Pengotor yang berada permukaan zeolit menutupi pori pada permukaannya, sehingga menghambat unsur hara N dari pupuk NPK untuk dapat masuk dan terjerap di dalamnya. Pada perlakuan aktivasi fisika dan kimia dengan menggunakan NaOH diketahui bahwa kadar pelepasan hara NPK hampir sama besar. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit alam Ende dapat berfungsi dengan baik sebagai pelepas hara lambat karena hanya akan melepaskan hara apabila dibutuhkan oleh akar tanaman.

Data laju pertumbuhan uji coba tanam pada tanaman kangkung darat disajikan pada Gambar 5. Data laju pelepasan hara dan laju pertumbuhan tanaman kemudian dianalisis lagi dengan menggunakan analisis statistik muli varian (MANOVA).



Gambar 5. Laju pertumbuhan tanaman kangkung darat

Hasil analisis multi varians dari setiap variabel yang diukur disajikan pada Tabel 3. Analisis menggunakan tingkat kesalahan 5%, yaitu $\alpha = 0.05$.

Tabel 3. Analisis Multivarian dengan menggunakan SPSS

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	N	.576 ^a	29	.020	3.488	.001
	P	.377 ^b	29	.013	17.925	.000
	K	.305 ^c	29	.011	16.216	.000
	Zeolit	70.083 ^d	29	2.417	1.514	.008
	Hari	4941.000 ^e	29	170.379	473.276	.000
Intercept	N	1.320	1	1.320	231.752	.000
	P	1.051	1	1.051	1449.002	.000
	K	.844	1	.844	1301.218	.000
	Zeolit	147.693	1	147.693	92.501	.000
	Hari	12200.948	1	12200.948	33891.522	.000
Y1	N	.023	7	.003	.565	.777
	P	.001	7	.000	.194	.984
	K	.001	7	.000	.208	.980
	Zeolit	21.167	7	3.024	1.894	.003
	Hari	10.500	7	1.500	4.167	.004
Y2	N	.194	6	.032	5.666	.001
	P	.022	6	.004	4.981	.002
	K	.021	6	.003	5.345	.001
	Zeolit	22.616	6	3.769	2.361	.001
	Hari	1.800	6	.300	.833	.556
Y3	N	.021	5	.004	.728	.609
	P	.004	5	.001	1.015	.430
	K	.002	5	.000	.591	.707
	Zeolit	18.000	5	3.600	2.255	.030
	Hari	25.800	5	5.160	14.333	.000
Error	N	.142	25	.006		
	P	.018	25	.001		
	K	.016	25	.001		
	Zeolit	39.917	25	1.597		
	Hari	9.000	25	.360		
Total	N	2.325	55			
	P	1.576	55			
	K	1.264	55			
	Zeolit	330.000	55			
	Hari	17325.000	55			
Corrected Total	N	.718	54			
	P	.395	54			
	K	.321	54			

Zeolit	110.000	54
Hari	4950.000	54

a. R Squared = .802 (Adjusted R Squared = .572)

b. R Squared = .954 (Adjusted R Squared = .901)

c. R Squared = .950 (Adjusted R Squared = .891)

d. R Squared = .637 (Adjusted R Squared = .216)

e. R Squared = .998 (Adjusted R Squared = .996)

Berdasarkan hasil analisis, diketahui bahwa setiap variabel berpengaruh signifikan terhadap laju pertumbuhan tanaman kangkung darat. Hasil uji lanjutan juga menunjukkan bahwa pada variabel panjang daun yang paling berpengaruh adalah perlakuan aktivasi zeolit dan jumlah hari penanaman. Hal tersebut menunjukkan perlakuan zeolit berbeda nyata satu dengan yang lainnya. Sama halnya dengan hari penanaman, di mana semakin lama maka daun tanaman akan semakin panjang hingga mencapai batas maksimum. Pada variabel jumlah daun, diketahui bahwa setiap variabel berpengaruh signifikan, kecuali variabel lama waktu penanaman. Selanjutnya, variabel tinggi tanaman berbeda nyata dengan variabel panjang daun pada perlakuan aktivasi zeolit. Tinggi tanaman juga berkorelasi positif dengan jumlah hari. Hasil yang serupa juga teramati pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Sazali, Harun, & Sazali, 2024). Oleh karena itu, disimpulkan bahwa zeolit alam Ende dapat digunakan sebagai pelepas hara lambat dalam meningkatkan produktivitas tanaman dan menjaga kualitas tanah pada sebuah lahan pertanian.

