



Analysis of Phosphorus And Potassium As Macronutrients And Zinc As A Micronutrient In Solid Organic Fertilizer Derived From Biowaste As An Applied Science Innovation Supporting SDG 2, 9, And 12

Daviella David¹, Meidita Kemala Sari¹ , Sri Hilma Siregar¹

¹ Program Studi Kimia, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Indonesia

 meiditakemalasari@umri.ac.id



Received: 07/08/2025

Revised: 03/09/2025

Accepted: 02/11/2025

Abstract

Sustainable agriculture plays a crucial role in supporting the achievement of SDG 2 (Zero Hunger), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). One strategic approach to achieving these goals is the utilization of solid organic fertilizers derived from biowaste, which can enhance soil fertility and strengthen food security. The effectiveness of such fertilizers is highly influenced by their macro- and micronutrient content, which must comply with national quality standards. This study analyzes the levels of phosphorus (P), potassium (K), and zinc (Zn) in three samples of solid organic fertilizer (PAP 01, PAP 02, and PAP 03) based on the Indonesian National Standard (SNI) 7763:2018, along with moisture content as an indicator of product stability. Phosphorus was analyzed using UV-Vis spectrophotometry, while potassium and zinc were measured using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results showed moisture content ranging from 5.02% to 45.24%, P_2O_5 from 1.47% to 4.00%, K_2O from 1.58% to 2.86%, and Zn at 261.22 mg/kg, with good analytical precision (RPD and RSD < 5%). These findings indicate that the solid organic fertilizers meet the minimum nutrient requirements to support plant growth. The application of analytical chemistry in this study not only ensures product quality but also supports applied science innovation in promoting sustainable agriculture and community empowerment through science-based development.

Keywords: Sustainable Agriculture; Solid Organic Fertilizer; Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS); UV-Vis Spectrophotometry; Macronutrients and Micronutrients

Analisis Kadar Fosfor Dan Kalium Sebagai Unsur Hara Makro Serta Seng Sebagai Unsur Hara Mikro Pada Pupuk Organik Padat Berbasis Limbah Hayati Sebagai Inovasi Sains Terapan Dalam Mendukung SDG 2, 9, Dan 12

Abstrak

Pertanian berkelanjutan berperan penting dalam mendukung pencapaian SDG 2 (Zero Hunger), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), dan SDG 12 (Responsible Consumption and Production). Salah satu pendekatan untuk mencapainya adalah pemanfaatan pupuk organik padat berbasis limbah hayati, yang mampu meningkatkan kesuburan tanah dan ketahanan pangan. Efektivitas pupuk ini sangat dipengaruhi oleh kandungan unsur hara makro dan mikro yang sesuai standar mutu nasional. Penelitian

ini menganalisis kadar fosfor (P), kalium (K), dan seng (Zn) dalam tiga sampel pupuk organik padat (PAP 01, PAP 02, dan PAP 03) sesuai SNI 7763:2018, serta kadar air sebagai indikator kestabilan. Fosfor dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis, sedangkan kalium dan seng menggunakan spektrofotometri serapan atom (SSA). Hasil menunjukkan kadar air antara 5,02%–45,24%, P_2O_5 antara 1,47%–4,00%, K_2O antara 1,58%–2,86%, dan Zn sebesar 261,22 mg/kg dengan presisi analitik yang baik (RPD dan RSD <5%). Hasil ini membuktikan bahwa pupuk organik padat tersebut memenuhi standar kandungan unsur hara untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Penerapan kimia analitik dalam studi ini tidak hanya menjamin mutu pupuk, tetapi juga mendukung inovasi sains terapan dalam pengembangan pertanian berkelanjutan dan pemberdayaan masyarakat berbasis ilmu pengetahuan

Kata kunci: Pertanian berkelanjutan; Pupuk Organik Padat; Spektrofotometer Serapan Atom (SSA); Spektrofotometri UV-Vis; Unsur Hara Makro dan Mikro

