

Efisiensi Penggunaan Hara Kalium Dari Pupuk Kalium Berbahan Dasar Zeolit Alam Pada Bibit Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) Menggunakan Media Tanah Gambut

*Potassium Use Efficiency of Natural Zeolite-Based Potassium Fertilizer in Oil Palm Seedlings (*Elaeis guineensis* Jacq.) Using Peat Soil Media*

Eko Noviandi Ginting, Syaiful Anwar^{1*}, Kukuh Murti Laksono¹, Budi Nugroho¹, dan Suroso Rahutomo

Abstrak Kalium merupakan hara makro yang paling banyak dibutuhkan kelapa sawit. Di sisi lain efisiensi pemupukan kalium pada lahan gambut rendah dikarenakan pencucian. Salah satu upaya meningkatkan efisiensi pemupukan kalium adalah melalui ameliorasi tanah gambut sekaligus merekayasa teknologi pupuk agar hara dapat diserap tanaman lebih efisien. Penelitian ini bertujuan menguji efisiensi pupuk kalium yang telah dimodifikasi menggunakan zeolit alam (pupuk zeka) pada bibit kelapa sawit menggunakan media tanam tanah gambut. Penelitian menggunakan rancangan acak lengkap 5 perlakuan dan 3 ulangan. Perlakuan yang dicobakan adalah (1) K0 = Kontrol/(tanpa pupuk); (2) K1 = pupuk standar (urea + TSP + KCl + dolomit); (3) K2 = urea + TSP + zeka-1 + dolomit; K3 = Urea + TSP + zeka-2 + Dolomit; dan K4 = urea + TSP + zeka-3 + dolomit. Hasil penelitian membuktikan bahwa secara umum pupuk zeka (K2-K4) menghasilkan pertumbuhan bibit, dan efisiensi penggunaan hara yang lebih tinggi dibanding perlakuan pemupukan standar (K1). Perlakuan terbaik (K3) menghasilkan pertumbuhan dan efisiensi hara paling tinggi. Tinggi dan diameter batang bibit, perlakuan K3 lebih besar dibanding K1, berturut-turut 7,7% dan 9,2% lebih tinggi. Selanjutnya, biomassa kering tajuk dan akar yang dihasilkan perlakuan K3 lebih tinggi berturut-turut 39,2% dan 33,9% dibanding perlakuan K1. Nilai *agronomic efficiency*, *Apparent Recovery efficiency*, *Physiological efficiency* dan *Partial Faktor*

Productivity perlakuan K3 lebih tinggi berturut-turut 59,91%; 33,23%; 18,57% dan 39,16% dibanding K1.

Kata kunci: efisiensi penggunaan hara, pencucian, serapan hara

Abstract Potassium is the most needed macronutrient for oil palm. However, the efficiency of potassium fertilization on peatlands is low due to leaching. One of the exertions to improve this fertilization's efficiency is peat soil amelioration and engineering fertilizer technology so that plants can absorb nutrients more efficiently. This study aims to evaluate the effectiveness of zeka fertilizer, a modified potassium fertilizer made from natural zeolite, on oil palm seedlings in peat soil. The study used a completely randomized design with five treatments and three replications. The treatments were (1) K0 = Control/no fertilizer; (2) K1 = standard fertilizer, namely: urea + TSP + KCl + dolomite; (3) K2 = urea + TSP + zeka-1 + dolomite; K3 = urea + TSP + zeka-2 + dolomite; K4 = urea + TSP + zeka-3 + dolomite. The results proved that, in general, zeka fertilizer (K2, K3, and K4) produced better seedling growth and nutrient use efficiency than the standard fertilization treatment of oil palm seedlings (K1). The best treatment (K3) resulted in the highest growth and nutrient efficiency. K3 treatment resulted in seedling height and stem diameter by 7.7% and 9.2%, respectively, compared to K1. Furthermore, the dry biomass of the shoot and roots produced by the K3 treatment was 39.2% and 33.9% higher, respectively, than that produced by the K1 treatment. The agronomic efficiency, Apparent Recovery efficiency, Physiological efficiency, and Partial Factor Productivity of K3 treatment were 59.91%, 33.23%,

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Syaiful Anwar^{1*} (✉)

¹Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan Fakultas Pertanian IPB University, Bogor, Jawa Barat, Indonesia.
Email: phuy@apps.ipb.ac.id

18.57%, and 39.16% higher than K1, respectively.

Keywords: *leaching, nutrient uptake, nutrient use efficiency.*

PENDAHULUAN

Lahan gambut merupakan lahan marjinal yang memiliki berbagai faktor pembatas bagi pertumbuhan dan produksi kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). Namun demikian, dengan semakin terbatasnya lahan-lahan yang memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi bagi kelapa sawit, lahan gambut telah banyak dimanfaatkan untuk perkebunan kelapa sawit. Setidaknya sekitar 1,6 juta hektar areal lahan gambut di Indonesia sudah dimanfaatkan sebagai perkebunan kelapa sawit. (Agus *et al.*, 2016).

Salah satu permasalahan yang cukup krusial dalam pemanfaatan lahan gambut untuk perkebunan kelapa sawit adalah kesuburan yang rendah. Gambut memiliki kemasaman tanah dan kandungan asam organik yang tinggi serta rendahnya ketersediaan hara baik hara makro maupun hara mikro (Maftu'ah & Nursyamsi, 2019). Selain itu, dengan curah hujan yang tinggi dan material gambut yang porous menyebabkan gambut tidak dapat mempertahankan hara dengan baik sehingga hara mudah hilang tercuci, terutama hara kalium (Krishnan *et al.*, 2021). Murnita (2019) menyatakan bahwa tanah gambut memiliki kapasitas serapan kalium yang rendah dan stabilitas ikatan terhadap kalium yang juga rendah sehingga kalium mudah hilang tercuci.

Kalium merupakan hara makro esensial yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang cukup tinggi karena kalium dibutuhkan pada proses fotosintesis, sintesis protein, membuka dan menutup stomata, dan osmoregulasi (Zahoor *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2020; Zörb *et al.*, 2014). Selain itu, kalium sangat penting dalam proses biofisik dan biokimia yang dapat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman seperti: kemampuan tanaman dalam menghadapi stres biotik dan abiotik, aktivasi enzim, mengontrol osmoregulasi sel, mengontrol pembukaan stomata dalam proses fotosintesis (Ahmad & Maathuis, 2014; Coskun *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015) dan berkontribusi terhadap pertumbuhan batang, perkembangan akar serta sintesis protein. Binner *et al.* (2017) menyatakan bahwa tanaman membutuhkan sekitar 20 - 50 mg

kalium untuk membentuk setiap gram berat keringnya agar pertumbuhan tanaman dapat optimal. Pada tanaman kelapa sawit usia produktif, kalium merupakan hara makro yang paling banyak dibutuhkan dibanding hara makro lainnya, setidaknya dibutuhkan 2,5 – 3,5 kg kalium/pokok/tahun dalam bentuk pupuk MoP (*Muriate of Potash*). Namun oleh karena efisiensinya yang rendah, sebagian besar kalium hilang tercuci dan menyebabkan kerugian secara ekonomi.

Salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi pemupukan pada lahan gambut adalah dengan memanfaatkan amelioran atau bahan pembenah tanah. Zeolit alam merupakan salah satu bahan pembenah tanah yang telah banyak dimanfaatkan dalam dunia pertanian. Zeolit banyak dimanfaatkan diantaranya sebagai bahan pembenah tanah dengan cara memperbaiki kesuburan tanah melalui pengayaan hara, meningkatkan aktivitas biologi tanah, dan mengurangi penguapan ammonia dan salinitas tanah (Latifah Omar *et al.*, 2010; Saadat *et al.*, 2012; Xiubin & Zhanbin, 2001). Selain itu, zeolit dapat meningkatkan kapasitas menahan hara oleh tanah dalam waktu yang lama sehingga hara dapat disediakan bagi tanaman dalam jangka waktu yang lama (Rai *et al.*, 2012). Dubey dan Mailapalli (2019) menyatakan, bahwa zeolit tidak mudah hancur dalam waktu yang singkat sehingga fungsinya untuk meningkatkan kapasitas tukar kation tanah dapat berlangsung dalam jangka waktu yang cukup lama.

Selain sebagai bahan pembenah tanah, zeolit juga telah banyak dimanfaatkan sebagai bahan untuk pembuatan pupuk *slow-release*, diantaranya untuk unsur hara nitrogen (Bhardwaj *et al.*, 2012; Ippolito *et al.*, 2011; Rameshaiah *et al.*, 2015) dan fosfor (Lancellotti *et al.*, 2014). Zeolit memiliki susunan kristal aluminosilikat yang unik membentuk kerangka kanal, rongga dan pori, sehingga zeolit memiliki sifat pertukaran ion yang unik, dehidrasi-rehidrasi, sifat adsorpsi dan sifat katalitik yang memungkinkan zeolit mengontrol pelepasan hara untuk dapat diserap tanaman (Ozbahce *et al.*, 2015; Soltys *et al.*, 2020; Tsintskaladze *et al.*, 2016). Berdasarkan uraian tersebut maka penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas zeolit alam sebagai carrier unsur hara kalium guna meningkatkan efisiensi serapan unsur hara kalium pada bibit kelapa sawit yang ditanam pada media tanah gambut.

BAHAN DAN METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di laboratorium kimia tanah dan rumah kaca Pusat Penelitian Kelapa Sawit Medan. Pembuatan pupuk zeka (zeolit-kalium) dilakukan dari bulan Juni 2021 sampai Juli 2022 di laboratorium, sementara pengujian pada bibit kelapa sawit dilakukan selama 6 bulan dari September 2022 sampai Februari 2023 pada tahapan *main-nursery* di rumah kaca.

Pembuatan Pupuk Zeka

Pupuk zeka merupakan pupuk berbahan dasar zeolit alam dan pupuk KCl. Zeolit alam yang digunakan dalam penelitian ini adalah zeolit alam yang banyak dijual di pasaran. Zeolit alam dihaluskan dengan ukuran lolos saringan 100 mesh, lalu diaktivasi menggunakan larutan HCl dengan konsentrasi 1,75 N.

Setelah itu zeolit dibilas menggunakan aquadest sampai pH 7, dan kemudian dipanaskan dengan suhu 400°C selama 1 jam. Selanjutnya dilakukan pemuatan unsur kalium pada zeolit dengan cara impregnasi yaitu direndam pada larutan KCl dengan konsentrasi 25.000 ppm dan dipanaskan pada suhu 65°C selama 17 hari. Zeolit yang telah direndam dalam larutan KCl tersebut kemudian dioven pada suhu 600°C selama 12 jam. Setelah itu zeolit yang telah dimuat kalium tadi digranulasi bersama dengan pupuk KCl yang telah dihaluskan lolos saringan 100 mesh dengan 3 perbandingan (formula), yaitu: (1) zeka-1 = 40% zeolit termuat kalium 60% pupuk KCl; (2) zeka-2 = 50% zeolit termuat kalium 50% pupuk KCl; dan (3) zeka-3 = 60% zeolit termuat kalium 40% pupuk KCl berdasarkan berat. Selanjutnya pupuk yang sudah digranulasi (Gambar 1) dianalisis untuk mengetahui kandungan K₂O pada masing-masing formula (Tabel 1). Selanjutnya pupuk ini disebut sebagai pupuk zeka formula 1 (zeka-1), zeka formula 2 (zeka-2), dan zeka formula 3 (zeka-3).

Tabel 1. Kandungan K₂O pada zeolit alam terimpregnasi dan masing-masing formula pupuk zeka
Table 1. K₂O content in impregnated natural zeolite and each of zeka formulas

Jenis Pupuk	Kandungan K ₂ O (%)
Zeolit alam terimpregnasi kalium	0,38
Zeka-1 (formula-1)	29,36
Zeka-2 (formula-2)	26,11
Zeka-3 (formula-3)	29,42



Gambar 1. Pupuk zeka (kiri), aplikasi perlakuan pupuk pada bibit kelapa sawit (tengah), dan penyiraman bibit (kanan)

Figure 1. Zeka fertilizer (left), fertilizer treatment application on oil palm seedlings (centre), and seedling watering (right)

Uji Efektivitas Pupuk pada Bibit Kelapa Sawit

Bibit kelapa sawit yang digunakan adalah bibit *pre-nursery* yang berasal dari Pusat Penelitian Kelapa Sawit varietas Simalungun (SMB) berumur 3 bulan. Sementara media tanam yang digunakan adalah tanah gambut pada lapisan 0 – 40 cm yang diambil dari perkebunan kelapa sawit di kebun Meranti Paham PT Perkebunan Nusantara IV di Kabupaten Labuhan Batu, Sumatera Utara. Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak lengkap dengan 5 perlakuan dan 3 ulangan. Perlakuan yang dicobakan adalah: (1) K0 = Kontrol/tanpa pupuk; (2) K1 = pemupukan standar pembibitan yaitu: urea + TSP + KCl + dolomit; (3) K2 = urea + TSP + zeka-1 + dolomit;

K3 = urea + TSP + zeka-2 + dolomit; K4 = urea + TSP + zeka-3 + dolomit. Dosis pupuk untuk masing-masing perlakuan disesuaikan dengan perlakuan seperti disajikan pada Tabel 2. Sebelum dipindahkan ke *polybag* besar yang berisi tanah gambut 15 kg/*polybag*, akar bibit kelapa sawit umur 3 bulan dibersihkan terlebih dahulu dari media tanam sebelumnya dengan cara dicuci. Setelah bibit dipindahkan ke *polybag* besar selanjutnya bibit disiram 2 kali sehari selama 1 minggu dengan tujuan aklimatisasi bibit. Setelah 1 minggu selanjutnya pupuk sesuai perlakuan diaplikasikan pada permukaan tanah dengan cara ditebar. Penyiraman bibit dilakukan sebanyak 2 kali sehari masing-masing dengan volume 0,5-liter untuk setiap penyiraman.