3.2 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivasi zeolit alam Ende melalui perlakuan fisika dan kimia menghasilkan perubahan struktur yang signifikan, terutama pada gugus fungsional yang terdeteksi melalui analisis FTIR. Pergeseran pita serapan pada gugus hidrosil, silanol, dan tetrahedral menegaskan bahwa proses pemanasan dan reaksi dengan larutan NaOH telah memodifikasi kerangka zeolit. Perubahan ini menandai terjadinya peningkatan rasio Si Al dan restrukturisasi ikatan T O4 yang berdampak langsung pada sifat fungsional zeolit sebagai pembawa hara. Peningkatan rasio Si Al setelah aktivasi kimia menunjukkan bahwa sebagian besar kation pengotor telah berhasil dikeluarkan dari kerangka zeolit. Rasio Si Al yang semakin besar dari perlakuan 1 M hingga 5 M menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi basa, semakin intens proses dekationisasi yang terjadi. Peningkatan nilai Si Al ini selaras dengan kenaikan kapasitas tukar kation yang sangat penting untuk kinerja zeolit sebagai pupuk lepas lambat yang mampu menyerap lebih banyak ion hara NPK.

Analisis BET mengonfirmasi bahwa aktivasi menghasilkan peningkatan luas permukaan dan volume pori yang sangat signifikan. Peningkatan dari $43.17 \text{ m}^3 \text{ g}$ menjadi $124.54 \text{ m}^3 \text{ g}$ (pada 5 M NaOH) menunjukkan bahwa larutan pengaktif mampu membuka pori-pori yang sebelumnya tersumbat oleh logam alkali dan pengotor lainnya. Kondisi ini memperbesar ruang jerapan yang memungkinkan lebih banyak nutrisi tersimpan di dalam saluran zeolit, sehingga menjadi mekanisme kunci pelepasan hara secara bertahap. Hasil XRD memperlihatkan perubahan pola difraksi yang mengindikasikan peningkatan kristalinitas tanpa merusak kerangka dasar zeolit. Penambahan puncak baru pada perlakuan aktivasi fisika dan

peningkatan intensitas setelah aktivasi kimia menunjukkan bahwa kedua proses tersebut saling melengkapi dalam meningkatkan kemurnian dan keteraturan struktur mineral. Struktur kristalin yang stabil penting untuk memastikan bahwa zeolit tetap mampu memegang hara sebelum melepaskannya secara perlahan ke lingkungan tanah.

Kandungan NPK yang terjerap di dalam zeolit mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Zeolit yang diaktivasi dengan 5 M menunjukkan kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium paling tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin banyak pengotor yang dikeluarkan, semakin besar kemampuan zeolit dalam menyerap unsur hara dari pupuk NPK, sehingga memperkuat peranannya sebagai media slow release fertilizer. Laju pelepasan unsur hara menunjukkan pola yang konsisten bahwa zeolit yang telah mengalami aktivasi mampu melepaskan NPK secara lebih merata dan stabil. Pada zeolit tanpa perlakuan, pelepasan nitrogen rendah karena pori yang masih tertutup. Sebaliknya, zeolit teraktivasi menunjukkan pelepasan hara yang relatif seimbang, menandakan bahwa struktur pori telah optimal untuk proses difusi nutrisi sesuai kebutuhan tanaman.

Hasil uji tanam kangkung darat memperlihatkan bahwa perlakuan zeolit meningkatkan pertumbuhan tanaman secara signifikan dibandingkan kontrol. Pertumbuhan daun, jumlah daun, dan tinggi tanaman mengalami peningkatan seiring naiknya kualitas zeolit hasil aktivasi. Kondisi ini memperlihatkan peran penting slow release fertilizer dalam menjaga ketersediaan hara sepanjang fase pertumbuhan tanaman, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi oleh akar. Hasil MANOVA menegaskan bahwa semua variabel, termasuk panjang daun, jumlah daun, tinggi tanaman, konsentrasi aktivasi, serta hari pengamatan memberikan pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan kangkung darat. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi zeolit berperan langsung dalam meningkatkan efektivitas pupuk NPK melalui mekanisme pelepasan hara bertahap. Perbedaan antarperlakuan juga mengonfirmasi bahwa konsentrasi NaOH menghasilkan efektivitas yang berbeda dalam menciptakan struktur zeolit yang optimal.