1. Pendahuluan

Pemanasan global semakin menyebabkan ketidakaturan iklim seperti fluktuasi curah hujan, suhu ekstrem, dan kekeringan berkepanjang. Fenomena ini secara langsung maupun tidak langsung mengancam sektor pertanian sebagai pilar utama ketahanan pangan global (Anicetus, 2020). Ketidakstabilan iklim yang semakin intens memperbesar kerentanan sistem pertanian masa kini, terutama akibat tingginya ketergantungan terhadap input eksternal seperti pupuk sintetis, pestisida, serta sistem irigasi buatan (Salazar and Luis Alvarez, 2024). Ketergantungan yang berlebihan ini menyebabkan subsektor tanaman pangan menjadi kurang fleksibel dalam merespons dinamika iklim yang berubah secara cepat dan ekstrem. Akibatnya, keberlangsungan produksi pangan terancam, dan hal ini menjadi hambatan serius dalam mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG) 2 Tanpa Kelaparan, yang menargetkan terciptanya pertanian yang tangguh dan berkelanjutan demi menjamin akses pangan yang aman bagi seluruh populasi dunia (Waqas et al., 2025). Peningkatan jumlah penduduk yang disertai dengan ekspansi aktivitas ekonomi mendorong lonjakan produksi limbah organik harian. Apabila limbah ini tidak ditangani melalui sistem pengelolaan yang efisien dan berkelanjutan, maka akan terjadi peningkatan signifikan emisi gas rumah kaca seperti metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan dinitrogen oksida (N_2O) yang merupakan kontributor utama terhadap percepatan krisis iklim global (Pampana et al., 2022). Ketidakseimbangan antara volume limbah yang dihasilkan dengan kapasitas sistem pengolahan limbah tidak hanya meningkatkan tekanan terhadap daya dukung lingkungan, tetapi juga memperburuk dampak perubahan iklim, baik secara ekologis maupun sosial. Hal ini bertentangan langsung dengan tujuan *Sustainable Development Goal* (SDG) 12, yang menekankan pentingnya pola konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab dan efisien (Yuan et al., 2024).

Indonesia menempati posisi ketiga terbesar dunia dalam emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada tahun 2022 mencapai angka 1.240,8 Mt CO_2 , atau setara dengan 1,24 gigaton CO_2 (Fadila et al., 2025). Angka ini menyumbang sekitar 2,3% dari total emisi GRK secara global dari sektor sampah, terutama akibat tingginya volume limbah organik yang tidak tertangani. Fenomena ini memperkuat urgennya sistem pengelolaan berkelanjutan sejalan dengan SDG 12 (Febriani Irma et al., 2024). Dampak gas rumah kaca yang terakumulasi di atmosfer telah memicu terjadinya perubahan iklim ekstrem dan ketidakaturan musim, hal yang memperlemah ketahanan pangan nasional dan menjadi isu utama dalam pencapaian SDG 2 (Zero Hunger) (Davin et al., 2024). Menurut *World Wild Life Fund for Nature* (WWF) Indonesia memperkirakan bahwa temperatur bumi mengalami kenaikan suhu global antara 1,5°C hingga 4°C pada tahun 2100 yang berpotensi menaikkan permukaan laut hingga 0,6–0,8 m atau lebih yang memperbesar risiko infrastruktur pantai dan sistem pertanian di masa depan (Sri Subekti, 2022). Hal ini menyebabkan intensitas curah hujan

meningkat dan musim kemarau memendek, yang secara langsung mengganggu air tanah, kelembapan tanah, dan produktivitas lahan mengancam ketahanan pangan lokal (Gulo *et al.*, 2024). Laporan IPCC memperingatkan bahwa meningkatnya suhu global bahkan hingga 1,5 °C akan mengurangi hasil tanaman pangan utama hingga 5–10 % pada pertengahan abad ini, menurunkan pasokan kalori dan menambah tantangan ketahanan pangan (Hayat Maddu *et al.*, 2025). Di sisi lain, adaptasi pertanian tanpa perubahan praktik (seperti pertanian berkelanjutan) tidak mungkin sepenuhnya mengatasi krisis ini, sementara biaya sosial dan ekonomi akibat degradasi lahan terus meningkat (Ahsanti and Husen, 2022)

GRK utama sebagai penyebab perubahan iklim terdiri dari Karbon Dioksida (CO₂), Metana (CH₄), Dinitrogen Mono Oksida (N₂O), Hidro Fluorocarbon (HFCs), Sulfur Hexaflorida (SF₆) dan Perfluoro Karbon (PFCs) berasal dari sektor pertanian melalui aktivitas seperti pembakaran biomassa, pemupukan kimia berlebih, dan budidaya padi sawah yang memperparah efek rumah kaca dan menurunkan kualitas tanah secara berkelanjutan (Rosa and Gabrielli, 2023). Tanpa intervensi adaptif, degradasi tanah akibat emisi ini akan memperburuk ketidakseimbangan nutrisi dan menurunkan produktivitas panen menurunkan kontribusi pangan nasional terhadap ketahanan pangan (SDG 2) (Chataut *et al.*, 2023). Dalam jangka panjang, dampak ini berimplikasi pada ketergantungan teknologi eksternal dan menimbulkan disparitas dalam sektor agrikultur lokal.