Tabel 2. Jenis dan dosis pupuk pada masing-masing perlakuan
Table 2. Type and Dosage of fertilizer in each treatment

Perlakuan	Dosis Pupuk (gram/bibit)						
	Urea	TSP	MoP	Zeka-1	Zeka-2	Zeka-3	Dolomit
K0	-	-	-	-	-	-	-
K1	13,67	13,37	8,17	-	-	-	13,61
K2	13,67	13,37	-	16,70	-	-	13,61
K3	13,67	13,37	-	-	18,77	-	13,61
K4	13,67	13,37	-	-	-	16,66	13,61
Perlakuan	Hara (gram/bibit)						
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	K ₂ O	K ₂ O	K ₂ O	MgO
K0	-	-	-	-	-	-	-
K1	6,15	6,15	4,90	-	-	-	2,45
K2	6,15	6,15	-	4,90	-	-	2,45
K3	6,15	6,15	-	-	4,90	-	2,45
K4	6,15	6,15	-	-	-	4,90	2,45

Parameter penelitian yang diamati meliputi: (1) vegetatif tanaman yang meliputi tinggi tanaman dan diameter batang; (2) kadar hara N, P, K, dan Mg bibit; (3) berat kering tajuk dan akar bibit; dan (4) serapan hara kalium bibit. Sementara itu, efisiensi penggunaan hara (*nutrient use efficiency/NUE*) dihitung dengan menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh (Dobermann, 2007). Parameter efisiensi penggunaan

hara (*NUE*) tanaman yang diukur meliputi *Agronomic Efficiency/AE* (gram peningkatan berat kering tajuk/gram hara yang diaplikasikan); *Apparent recovery efficiency/ARE* (gram serapan hara/gram hara yang diaplikasikan); *Physiological efficiency/PE* (gram berat kering tajuk/gram serapan hara); dan *Partial Factor Productivity/PFP* (gram berat kering tajuk/gram hara diaplikasikan). Serapan hara dihitung

menggunakan persamaan (1), sementara masing-masing indeks NUE dihitung menggunakan persamaan (2) sampai (5) sebagai berikut.

Serapan Hara = Kadar Hara (%) x berat kering tanaman (gram)(1)

$AE = (Y_F - Y_0)/F$ (2)

$ARE = (U - U_0)/F$ (3)

$PE = (Y_F - Y_0)/(U - U_0)$ (4)

$PFP = (Y/F)$ (5)

Dimana: Y = berat kering tanaman (gram); Y_F = berat kering tanaman yang dipupuk (gram); Y_0 = berat tanaman yang tidak dipupuk (gram); U = total serapan hara bagian atas/tajuk (shoot) tanaman yang dipupuk (gram); U_0 = total serapan hara bagian atas/tajuk (shoot) tanaman yang tidak dipupuk (gram); dan F = input hara dari pupuk (gram).

Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan

ANOVA; pengujian lebih lanjut menggunakan *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis menggunakan Statistical Analysis System (SAS) software 9.1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Kimia Tanah

Hasil analisis ragam terhadap sifat kimia tanah (Tabel 3) menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang nyata antar perlakuan yang dicobakan. Hasil analisis tanah memperlihatkan bahwa kandungan C-organik tanah antara 50 – 53 dan dengan nilai C/N antara 49,45 – 64,59. Tanah gambut memiliki kandungan C-organik yang tinggi karena tanah gambut terbentuk dari akumulasi sisa-sisa tanaman yang setengah membusuk (Noor *et al.*, 2014). Kandungan C-organik tanah dan nilai C/N tanah tersebut tergolong tinggi. Menurut Qadafi *et al.* (2021), nilai C/N yang tinggi (>20) mengindikasikan bahwa laju dekomposisi yang rendah, dimana semakin tinggi nilai C/N maka semakin rendah tingkat penguraian yang terjadi.

Tabel 3. Sifat kimia tanah setelah 6 bulan masing-masing perlakuan

Table 3. Soil Chemical Properties after 6 months in each treatment

Perlakuan	pH (H ₂ O)	C (%)	N (%)	C/N	P (ppm)	K	Mg	KTK	KB (%)
						(me/100g)			
K0	3,77 sm	53,21 st	0,95 st	57,24 st	26,95 st	0,51 s	7,90 t	136,51 st	12,84 sr
K1	3,87 sm	52,96 st	0,83 st	64,59 st	50,52 st	1,97 st	6,26 t	111,09 st	17,82 sr
K2	3,87 sm	52,91 st	0,99 st	53,44 st	74,07 st	1,55 st	9,85 st	137,23 st	17,62 sr
K3	3,93 sm	52,29 st	0,87 st	60,15 st	64,78 st	1,64 st	7,96 t	123,79 st	15,85 sr
K4	4,53 m	52,07 st	0,64 t	49,45 st	54,77 st	1,25 st	6,63 t	128,17 st	15,99 sr

Keterangan: sm = sangat masam; m = masam; s = sedang; st = sangat tinggi; t = tinggi; sr = sangat rendah

Notes: sm = very acid; m = acid; s = moderate; st = very high; t = high; sr = very low

Secara alami, gambut memiliki kandungan hara yang rendah sehingga diperlukan perlakuan pemupukan yang intensif ketika gambut dimanfaatkan untuk pertanian. Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa secara umum kandungan hara P, K, Mg-tertukarkan, dan kejenuhan basa tanah pada perlakuan kontrol (K0) relatif lebih rendah dibanding perlakuan pemupukan (K1 – K4). Dengan demikian,