Perlakuan zeolit dengan konsentrasi 3 M dan 5 M terbukti memberikan pengaruh paling baik terhadap seluruh parameter pertumbuhan. Hal ini sesuai dengan hasil analisis laboratorium yang menunjukkan bahwa kedua konsentrasi tersebut menghasilkan peningkatan rasio Si Al, luas permukaan, volume pori, dan KTK paling tinggi. Konsentrasi yang lebih besar memberi kemampuan jerapan lebih kuat tanpa merusak kestabilan kristal zeolit. Secara keseluruhan, temuan ini membuktikan bahwa aktivasi fisika dan kimia pada zeolit alam Ende dapat meningkatkan kinerjanya sebagai pupuk pelepas hara lambat yang ramah lingkungan. Zeolit tidak hanya memperbaiki efisiensi pupuk, tetapi juga membantu menjaga kualitas tanah melalui mekanisme penjerapan dan pelepasan hara yang terkendali. Dengan demikian, teknologi berbasis zeolit teraktivasi dapat menjadi alternatif strategis dalam meningkatkan produktivitas tanaman hortikultura sekaligus mendukung keberlanjutan pertanian di lahan terbatas.

4. Kesimpulan

Aktivasi zeolit alam Ende dengan menggunakan larutan NaOH terbukti mampu meningkatkan karakteristik fungsional zeolit sebagai media pembawa pupuk pelepas lambat. Proses aktivasi tersebut menghasilkan perubahan struktur yang

ditandai oleh peningkatan luas permukaan internal, peningkatan kemampuan tukar kation atau KTK, serta perubahan rasio silika terhadap alumina atau Si Al yang berdampak langsung pada efisiensi penyerapan dan pelepasan unsur hara. Peningkatan luas permukaan memungkinkan lebih banyak ruang aktif untuk mengikat molekul nutrisi, sementara nilai KTK yang lebih tinggi meningkatkan kapasitas zeolit dalam menyerap dan mempertukarkan ion penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Dengan demikian, nutrisi dapat dilepaskan secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman, sehingga mengurangi kehilangan unsur hara akibat pencucian dan meningkatkan efisiensi pemupukan. Penggunaan zeolit yang telah diaktivasi sebagai pembawa pupuk NPK memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan pertumbuhan dan produktivitas kangkung darat. Tanaman yang ditanam pada media berbasis zeolit teraktivasi menunjukkan pertumbuhan lebih seragam, daun lebih hijau, serta biomassa yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan kontrol. Efek positif ini diperoleh karena zeolit teraktivasi dapat menjaga ketersediaan nutrisi dalam jangka waktu yang lebih panjang, sehingga tanaman memperoleh suplai hara yang stabil selama periode pertumbuhan.

Daftar Pustaka

- Abdelwahab, O., & Thabet, W. M. (2023). Natural zeolites and zeolite composites for heavy metal removal from contaminated water and their applications in aquaculture Systems: A review. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 49(4), 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2023.11.004>
- Al Muttaqii, M. (2021). Pengaruh Variasi Konsentrasi NaOH Pada Zeolit Alam Lampung Terhadap Produk Silika. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 15(2), 393. <https://doi.org/10.26578/jrti.v15i2.6950>
- Amin, M., & Djabri, M. Al. (2017). Pengaruh Pemberian Zeolit dan Pupuk Kandang Sapi terhadap Pertumbuhan dan Hasil Bawang Merah di Kabupaten Brebes. *Prosiding Seminar Nasional*, (1979), 361–371.
- An Naafi, A. N., Tjahjanto, R. T., & Prananto, Y. P. (2023). Effect of NaOH Concentration Toward the Characteristics of Activated Natural Zeolite from Blitar – East Java. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 26(2), 50–56. <https://doi.org/10.14710/jksa.26.2.50-56>
- Azhari, N. J., Mardiana, S., & Kadja, G. T. M. (2023). ZSM-48 zeolites with controllable mesopore formation: synthesis, characterization, and catalytic performance. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16(July), 100533. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100533>
- Azurianti, A., Wulansari, R., Athallah, F. N. F., & Prijono, S. (2022). The Relation Study of Soil Nutrient to Productivity of productive Tea Plants in Pagar Alam Tea Plantation, South Sumatra. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 9(1), 153–161. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2022.009.1.17>
- Bani, G. A. (2022). PEMANFAATAN ZEOLIT ALAM ENDE UNTUK MENINGKATKAN KADAR HARA PUPUK ORGANIK. *Jurnal JAPPRI*, 4(2), 28–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.55542/jappri.v4i2.361>
- Cruz, T. J. T., Melo, M. I. S., & Pergher, S. (2020). Optimization of parameters and methodology for the synthesis of LTA-type zeolite using light coal ash. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(20), 1–11. <https://doi.org/10.3390/app10207332>