Sebagai solusi transformatif, pendekatan Climate-Smart Agriculture (CSA) dan agroekologi menawarkan integrasi antara adaptasi dan mitigasi melalui pemanfaatan sumber daya lokal yang ramah lingkungan. Salah satu inovasi aplikatif dari pendekatan ini adalah penggunaan pupuk organik padat berbasis limbah hayati lokal. Inovasi ini terbukti efektif dalam memperbaiki struktur tanah, menjaga kelembapan, serta mendukung sirkulasi hara secara alami, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik dan mendorong praktik pertanian berkelanjutan (Kabato *et al.*, 2025). Hal ini selaras dengan SDG 2 (ketahanan pangan) dan SDG 12 (konsumsi dan produksi berkelanjutan). Kandungan hara utama seperti fosfor, kalium, dan seng dalam pupuk organik memainkan peran penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman di bawah tekanan iklim. Fosfor dibutuhkan dalam pembentukan sistem perakaran dan metabolisme energi, kalium berperan dalam mempertahankan tekanan turgor dan meningkatkan ketahanan terhadap cekaman abiotik, sedangkan seng merupakan unsur mikro esensial yang berfungsi sebagai kofaktor enzim untuk pertumbuhan dan sistem imun tanaman. Pada penelitian (Saleem *et al.*, 2024) bahwa pupuk organik meningkatkan retensi air hingga 40–50 %, memperkuat agregat tanah, serta meningkatkan kandungan humus, sehingga memperkuat ketahanan tanaman terhadap kondisi kering dan panas. Penelitian Susanti *et.al.*, (2024) menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan biofertilizer dapat meningkatkan ketersediaan Zn dan memperbaiki pH tanah, yang berdampak pada peningkatan hasil tanaman kacang tanah hingga 20–30 %. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas pupuk organik padat berbasis limbah hayati lokal dari segi kadar hara makro (P₂O₅ dan K₂O) dan mikro (seng/Zn) serta validasi mutu sesuai standar SNI 7763:2018, dengan harapan menghasilkan produk pupuk adaptif terhadap kondisi iklim tropis Riau yang mendukung SDG 2 (ketahanan pangan), SDG 9 (inovasi lokal industri berbasis sumber daya), dan SDG 12 (produksi & konsumsi berkelanjutan)

2. Metode

2.1. Alat dan bahan

Penelitian ini menggunakan berbagai alat dan bahan kimia untuk mendukung pengujian kadar air, hara makro (P₂O₅ dan K₂O), serta hara mikro (Zn) pada pupuk organik padat sesuai SNI 7763:2018. Pengujian kadar air dilakukan secara gravimetri menggunakan neraca analitik (ketelitian 0,1 mg), oven, desikator, dan cawan porselen.

Analisis hara makro menggunakan metode destruksi basah dengan reagen HNO_3 (p.a.) dan HClO_4 (p.a.). Peralatan yang digunakan mencakup labu digestion, block/microwave digester, labu ukur, kertas saring, tabung kimia, pipet volume, spektrofotometer visible, serta SSA atau flamefotometer dengan lampu katoda kalium. Analisis fosfor dilakukan dengan reagen fosfat molibdat (pekat dan encer), sedangkan kalium dianalisis menggunakan larutan standar dengan tambahan LaCl_3 untuk mengurangi interferensi. Larutan standar P dan K disiapkan dari larutan induk 2.000 mg/L (P) dan 1.000 mg/L (K), lalu diencerkan bertahap hingga diperoleh standar kerja. Untuk analisis hara mikro (Zn total) digunakan SSA dengan lampu katoda Zn serta reagen berupa HNO_3 (p.a.), HClO_4 (p.a.), dan larutan standar $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ yang disiapkan bertingkat dari 1.000 mg/L hingga larutan kerja 2,5 mg/L. Seluruh pengujian dilakukan dengan presisi tinggi untuk memperoleh data kualitas pupuk organik yang akurat dan sesuai standar.