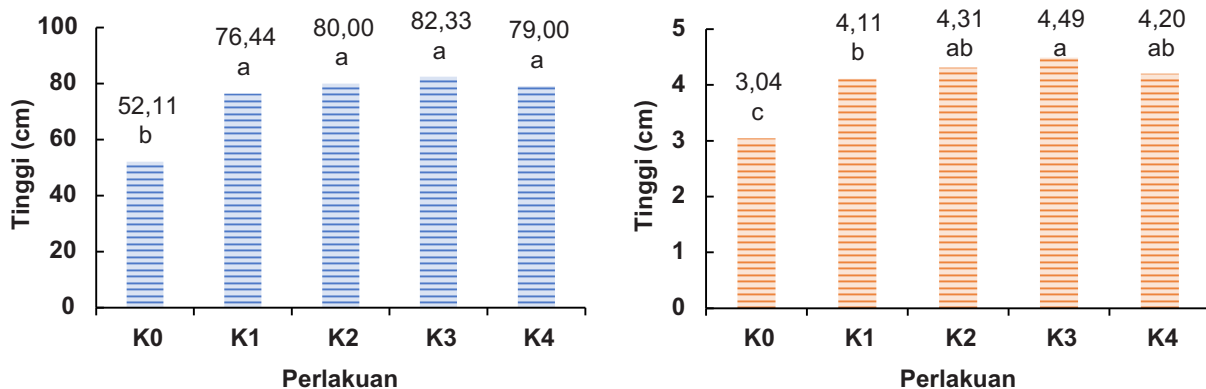
walaupun tidak berbeda nyata berdasarkan uji statistik namun perlakuan pemupukan menghasilkan peningkatan kandungan K-tertukarkan pada tanah gambut. Hal ini mengindikasikan bahwa pemupukan pada tanah gambut sangat dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman yang dibudidayakan. Nursanti *et al.* (2022) menyatakan bahwa tanah gambut memiliki kandungan kation

tertukarkan yang rendah yang mengindikasikan bahwa sebagian besar tapak jerapan pada tanah gambut didominasi oleh kation-kation asam terutama H⁺. Sementara itu nilai kapasitas tukar kation (KTK) yang tinggi pada tanah gambut yang digunakan diduga disebabkan oleh peningkatan pH hingga pH 7 ketika pengukuran di laboratorium. Rahmawati *et al.* (2022) menyatakan bahwa peningkatan KTK pada gambut disebabkan oleh perubahan muatan negatif yang berasal dari senyawa organik yang sebagian besar berasal dari gugus karboksil dan hidroksil dari fenol, dimana perubahan muatan ini sangat tergantung pada perubahan pH, jika pH dinaikkan maka otomatis nilai KTK akan meningkat.

Tinggi, Diameter Batang, dan Berat Kering Bibit

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa

perlakuan kontrol (K0) menghasilkan tinggi bibit paling rendah dibanding perlakuan lainnya dengan nilai 52,11 cm. Sementara bibit tertinggi diperoleh pada perlakuan K3 yaitu 82,34 cm dimana nilai tersebut lebih tinggi 58,01% dibanding kontrol dan 7,7% dibanding perlakuan K1 (Gambar 2). Demikian juga halnya dengan diameter batang bibit, perlakuan kontrol menghasilkan diameter paling rendah dengan nilai 3,04 cm sedangkan diameter terbesar dihasilkan pada perlakuan K3 dengan nilai 4,49 cm, lebih tinggi sekitar 47,69% dibanding kontrol atau sekitar 9,2% lebih tinggi dibanding K1. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa perlakuan pemupukan yang dicobakan dalam penelitian ini memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap pertumbuhan dan perkembangan bibit kelapa sawit.



Keterangan: notasi (huruf) yang sama pada bar menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji jarak Duncan (DMRT) pada taraf 5%

Notes: Means denoted by same letters on bar indicate not significant differences between treatments according to Duncan test ($\alpha = 5\%$)

Gambar 2. Rerata tinggi bibit (kiri) dan diameter batang bibit (kanan) pada setiap perlakuan

Figure 2. Mean of height (left), and bole diameter (right) of seedlings in each treatment

Parameter pertumbuhan dan perkembangan tanaman selanjutnya yang diamati dalam penelitian ini adalah berat kering tanaman (Tabel 4). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa perlakuan K3 merupakan perlakuan yang menghasilkan berat kering tertinggi dibanding perlakuan lainnya, sementara berat kering terendah diperoleh pada perlakuan K0. Hasil uji

statistik menunjukkan bahwa perlakuan K3 menghasilkan berat kering tajuk dan berat kering total yang nyata lebih tinggi dibanding perlakuan pemupukan standar (K1) dengan peningkatan masing-masing sebesar 39,21% dan 37,90% terhadap K1. Berat kering tanaman merupakan ukuran biomassa yang dibentuk selama masa pertumbuhan dan

merupakan indikator baik tidaknya pertumbuhan dan perkembangan tanaman karena berat kering mencerminkan akumulasi senyawa organik yang berhasil disintesis oleh tanaman (Lewu & Killa, 2020) .

Hal tersebut mencerminkan bahwa dalam penelitian ini perlakuan K3 memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap pertumbuhan dan perkembangan bibit kelapa sawit dibandingkan perlakuan lainnya.

Tabel 4. Berat Kering tajuk, akar, dan total bibit kelapa sawit (gram)

Table 4. Dry weight of biomass of shoot, root, and total of oil palm seedlings (gram)

Perlakuan	Berat kering tajuk (<i>shoot</i>)	Berat kering akar (<i>root</i>)	Berat Kering total
K0	18,33 d	10,58 b	28,92 d
K1	52,92 c	17,67 a	70,58 c
K2	56,33 c	18,92 a	75,25 bc
K3	73,67 a	23,67 a	97,33 a
K4	65,53 b	18,92 a	84,50 b

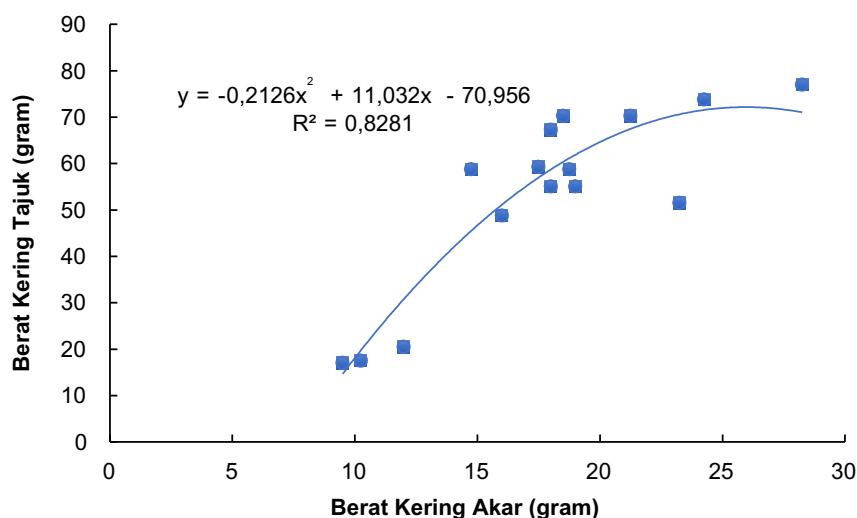
Keterangan: angka yang diikuti oleh notasi (huruf) yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji jarak Duncan (DMRT) pada taraf 5%