- Gaol, S. K. L., Hanum, H., & Sitanggang, G. (2014). Pemberian zeolit dan pupuk kalium untuk meningkatkan ketersediaan hara K dan pertumbuhan kedelai di Entisol. *Jurnal Online Agroteknologi*, 2(3), 1151–1159.
- Ginting, A. B., Siti, A., Noviarly, Yanlinastuti, Nugroho, A., & Boybul. (2021). Natural zeolite as a replacement for resin in the cation exchange process of cesium on post-irradiated nuclear fuel. *Nukleonika*, 66(1), 11–19. <https://doi.org/10.2478/nuka-2021-0002>
- Harahap, B. H., Abidin, H. Z., Utoyo, H., Djumhana, D., & Yuniarni, R. (2015). Prospect of Mineral Deposits in the Central Flores Island, Eastern Indonesia. *Prospek Cebakan Mineral Di Pulau Flores Bagian Tengah, Indonesia Timur. Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 16(1), 1–13.
- Hertati, L., & Ifansyah, H. (2022). Pengaruh Pemberian Zeolit Alam Terhadap Sifat Kimia Tanah Podsolik. *Acta Solum*, 1(November), 21–27.
- Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). The use of zeolites as an addition to fertilisers – A review. *CATENA*, 213, 106125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106125>
- Kurniasari, L., Djaeni, M., & Purbasari, A. (2011). Aktivasi Zeolit Alam Sebagai Adsorben Pada Alat Pengering Bersuhu Rendah. *Reaktor*, 13(3), 178. <https://doi.org/10.14710/reaktor.13.3.178-184>
- Legese, W., M. Tadesse, A., Kibret, K., & Wogi, L. (2024). Effects of natural and modified zeolite based composite fertilizers on slow release and nutrient use efficiency. *Heliyon*, 10(3), e25524. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25524>
- Lestariningsih, D., & Kurniawan, T. (2023). Transformation of Natural Zeolites by the Fusion-Hydrothermal Method for Ammonium Adsorption. *World Chemical Engineering Journal*, 7(1), 1–5.
- Li, J., Gao, M., Yan, W., & Yu, J. (2022). Regulation of the Si/Al ratios and Al distributions of zeolites and their impact on properties. *Chemical Science*, 14(8), 1935–1959. <https://doi.org/10.1039/d2sc06010h>
- Mamytbekov, G. K., Anatol, D., & Milts, O. S. (2024). *Polymer – Zeolite Composites : Synthesis , Characterization and Application*.
- Mondal, M., Biswas, B., Garai, S., Sarkar, S., Banerjee, H., Brahmachari, K., ... Hossain, A. (2021). Zeolites Enhance Soil Health, Crop Productivity and Environmental Safety. *Agronomy*, 11(448), 1–29.
- Narka, I. W., Kusmawati, T., & Merit, I. N. (2017). Penerapan kombinasi pupuk organik dan pupuk kimia untuk memperbaiki kualitas tanah sawah di subak tibubiyu kecamatan kerambitan kabupaten tabanan. *Buletin Udayana Mengabdikan*, 16(3), 238–243.
- Narulita, A. F., Widodo, R. A., & Afany, M. R. (2023). Effects of Bokashi Fertilizer and Zeolite as Soil Conditioners for the Availability of Nitrogen of Regosol Soil. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 10(2), 245–253. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.010.2.08>
- Neolaka, Y. A. B., Lawa, Y., Naat, J., Riwu, A. A. P., Mango, A. W., Darmokoesoemo, H., ... Kusuma, H. S. (2022). Efficiency of activated natural zeolite-based