2.2. Metode Penelitian

2.2.1. Pengujian Kadar Air

Analisis kadar air dilakukan menggunakan metode gravimetri. Sampel pupuk organik sebanyak 10–12 gram ditimbang dengan teliti dan dimasukkan ke dalam cawan porselen bertutup yang telah diketahui bobot awalnya. Sampel kemudian dikeringkan dalam oven bersuhu 105 °C selama 16 jam. Setelah dikeringkan, cawan didinginkan dalam desikator agar mencapai suhu ruang, lalu ditimbang kembali untuk menghitung kehilangan massa akibat penguapan air. Sampel yang telah dikeringkan ini selanjutnya disimpan untuk analisis lanjutan, seperti penetapan kadar karbon organik melalui metode pengabuan.

2.2.2. Pengujian Hara Makro (P_2O_5 dan K_2O)

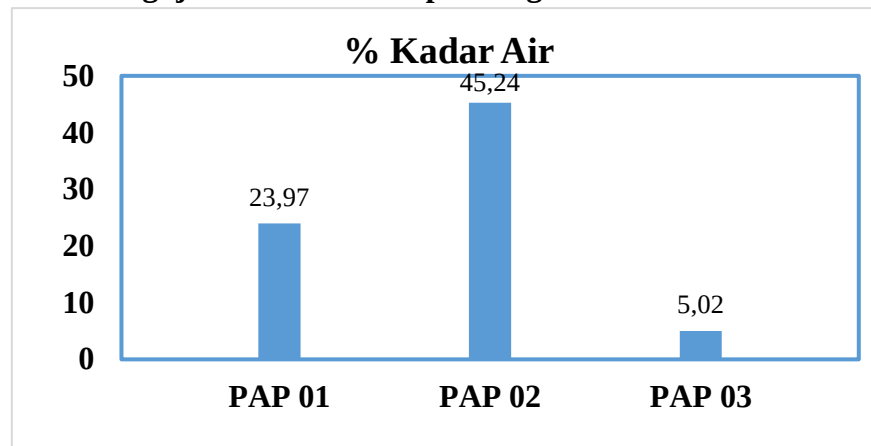
Pengujian hara makro diawali dengan proses destruksi terbuka menggunakan block digester. Sebanyak 0,5–1,0 gram sampel pupuk yang telah dihaluskan dimasukkan ke dalam labu digestion. Reagen destruksi berupa 5–10 mL HNO_3 p.a. dan 1–2 mL HClO_4 p.a. ditambahkan, kemudian larutan dikocok perlahan dan didiamkan semalaman untuk reaksi awal. Proses pemanasan dilakukan bertahap, dimulai dari suhu 100 °C hingga 200 °C hingga terbentuk uap putih dan larutan menyusut sekitar 0,5 mL. Setelah dingin, larutan diencerkan dengan akuades hingga volume 50 mL atau 100 mL, dihomogenkan, dan didiamkan semalaman atau disaring untuk mendapatkan ekstrak jernih. Untuk analisis fosfor (P_2O_5), sebanyak 1 mL ekstrak dan larutan standar fosfor masing-masing dimasukkan ke dalam tabung reaksi, kemudian ditambahkan 9 mL pereaksi fosfat-molibdat encer. Larutan dihomogenkan menggunakan vortex mixer, didiamkan selama 15–25 menit, lalu diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 889 nm. Untuk pengujian kalium (K_2O), 1 mL ekstrak dicampur dengan 1 mL larutan LaCl_3 dan diencerkan hingga 10 mL menggunakan akuades. Setelah dihomogenkan, absorbansi diukur menggunakan spektrofotometer serapan atom (SSA) atau flamefotometer pada panjang gelombang 766,5 nm.