Notes: Means denoted by different letters within the same column indicate significant differences between treatments according to Duncan test ($\alpha = 5\%$)

Berat kering tajuk sangat ditentukan oleh aktivitas akar dalam mengangkut air dan unsur hara. Oleh karenanya, lebih tingginya berat kering akar pada perlakuan K3 dibanding perlakuan lainnya juga berimplikasi terhadap berat kering tajuk yang relatif lebih besar dibanding perlakuan lainnya. Dengan kata lain, peningkatan berat kering akar umumnya akan diikuti dengan peningkatan berat kering tajuk. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 3, dimana hubungan antara berat kering akar dengan berat kering tajuk dideskripsikan sebagai hubungan kuadrat yang dinyatakan dalam persamaan $y = -2,2126x^2 + 11,032x - 70,956$ dengan nilai korelasi $R^2 = 0,8281$. Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa walaupun hasil uji jarak berganda Duncan pada taraf 5% menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata, namun secara umum berat kering akar pada perlakuan pupuk zeka (K2, K3, dan K4) relatif lebih tinggi dibanding perlakuan pemupukan standar (K1). Hasil ini mengindikasikan bahwa pupuk zeka dapat menyuplai hara yang lebih baik dibanding perlakuan pemupukan standar sehingga berdampak pada perkembangan akar bibit kelapa sawit yang lebih baik juga. Sebagai konsekuensinya bibit dapat menyerap hara lebih banyak dan berdampak terhadap berat kering tajuk yang lebih tinggi. Nouri *et al.* (2014) menyatakan bahwa perkembangan akar tanaman yang tinggi menggambarkan bahwa tanaman tersebut

memiliki suplai hara yang baik.

Secara umum perlakuan pupuk zeka (K2, K3, dan K4) memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap tinggi dan diameter batang bibit serta berat kering tanaman. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa zeolit yang diperkaya dengan kalium (pupuk zeka) dapat meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan bibit kelapa sawit lebih baik dibandingkan dengan pertumbuhan dan perkembangan bibit kelapa sawit yang diberikan pupuk standar (K1) pada media tanam tanah gambut. Zeolit pada pupuk zeka dapat meningkatkan retensi hara (terutama kation) sehingga hara dapat bertahan lebih lama yang pada akhirnya memberi kesempatan kepada bibit kelapa sawit untuk menyerap hara dari pupuk yang diaplikasikan lebih banyak dibanding perlakuan K0 dan K1. Li *et al.* (2013) menyatakan bahwa zeolit alam dapat membantu tanah menahan hara esensial seperti N, P, K dan Mg dalam jangka panjang sehingga memberikan kesempatan akar tanaman untuk menyerap hara tersebut. Lebih lanjut Nursanti & Qommaruddin (2018) juga melaporkan bahwa zeolit dapat meretensi unsur hara relatif lebih lama sehingga memberi kesempatan kepada bibit kelapa sawit untuk menyerap unsur hara lebih banyak, sehingga secara tidak langsung memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit.



Gambar 3. Hubungan antara berat kering akar dengan berat kering tajuk bibit kelapa sawit.
 Figure 3. Correlation between root dry biomass and shoot dry biomass of oil palm seedling.

Kadar dan Serapan Hara Kalium Bibit Kelapa Sawit

Kadar dan serapan hara dari masing-masing perlakuan disajikan pada Tabel 5. Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa secara statistik tidak ada perbedaan yang nyata antar perlakuan yang dicobakan terhadap

kadar hara kalium tanaman baik kadar hara tajuk maupun akar. Hal yang menarik adalah secara umum kadar kalium bibit pada perlakuan tanpa pemupukan (K0) relatif lebih tinggi dibanding perlakuan pemupukan.

Tabel 5. Kadar dan serapan hara kalium pada masing-masing perlakuan.

Table 5. Potassium content and uptake in each treatment.

Perlakuan	Kadar hara K tajuk (%)	Kadar hara K akar (%)	Kadar K total tanaman (%)
K0	1,33 ab	1,23 a	1,34 abcd
K1	1,40 a	1,17 a	1,41 bcd
K2	1,28 ab	1,59 a	1,28 abc
K3	1,24 b	1,45 a	1,24 a
K4	1,27 ab	1,77 a	1,27 ab

Perlakuan	Serapan hara K tajuk (%)	Serapan hara K akar (%)	Serapan K total tanaman (%)
K0	24,39 c	13,15 c	37,83 a
K1	74,51 b	29,42 ab	95,28 b
K2	72,40 b	33,14 a	102,42 bc
K3	91,16 a	34,58 a	125,74 d
K4	83,75 ab	20,76 bc	117,84 cd

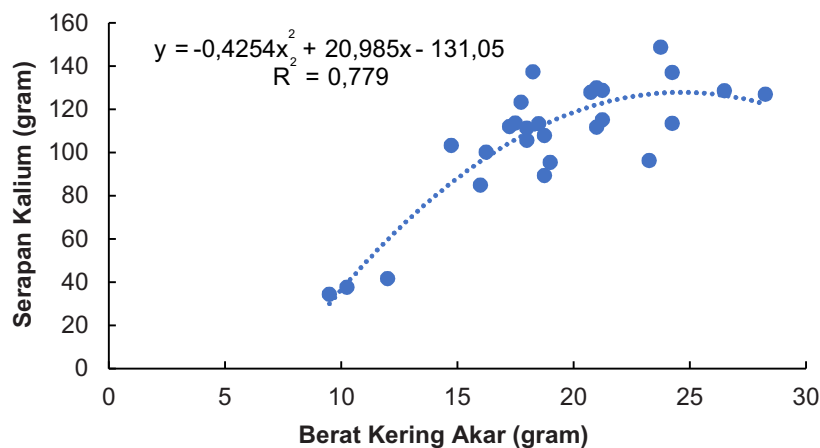
Keterangan: angka yang diikuti oleh notasi (huruf) yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji jarak Duncan (DMRT) pada taraf 5%.

Notes: Means denoted by different letters within the same column indicate significant differences between treatments according to Duncan test ($\alpha = 5\%$)

Tingginya kandungan hara Kalium pada perlakuan K0 diduga disebabkan oleh pertumbuhan tanaman yang tertekan karena minimnya hara yang tersedia, akibatnya akumulasi nutrisi terjadi lebih cepat dibanding akumulasi biomassa. Riedell (2010) menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi nutrisi yang tinggi pada jaringan tanaman akan terjadi ketika akumulasi nutrisi meningkat lebih cepat dibanding akumulasi biomassa tanaman. Lebih lanjut Jarrell & Beverly (1981) juga melaporkan bahwa hubungan terbalik antara pertumbuhan tanaman dengan konsentrasi hara di dalam jaringan tanaman dapat terjadi yang dikenal dengan istilah efek pengenceran (*dilution effect*).