- magnetic composite (ANZ-Fe₃O₄) as a novel adsorbent for removal of Cr(VI) from wastewater. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 2896–2909. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.153>
- Prihatin, R. B. (2016). Alih Fungsi Lahan Di Perkotaan (Studi Kasus Di Kota Bandung Dan Yogyakarta). *Jurnal Aspirasi*, 6(2), 105–118. <https://doi.org/10.22212/aspirasi.v6i2.507>
- Rahmadani, S., Nurrochmad, F., & Sujono, J. (2020). Analisis Sistem Pemberian Air Terhadap Tanah Sawah Berbahan Organik. *Jurnal Pendidikan Teknik Bangunan Dan Sipil*, 6(2), 66–75.
- Rajiman, R., Yekti, A., & Munambar, S. (2021). the Effect of Zeolite Dose on the Characteristics of Soil and Red Chili Yields in Sub-Optimal Lands of Coastal. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 21(2), 99–107. <https://doi.org/10.25181/jppt.v21i2.2009>
- Riyadh, M. I. (2015). Analysis of Farmers Term of Trade of Crops Commodities in North Sumatra. *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*, 6(1), 17–32.
- Roidah, I. S. (2013). *Manfaat Penggunaan Pupuk Organik Untuk Kesuburan Tanah*. 1(1).
- Rosadi, A. H. Y. (2015). Kebijakan Pemupukan Berimbang untuk Meningkatkan Ketersediaan Pangan Nasional. *Pangan*, 24(1), 8.
- Sazali, N., Harun, Z., & Sazali, N. (2024). Effectiveness of Zeolite [LTA] amendment in improving the growth of cherry tomato (*Solanum lycopersicum*) and its physicochemical properties of soil. *Journal of the Australian Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1007/s41779-024-01105-8>
- Senila, M., & Cadar, O. (2024). Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal from polluted environments: Challenges, recent advances, and perspectives. *Heliyon*, 10(3), e25303. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25303>
- Soltanian, S., Lee, C. L., & Lam, S. S. (2020). A review on the role of hierarchical zeolites in the production of transportation fuels through catalytic fast pyrolysis of biomass. *Biofuel Research Journal*, 7(3), 1217–1234. <https://doi.org/10.18331/BRJ2020.7.3.5>
- Sudirja, R., Rosniawaty, S., Setiawan, A., & Yuniyanto, R. I. (2016). Pengaruh Formula Pupuk Urea-Zeolit-Arangaktif terhadap pH, N-total, KTK tanah dan Residu Pb pada Tanah Tercemar Limbah Industri. *SoilREns*, 14(1), 16–22. <https://doi.org/10.24198/soilrens.v14i1.9270>
- Sufriadin, Fuad Bawazir, Sri Widodo, M. H. (2022). Utilization of Solid Waste PT Semen Bosowa as Zeolite for Industrial Waste Water in South Sulawesi Utilization of Solid Waste PT Semen Bosowa as Zeolite for Industrial Waste Water in South Sulawesi. *Jurnal Geomine*, 10(3), 270–279. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1117/1/012048>
- Tanwongwan, W., Chollacoop, N., Faungnawakij, K., Assabumrungrat, S., Nakhanivej, P., & Eiad-ua, A. (2023). Peningkatan rasio Si/Al mengakibatkan ikatan kimia silanol (Si-O) lebih pendek daripada ikatan kimia alumina (Al-O), sehingga akan terjadi peningkatan luas permukaan dan ukuran saluran pori-

- pori zeolit. *Heliyon*, 9(8), e18772. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18772>
- Van Vreeswijk, S. H., & Weckhuysen, B. M. (2022). Emerging analytical methods to characterize zeolite-based materials. *National Science Review*, 9(9), 047. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac047>
- Vasconcelos, A. A., Len, T., de Oliveira, A. de N., Costa, A. A. F. da, Souza, A. R. da S., Costa, C. E. F. da, ... Nascimento, L. A. S. do. (2023). Zeolites: A Theoretical and Practical Approach with Uses in (Bio)Chemical Processes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/app13031897>
- Wahyunto, & Dariah, A. (2014). Degradasi Lahan di Indonesia: Kondisi Existing, Karakteristik, dan Penyeragaman Definisi Mendukung Gerakan Menuju Satu Peta. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 8(2), 81–93. <https://doi.org/10.2018/jsdl.v8i2.6470>
- Yuniarti, A., Solihin, E., & Arief Putri, A. T. (2020). Aplikasi pupuk organik dan N, P, K terhadap pH tanah, P-tersedia, serapan P, dan hasil padi hitam (*Oryza sativa* L.) pada inceptisol. *Kultivasi*, 19(1), 1040. <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v19i1.24563>
- Yusmayani, M. (2019). Analisis Kadar Nitrogen Pada Pupuk Urea, Pupuk Cair Dan Pupuk Kompos Dengan Metode Kjeldahl. *Amina*, 1(1), 28–34. <https://doi.org/10.22373/amina.v1i1.11>
- Zaharah, T. A., Aprilianti, W., & Wahyuni, N. (2023). Adsorpsi Ion Besi Pada Lindi Menggunakan Zeolit Alam Teraktivasi Asam Klorida (HCl). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(2), 571. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v11i2.66164>
- Zainuddin., Z., & Jufri, Y. (2019). Evaluasi Ketersediaan Unsur Hara Fosfor (P) pada Lahan Sawah Intensif Kecamatan Sukamakmur Kabupaten Aceh Besar. *JURNAL ILMIAH MAHASISWA PERTANIAN*, 4(November), 603–609.