2.2.3. Pengujian Zn Total

Tahapan ekstraksi unsur mikro Zn dilakukan melalui metode destruksi terbuka menggunakan block digester. Sampel pupuk sebanyak 0,5–1,0 gram ditimbang dan dimasukkan ke dalam labu digestion, kemudian ditambahkan 5–10 mL HNO_3 p.a. dan 1–2 mL HClO_4 p.a. Setelah dikocok perlahan, larutan dipanaskan mulai dari suhu 100 °C hingga mencapai 200 °C. Proses dianggap selesai saat muncul uap putih dan larutan menyusut hingga $\pm 0,5$ mL. Larutan kemudian didinginkan, diencerkan hingga 50 mL atau 100 mL, dihomogenkan, dan disaring jika diperlukan. Pengukuran kandungan Zn dilakukan menggunakan SSA dengan membandingkan absorbansi antara ekstrak sampel dan larutan standar kerja Zn.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Kadar Air Pupuk Organik Padat



Gambar 1. Kadar Air Pupuk Organik Padat

Penentuan kadar air merupakan komponen esensial dalam pengujian mutu pupuk organik padat, sebagaimana tertuang dalam SNI 7763:2018 pada klausul 6.3, yang menetapkan kadar air sebagai parameter standar kualitas. Prosedur ini dilaksanakan menggunakan metode gravimetri, yaitu teknik analisis kuantitatif yang mengukur kadar air berdasarkan perbedaan massa sampel sebelum dan sesudah proses pengeringan. Prinsip kerjanya berlandaskan pada penguapan air melalui pemanasan terkendali, di mana selisih berat yang tercatat mencerminkan jumlah air yang hilang dari sampel. Teknik ini dikenal memiliki tingkat akurasi dan presisi tinggi karena pengukuran dilakukan secara langsung terhadap massa air, sehingga hasilnya sangat dapat diandalkan dalam proses evaluasi mutu pupuk (Abidin and Novika, 2024).

Kadar air dalam pupuk tidak hanya menentukan kemantapan fisik produk, namun juga berpengaruh terhadap stabilitas biokimiawi dan efisiensi penggunaannya di lapangan. Dalam pengawasan mutu, kadar air yang sesuai menjadi batas kritis terhadap potensi kontaminasi mikroba maupun degradasi nutrisi. SNI 7763:2018 secara tegas menetapkan kadar air optimal pada kisaran 8–25%, di mana nilai ini dirancang untuk menghindari kelebihan kelembaban yang dapat memicu fermentasi tidak terkendali serta menjaga kemudahan aplikasi di lahan (Tasya et al., 2021). Menurut SNI 7763:2018, kadar air pupuk organik padat harus berada antara 8–25 % untuk memenuhi standar mutu. Kelebihan kadar air dapat menyebabkan pertumbuhan mikroba yang tidak diinginkan dan percepatan dekomposisi bahan organik. Sebaliknya, kadar air yang terlalu rendah dapat menyebabkan pupuk menjadi terlalu kering, rapuh, dan menyulitkan saat aplikasi di lapangan. Oleh karena itu, pengendalian kadar air merupakan indikator utama dalam menilai mutu pupuk organik padat.

Pada sampel PAP 01 menunjukkan kadar air rata-rata sebesar 23,97%, dengan dua replikasi masing-masing 23,9241% dan 24,0128%, menghasilkan nilai *Relative Percent Deviation* (RPD) sebesar 0,37%. Nilai ini mengindikasikan bahwa hasil pengujian memiliki reproduktibilitas tinggi dan presisi yang baik. Kadar air yang mendekati batas atas standar dianggap ideal karena tetap menjaga kelembaban yang cukup untuk aktivitas mikroorganisme tanpa menimbulkan risiko pembusukan. Penelitian (Abidin and Novika, 2024b) menyebutkan bahwa kelembaban optimum dalam pupuk organik sangat penting

untuk menjaga aktivitas biologis mikroba yang bermanfaat namun tetap aman terhadap penyimpanan. Sampel PAP 02 menunjukkan kadar air rata-rata 45,24%, yang jauh melampaui batas maksimum standar mutu. Dua replikasi dengan nilai 45,2798% dan 45,1913% serta RPD hanya 0,20% mengonfirmasi validitas hasil secara analitis, meskipun tidak memenuhi persyaratan SNI. Kadar air yang berlebih berisiko menimbulkan fermentasi lanjutan, pertumbuhan jamur, hingga kerusakan struktur fisik pupuk selama penyimpanan. Hal ini dapat disebabkan oleh proses pengeringan yang belum optimal atau bahan baku yang memiliki kandungan air awal tinggi. Kadar air >30 % dalam pupuk kompos akan mempercepat proses fermentasi tak terkendali dan menghasilkan bau tidak sedap serta penurunan kandungan hara (Ibrahim et al., 2021). Oleh karena itu, PAP 02 memerlukan penanganan pasca-produksi tambahan seperti penjemuran ulang agar sesuai dengan ketentuan SNI.