Tabel 5 memperlihatkan bahwa serapan hara kalium baik pada tajuk, akar, maupun serapan hara kalium total tertinggi diperoleh pada perlakuan K3 dengan nilai masing-masing sebesar 91,16 gram;

34,58 gram; dan 125,74 gram. Hasil tersebut lebih tinggi sebesar 22,34%; 62,96% dan 31,96% dibanding serapan kalium tajuk, akar, dan total pada perlakuan pemupukan standar (K1). Mobilitas kalium di dalam tanah terbatas, oleh karenanya kalium di dalam tanah umumnya diserap oleh akar tanaman melalui cara difusi. Untuk meningkatkan serapan hara oleh akar tanaman akibat mobilitas kalium yang terbatas tersebut, maka tanaman umumnya melakukan penyerapan kalium melalui eksplorasi akar. Dengan demikian semakin baik perkembangan akar tanaman maka akan semakin baik pula penyerapan kalium oleh akar tanaman. Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa terdapat korelasi kuadrat yang cukup erat antara berat kering akar tanaman dengan serapan kalium total tanaman, yang mencerminkan semakin tingginya serapan kalium total bibit dengan semakin tingginya nilai berat kering akar bibit.



Gambar 4. Hubungan antara berat kering akar dengan serapan kalium total bibit kelapa sawit
Figure 4. Correlation between root dry weight biomass with total potassium uptake of oil palm seedling

Efisiensi Penggunaan Hara Kalium Pada Bibit Kelapa Sawit

Efisiensi penggunaan hara (*nutrient use efficiency/NUE*) merupakan konsep yang sangat penting untuk mengevaluasi sistem produksi tanaman (Fixen *et al.*, 2015), dan sangat dipengaruhi oleh komponen genetik dan fisiologi tanaman serta pengaruhnya terhadap kemampuan tanaman menyerap dan memanfaatkan nutrisi dalam kondisi lingkungan yang berbeda (Fageria *et al.*, 2014). NUE seringkali didefinisikan sebagai keseimbangan massa antara jumlah nutrisi internal tanaman atau nutrisi yang

tersedia pada tanah dengan banyaknya biomassa yang dapat dibentuk oleh tanaman, baik biomassa bersih tanaman maupun hasil biomassa yang dapat dipanen (Weih *et al.*, 2018). Secara umum NUE dihubungkan dengan proses perolehan dan kehilangan karbon dalam kaitannya dengan proses yang berasosiasi dengan perolehan dan kehilangan hara yang menjadi faktor pembatas utama pertumbuhan tanaman (Reich *et al.*, 2014; Weih *et al.*, 2017). Dengan kata lain, NUE bergantung pada kemampuan tanaman untuk menyerap hara dan memanfaatkan unsur hara untuk memperoleh hasil

yang optimal. Dalam penelitian ini ada 4 indeks dari NUE yang diperhitungkan yaitu AE (*agronomic efficiency*), ARE (*Apparent recovery efficiency*), PE (*Physiological efficiency*), dan PFP (*Partial Factor Productivity*).

Tabel 6 memperlihatkan bahwa perlakuan K3 secara konsisten menghasilkan nilai AE, ARE, PE dan PFP yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan K3 menghasilkan efisiensi penggunaan hara (NUE) yang lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa pertumbuhan dan perkembangan bibit kelapa sawit menggunakan media tanah gambut mutlak membutuhkan pupuk sebagai sumber hara tanaman. Hal ini diindikasikan dengan nilai indeks PFP pada Tabel 6, dimana nilai PFP pada perlakuan pemupukan (K1-K4) berbeda sangat nyata lebih tinggi dibanding perlakuan tanpa pemupukan (K0). Nilai PFP tertinggi diperoleh pada perlakuan K3 yaitu sebesar 15,03 gram berat kering/gram hara yang diaplikasikan, dimana nilai tersebut lebih tinggi sekitar 23,91% dibanding nilai

PFP yang diperoleh pada perlakuan K1.

Nilai AE tertinggi diperoleh pada perlakuan K3 yaitu sebesar 11,29 g g⁻¹ sementara nilai AE terkecil diperoleh pada perlakuan K1 yaitu sebesar 7,06 g g⁻¹. Nilai tersebut mencerminkan bahwa setiap gram K₂O yang diaplikasikan pada perlakuan K3 akan terkompensasi terhadap peningkatan biomassa kering tanaman sebesar 11,29 gram atau lebih tinggi 59,91% dibanding peningkatan biomassa kering tanaman pada perlakuan K1. Bihari *et al.* (2022) menyatakan bahwa efisiensi agronomis (AE) digunakan sebagai indikator jangka pendek untuk melihat dampak nutrisi yang diaplikasikan terhadap produktivitas yang dihasilkan. Nilai AE yang lebih tinggi pada perlakuan K3 diduga sebagai dampak keberadaan zeolit yang berperan memperlambat pelepasan hara sehingga sejalan dengan kebutuhan tanaman. Hasil tersebut sejalan dengan hasil penelitian Eslami *et al.* (2018) yang melaporkan bahwa pemanfaatan zeolit dalam pembuatan pupuk mampu mengendalikan pelepasan NH₄⁺ dan K⁺ dalam jangka waktu yang cukup lama.

Tabel 6. Agronomic Efficiency (AE), Apparent Recovery Efficiency (ARE), Physiological Efficiency (PE) dan Partial Factor Productivity (PFP) pada masing-masing perlakuan

Table 6. Agronomic Efficiency (AE), Apparent Recovery Efficiency (ARE), Physiological Efficiency (PE) dan Partial Factor Productivity (PFP) on each treatment

Perlakuan	AE (gram gram ⁻¹)	ARE (%)	PE (gram gram ⁻¹)	PFP (gram gram ⁻¹)
K0	-	-	-	3,74 a
K1	7,06 a	10,23 a	0,70 a	10,80 b
K2	7,76 ab	10,51 ab	0,79 ab	11,50 bc
K3	11,29 c	13,63 bcd	0,83 bcd	15,03 d
K4	9,64 bc	12,11 abc	0,81 abc	13,38 c

Keterangan: angka yang diikuti oleh notasi (huruf) yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji jarak Duncan (DMRT) pada taraf 5%

Notes: Means denoted by different letters within the same column indicate significant differences between treatments according to Duncan test ($\alpha = 5\%$)