Berbeda dari dua sampel sebelumnya, PAP 03 mencatat kadar air yang sangat rendah, yaitu 5,02%, yang berada di bawah batas minimum standar SNI. Replikasi pengujian menunjukkan nilai 5,0265% dan 5,0083% dengan RPD sebesar 0,36%, menandakan akurasi pengujian yang baik meskipun hasilnya tidak sesuai standar mutu. Kadar air yang terlalu rendah menyebabkan tekstur pupuk menjadi keras dan rapuh, serta menghambat aktivitas mikroba tanah, yang dapat memperlambat dekomposisi bahan organik pascaaplikasi. Oleh karena itu, sampel PAP 03 dengan kadar air hanya 5,02 % disarankan untuk ditingkatkan kelembabannya melalui proses seperti pengembunan atau pencampuran bahan organik lembap agar memenuhi standar mutu SNI 7763:2018 (Suparto et al., 2025). Ketiga sampel menunjukkan nilai RPD yang sangat rendah (<0,5%), masing-masing 0,37% (PAP 01), 0,20% (PAP 02), dan 0,36% (PAP 03), yang menandakan bahwa metode gravimetri memberikan hasil yang konsisten, reproduktibel, dan akurat. Konsistensi metode ini memperkuat kredibilitas hasil pengujian, terutama mengingat rentang standar kadar air yang relatif sempit (8–25%), di mana deviasi kecil dapat memengaruhi penerimaan atau penolakan suatu produk. Dengan demikian, hasil ini dapat menjadi dasar yang kuat dalam pengambilan keputusan teknis terkait pengemasan, penyimpanan, dan distribusi produk pupuk organik (Mhd. Nau Ritonga, 2022).

3.2. Hasil Pengujian P_2O_5 Total

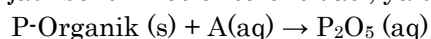
K.Cnth	X Cons	Y Abs	B. Cnth (mg)	K. Air %	P	P_2O_5 %
	(C)		(W)	(KA)		
PAP 01						
PAP 01	3,068	1,163	996,7	23,97	100/10	4,05
	3,007	1,14	1003,2	23,97	100/10	3,94
Rata-Rata P_2O_5 %						4
Berat P_2O_5 pada Contoh (gr)						0,0403
RPD (%)						2,64
Recovery (%)						102,3
PAP 02						
PAP 02	0,874	0,336	1012,4	1,83	100/10	1,5761
	0,882	0,339	1022,4	1,83	100/10	1,5748
Rata-Rata P_2O_5 %						1,58
Berat P_2O_5 pada Contoh (gr)						0,042
RPD (%)						0,09
Recovery (%)						95,76

PAP 03						
PAP 03	0,571	0,218	1013,5	5,02	500/20	1,4842
	0,561	0,214	1010	5,02	500/20	1,4621
Rata-Rata P ₂ O ₅ %						1,47
SD						0,02
Berat P ₂ O ₅ pada Contoh (gr)						0,0774
RPD (%)						1,5
Recovery (%)						98,51

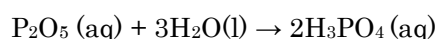
Penetapan kadar fosfor sebagai P₂O₅ total pada pupuk organik dilakukan dengan menggunakan instrumentasi spektrofotometer UV-Vis. Metode Spektrofotometri UV-Vis merupakan teknik spektroskopi yang mengkorelasikan nilai absorbansi (sebagai ordinat) terhadap panjang gelombang (sebagai absis) dalam bentuk pita spektrum. Terbentuknya pita spektrum UV-Vis disebabkan oleh adanya transisi energi yang tidak sejenis serta terjadinya eksitasi elektron. Senyawa tak berwarna umumnya diukur pada rentang panjang gelombang 200–400 nanometer (nm), sedangkan senyawa berwarna diukur pada rentang 200–700 nm (Ermi Abriyani et al., 2022).

Sebelum analisis kadar fosfor dilakukan, panjang gelombang maksimum ditentukan dengan menganalisis larutan sampel menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Penentuan dilakukan pada rentang panjang gelombang visibel kuning (390–460 nm), dan diperoleh panjang gelombang maksimum sebesar 400 nm. Penetapan ini bertujuan untuk mengurangi kesalahan pembacaan absorptivitas molar serta memastikan penyerapan cahaya optimal oleh ion yang dianalisis. Larutan standar fosfor disiapkan dengan konsentrasi 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; dan 5 ppm. Masing-masing larutan dimasukkan ke dalam labu takar 50 mL, ditambahkan 10 mL pereaksi molibdat vanadat, dan diencerkan hingga tanda batas. Absorbansi diukur pada panjang gelombang 400 nm. Data absorbansi dari masing-masing konsentrasi disajikan pada Tabel 3.2. Uji linieritas penentuan regresi dari standard kurva kalibrasi pada Gambar 1, diperoleh koefisien korelasi dan diketahui kondisi alat spektrofotometer UV-Vis yang digunakan sudah mewakili jumlah sampel, dan diperoleh koefisien korelasi (*r*) sebesar 0,99998 yang menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara konsentrasi dan absorbansi. Persamaan regresi linier yang diperoleh adalah $y = 0,38025x - 0,00351$. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai absorbansi meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi, baik pada larutan standar maupun sampel, sehingga hubungan antara konsentrasi fosfor dan absorbansi bersifat linier (Hesti, 2023).

Fosfor berperan penting dalam pembentukan bunga, buah, dan biji, serta mempercepat proses pematangan buah pada tanaman. Unsur ini diserap oleh tanaman dalam bentuk ion H₂PO₄⁻ dan HPO₄²⁻, karena hanya dalam bentuk tersebut fosfor dapat diambil oleh akar. Analisis kadar fosfor diawali dengan tahap destruksi, yang bertujuan mengoksidasi senyawa organik dalam pupuk menggunakan 2 mL HClO₄ p.a. dan 10 mL HNO₃ p.a. Selama proses destruksi, asam kuat berfungsi mengubah fosfor organik dalam sampel menjadi bentuk fosfor teroksidasi, yaitu P₂O₅ (Hesti, 2023).

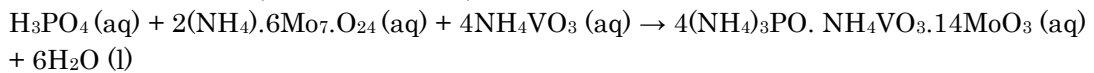


Senyawa P₂O₅ larut dalam H₂O sehingga reaksi yang terjadi selanjutnya adalah sebagai berikut :



Setelah sampel selesai didestruksi, maka selanjutnya dimasukkan kedalam labu 50 mL dan ditambah 10 mL pereaksi molibdat-vanadat lalu ditambahkan aquadest sampai tanda batas dan didiamkan selama 10 menit untuk pembentukan warna. Prinsipnya yaitu sampel diperlakukan dengan asam nitrat untuk mengubah semua metafosfat dan pirofosfat menjadi ortofosfat yang ada dalam sampel akan bereaksi dengan pereaksi- pereaksi tersebut

dan membentuk kompleks asam vanadi-molibdat yang berwarna kuning. Reaksi yang terjadi sebagai berikut : (Sarwar *et al.*, 2024)



Pengukuran kuantitatif kadar fosfor dengan spektrofotometri UV-Vis dengan menggunakan larutan amonium molibdat dan akan menimbulkan warna kuning pada larutan tersebut. Kemudian mengukur absorbansi pada panjang gelombang maksimum 400 nm. Hasil penentuan kadar fosfor pada pupuk organik tercantum pada Tabel 3.3.