Rerata nilai ARE pada seluruh perlakuan masih tergolong rendah yaitu berkisar 10 sampai 13% yang menggambarkan bahwa pemupukan yang dilakukan pada masing-masing perlakuan masih belum sepenuhnya efisien. Ginting *et al.* (2021) juga menemukan hasil yang sama dimana nilai ARE untuk hara kalium pada bibit kelapa sawit berkisar 12% yang

diduga disebabkan oleh banyaknya hara kalium yang hilang tercuci. Namun demikian nilai ARE pada perlakuan K3 yang masih lebih tinggi dibanding K1 mengindikasikan bahwa perlakuan pemupukan pada K3 masih lebih efisien dibanding perlakuan pemupukan pada K1. Lebih efisiennya pemupukan pada K3 dibanding K1 diduga karena keberadaan

zeolit pada perlakuan K3 yang membantu mempertahankan hara kalium di dalam tanah relatif lebih lama sehingga akar tanaman dapat menyerap hara relatif lebih banyak. Murnita (2019) menyatakan bahwa pada tanah gambut, zeolit memiliki kemampuan menahan hara kalium di daerah perakaran tanaman sehingga dapat meningkatkan efisiensi pemupukan. Pada parameter PE, nilai tertinggi juga diperoleh pada perlakuan K3 yaitu sebesar 0,83 gram berat kering/gram hara yang diserap tanaman. Sementara nilai PE terendah diperoleh pada perlakuan K1 yaitu sebesar 0,70 gram berat kering/gram hara yang diserap tanaman. Indeks PE menggambarkan besarnya peningkatan biomassa tanaman (produksi) dari setiap peningkatan serapan hara tanaman. Dari hasil yang diperoleh mengindikasikan bahwa peningkatan biomassa tanaman pada bibit kelapa sawit akibat serapan hara pada perlakuan K3 lebih besar sekitar 18,5% dibanding pada perlakuan K1.

KESIMPULAN

Hasil penelitian membuktikan bahwa pemanfaatan zeolit alam dalam teknologi pembuatan pupuk kalium dapat meningkatkan efisiensi penggunaan hara kalium pada bibit kelapa sawit yang ditanam pada media tanah gambut. Namun demikian, dalam pemanfaatan zeolit tersebut perlu memperhatikan formula atau komposisi zeolit di dalam pupuk agar memberikan hasil yang optimal. Dalam penelitian ini perlakuan pemupukan dengan pupuk zeka-2 yaitu zeolit kalium dengan perbandingan 50% zeolit dan 50% pupuk KCl secara konsisten menghasilkan pertumbuhan dan perkembangan bibit serta efisiensi penggunaan hara yang lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut pupuk zeka untuk meningkatkan efisiensi pemupukan kalium.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, F., Gunarso, P., & Wahyunto, W. (2016). Dinamika Penggunaan Lahan Gambut. In F. Agus, M. Anda, A. Jamil, & Masganti (Eds.), *Lahan Gambut Indonesia* (II, pp. 85–100). IAARD PRESS.
- Ahmad, I., & Maathuis, F. J. M. (2014). Cellular and tissue distribution of potassium: Physiological relevance, mechanisms and regulation. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 708–714. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.10.016>
- Bhardwaj, D., Sharma, M., Sharma, P., & Tomar, R. (2012). Synthesis and surfactant modification of clinoptilolite and montmorillonite for the removal of nitrate and preparation of slow release nitrogen fertilizer. *Journal of Hazardous Materials*, 227–228, 292–300. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.058>
- Bihari, B., Singh, Y. K., Shambhavi, S., Mandal, J., Kumar, S., & Kumar, R. (2022). Nutrient use efficiency indices of N, P, and K under rice-wheat cropping system in LTFE after 34th crop cycle. *Journal of Plant Nutrition*, 45(1), 1–23 – 1–40. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1943674>
- Binner, I., Dultz, S., Schellhorn, M., & Schenk, M. K. (2017). Potassium adsorption and release properties of clays in peat-based horticultural substrates for increasing the cultivation safety of plants. *Applied Clay Science*, 145(May), 2–8 – 3–6. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.013>
- Coskun, D., Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2014). The physiology of channel-mediated K⁺ acquisition in roots of higher plants. *Physiologia Plantarum*, 151(3), 305–312. <https://doi.org/10.1111/pp.12174>
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency—measurement and management. *IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, Brussels, Belgium*, 7-9 March 2007, 28. http://sustainablecropnutrition.net/ifacontent/download/7163/113016/version/1/file/2007_IFA_FBMP+Workshop_Brussels.pdf#page=8
- Dubey, A., & Mailapalli, D. R. (2019). Zeolite coated urea fertilizer using different binders: Fabrication, material properties and nitrogen release studies. *Environmental Technology and Innovation*, 16, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100452>
- Eslami, M., Khorassani, R., Coltorti, M., Malferrari, D., Faccini, B., Ferretti, G., Di Giuseppe, D.,



- Fotovat, A., & Halajnia, A. (2018). Leaching behaviour of a sandy soil amended with natural and NH₄⁺ and K⁺ saturated clinoptilolite and chabazite. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(8), 1142–1151. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1414944>
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Li, Y. C. (2014). Nutrient Uptake and Use Efficiency By Tropical Legume Cover Crops At Varying Ph of an Oxisol. *Journal of Plant Nutrition*, 37(2), 294–311. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.851695>
- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T. w., Garcia, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/Fertilizer use efficiency: Measurement, current situation and trends. In P. Drechsel, P. Heffer, H. Magen, R. Mikkelsen, & D. Wichelns (Eds.), *Managing Water and Fertilizer For Sustainable Agricultural Intensification: Vol. (Issue, pp. 8–38)*. International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ginting, E.N., Rahutomo, S., Farrasati, R., & Pradiko, I. (2021). Distribution of macronutrients (N, P, K, Mg) from single-nutrient and compound fertilizers application in oil palm seedlings (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)*, 6(1), pp.10-19
- Ippolito, J. A., Tarkalson, D. D., & Lehrsch, G. A. (2011). Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth. *Soil Science*, 176(3), 136–142. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31820e4063>
- Jarrell, W. M., & Beverly, R. B. (1981). The Dilution Effect In Plant Nutrition Studies. In N. C. Brady (Ed.), *Advances In Agronomy* (1st ed., Vol. 34, pp. 197–222). Academic Press Inc.
- Krishnan, K., Ngerong, A. A., Ahim, K., Ahmed, O. H., Ali, M., Omar, L., & Musah, A. A. (2021). Mitigating Potassium Leaching from Muriate of Potash in a Tropical Peat Soil Using Clinoptilolite Zeolite, Forest Litter Compost, and Chicken Litter Biochar. *Agronomy*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy11101900>
- Lancellotti, I., Toschi, T., Passaglia, E., & Barbieri, L. (2014). Release of agronomical nutrient from zeolite substrate containing phosphatic waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(23), 13237–13242. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3334-5>
- Latifah Omar, O., Ahmed, O. H., & Nik Muhamad, A. M. (2010). Minimizing ammonia volatilization in waterlogged soils through mixing of urea with zeolite and sago waste water. *International Journal of Physical Sciences*, 5(14), 2193–2197.
- Lewu, D. L., & Killa, M. Y. (2020). Keragaman Perakaran, Tajuk serta Korelasi Terhadap Hasil Kedelai pada Berbagai Kombinasi Interval Penyiraman dan Dosis Bahan Organik. *Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 8(3), 114–121.
- Li, J., Lu, J., Li, X., Ren, T., Cong, R., & Zhou, L. (2014). Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue. *PLoS ONE*, 9(2), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090440>
- Li, J., Wee, C., & Sohn, B. (2013). Effect of Ammonium- and Potassium-Loaded Zeolite on Kale (&i>Brassica alboglabra&i>) Growth and Soil Property. *American Journal of Plant Sciences*, 04(10), 1976–1982. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.410245>
- Maftu'ah, E., & Nursyamsi, D. (2019). Effect of biochar on peat soil fertility and NPK uptake by corn. *AgriVita*, 41(1), 64–73. <https://doi.org/10.17503/agriVita.v41i1.854>
- Murnita. (2019). Pengaruh Pencucian dan Pemberian Zeolit Serta Kalium Terhadap Distribusi K pada Tanaman dan K Tercuci. *Journal of Applied Agricultural Sciences and Technology*, 3(1), 82–90. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Noor, M., Masganti, M., & Agus, F. (2014). Pembentukan dan Karakteristik Gambut Tropika Indonesia. In F. Agus, A. Markus, A. Jamil, & M. Masganti (Eds.), *Lahan Gambut Indonesia* (Edisi Revisi, pp. 7–32). IAARD Press.
- Nouri, E., Breuillin-Sessoms, F., Feller, U., & Reinhardt, D. (2014). Phosphorus and nitrogen regulate arbuscular mycorrhizal symbiosis in petunia hybrida. *PLoS ONE*, 9(3).

- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090841>
- Nursanti, I., Hayata, H., & Bangun, B. (2022). Characteristics of Peat with Different Depths in Supporting Growth and Productivity of Oil Palm. *JOURNAL OF TROPICAL SOILS*, 28(1), 17. <https://doi.org/10.5400/jts.2023.v28i1.17-22>
- Nursanti, I., & Qommaruddin. (2018). Media Komunikasi Hasil Penelitian dan Review Literatur Bidang Ilmu Agronomi. *Jurnal Media Pertanian*, 3(1), 32–38.
- Ozbahce, A., Tari, A. F., Gönülal, E., Simsekli, N., & Padem, H. (2015). The effect of zeolite applications on yield components and nutrient uptake of common bean under water stress. In *Archives of Agronomy and Soil Science* (Vol. 61, Issue 5, pp. 615–626). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.946021>
- Qadafi, M., Notodarmojo, S., & Zevi, Y. (2021). Performance of microbubble ozonation on treated tropical peat water: Effects on THM4 and HAA5 precursor formation based on DOM hydrophobicity fractions. *Chemosphere*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130642>
- Rahmawati, R., Penyang, P., Firdara, E. K., Yusintha, T., Rosdiana, R., & Putir, P. E. (2022). Changes In Physical And Chemical Properties Of Peat In Various Ages Of Oil Palm Plant In East Kotawaringin District. *Journal of Research and Community Services*, 3(12), 1133–1148. <http://devotion.greenvest.co.id>
- Rai, V., Acharya, S., & Dey, N. (2012). Implications of Nanobiosensors in Agriculture. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 03(02), 315–324. <https://doi.org/10.4236/jbnb.2012.322039>
- Rameshaiah, G. N., Pallavi, J., & Shabnam, S. (2015). Nano Fertilizers and Nano Sensors – an Attempt for. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1), 314–320.
- Reich, M., Aghajanzadeh, T., & De Kok, L. J. (2014). Physiological Basis of Plant Nutrient Use Efficiency - Concepts, Opportunities and Challenges for Its Improvement. In M. J. Hawkesford, S. Kopriva, & L. J. De Kok (Eds.), *Nutrient Use Efficiency in Plants: Concept and Approaches* (Vol. 10, pp. 29–50). Springer International Publishing Switzerland. <http://www.springer.com/series/6193>
- Riedell, W. E. (2010). Mineral-nutrient synergism and dilution responses to nitrogen fertilizer in field-grown maize. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(6), 869–874. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900218>
- Saadat, S., Sepaskhah, A. R., & Azadi, S. (2012). Zeolite Effects on Immobile Water Content and Mass Exchange Coefficient at Different Soil Textures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(22), 2935–2946. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.724748>
- Soltys, L. M., Mironyuk, I. F., Tatarchuk, T. R., & Tsinurchyn, V. I. (2020). Zeolite-based Composites as Slow Release Fertilizers (Review). *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(1), 89–104. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.89-104>
- Tsintskaladze, G., Eprikashvili, L., Urushadze, T., Kordzakhia, T., Sharashenidze, T., Zautashvili, M., & Burjanadze, M. (2016). Nanomodified natural zeolite as a fertilizer of prolonged activity. *Annals of Agrarian Science*, 14(3), 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.05.013>
- Wang, X. G., Zhao, X. H., Jiang, C. J., Li, C. H., Cong, S., Wu, D., Chen, Y. Q., Yu, H. Q., & Wang, C. Y. (2015). Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photoprotection mechanisms in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Journal of Integrative Agriculture*, 14(5), 856–863. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60848-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60848-0)
- Weih, M., Hamnér, K., & Pourazari, F. (2018). Analyzing plant nutrient uptake and utilization efficiencies: comparison between crops and approaches. *Plant and Soil*, 430(1–2), 7–21. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3738-y>
- Weih, M., Westerbergh, A., & Lundquist, P.-O. (2017). Role of Nutrient-Efficient Plants for Improving Crop Yields: Bridging Plant Ecology, Physiology, and Molecular Biology. In M. A. Hossain, T. Kanya, D. J. Burrit, L.-S. P. Tran, & T. Fujiwara (Eds.), *Plant Macronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic*



- Perspectives in Crop Plants* (pp. 31–44). Elsevier Inc. <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- Xiubin, H., & Zhanbin, H. (2001). Zeolite application for enhancing water infiltration and retention in loess soil. *Resources, Conservation and Recycling*, 34(1), 45–52. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00094-5](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00094-5)
- Zahoor, R., Dong, H., Abid, M., Zhao, W., Wang, Y., & Zhou, Z. (2017). Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.02.002>
- Zhu, B., Xu, Q., Zou, Y., Ma, S., Zhang, X., Xie, X., & Wang, L. (2020). Effect of potassium deficiency on growth, antioxidants, ionome and metabolism in rapeseed under drought stress. *Plant Growth Regulation*, 90(3), 455–466. <https://doi.org/10.1007/s10725-019-00545-8>
- Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture - Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656–669. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>