Berdasarkan hasil analisis data pada tabel 3.3. diperoleh kandungan Fosfor (P) dalam pupuk organik ini adalah sebesar $2,86\% \pm 0,0746$ yang memenuhi standar minimum yang ditetapkan oleh SNI 7763-2018 yaitu minimum unsur hara makro ($\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$) sebesar 2%. Dihitung kadar fosfor pada pupuk organik dengan rumus :

$$\text{Kadar Fosfor sebagai P}_2\text{O}_5(\%) = \frac{C \times P}{w} \times \frac{100}{100 - kA} \times 100\%$$

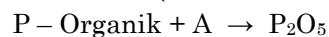
Hal ini menunjukkan bahwa pupuk tersebut dengan hasil optimal dalam menyediakan fosfor bagi kebutuhan tanaman. Menurut Fosfor meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui fungsinya yang dapat meningkatkan proses pembentukan sel pada jaringan tumbuh seperti batang. Selain itu, unsur hara yang terserap dengan baik akan dapat meningkatkan kualitas fotosintat yang dihasilkan dari proses fotosintesis. Fotosintat yang dihasilkan kemudian akan digunakan kembali sebagai sumber energi untuk meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Zinkevičienė *et al.*, 2022)

Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar fosfor dalam sampel sebesar 4,0%, artinya kadar fosfor yang didapatkan sudah sesuai dengan standar yang ditentukan dan spike 0,0685 gr. Kemudian dilakukan perhitungan recovery dengan rumus :

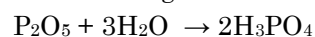
$$\text{Recovery}(\%) = \frac{C_{\text{sampel}} + \text{slope} - C_{\text{sampel}}}{C_{\text{slope}}} \times 100$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai recovery sebesar 103,90%. Recovery merupakan parameter penting dalam analisis yang digunakan untuk menilai efisiensi dan akurasi metode yang diterapkan. Nilai recovery yang baik pada validasi metode analisis umumnya berada dalam rentang 90–110%. Akurasi sendiri menunjukkan tingkat kedekatan hasil analisis terhadap nilai analit sebenarnya dan dinyatakan dalam persentase recovery. Untuk uji akurasi, diperlukan minimal enam kali pengujian untuk memastikan konsistensi hasil (Maghfiroh, Monica and Afthoni, 2022).

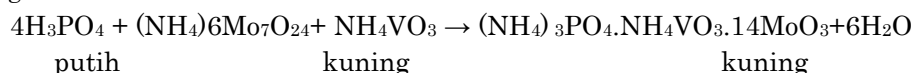
Penetapan kadar fosfor dilakukan menggunakan pereaksi campuran amonium molibdat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dan amonium metavanadat NH_4VO_3 , yang membentuk kompleks berwarna kuning saat bereaksi dengan fosfor. Intensitas warna ini diukur pada panjang gelombang 400 nm. Fosfor organik dalam sampel terlebih dahulu dioksidasi menjadi bentuk anorganik (P_2O_5) dengan bantuan asam kuat untuk mempermudah proses analisis. Asam kuat (A) akan mengoksidasi fosfor organik dalam sampel sehingga berubah menjadi fosfor teroksidasi (P_2O_5) (Romadhon *et al.*, 2024)



Senyawa P_2O_5 larut dalam H_2O hasil dekomposisi H_2O_2 sehingga reaksi yang terjadi selanjutnya adalah sebagai berikut :



Ortofosfat yang terlarut direaksikan dengan ammonium molibdovanadat membentuk senyawa kompleks molibdovanadat asam fosfat berwarna kuning. Reaksi yang terjadi sebagai berikut :

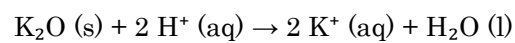


3.3. Hasil Pengujian K₂O Total

Kode Contoh	Konsentrasi (C)	Berat Contoh (mg) (W)	KA	P	K ₂ O %
PAP 01					
PAP 01	0,9285	1002,4	1,46	250	2,791
	0,9833	1007,4	1,46	250	2,941
	0,9467	1005,5	1,46	250	2,837
Rata-Rata (%)					2,86
Berat K ₂ O pada Contoh (gr)					0,0285
SD					0,077
RSD (%)					2,69
Recovery (%)					87,81
PAP 02					
PAP 02	0,2871	1000,6	1,83	250	1,579
	0,2906	1000,7	1,83	250	1,598
Rata-Rata (%)					1,59
Berat K ₂ O pada Contoh (gr)					0,016
SD					0,013
RPD (%)					1,2
Recovery (%)					112,51
PAP 03					
PAP 03	0,8471	1000,7	1,05	250	2,685
	0,8612	1000,8	1,05	250	2,73
	0,8841	1000,7	1,05	250	2,802
Rata-Rata (%)					2,74
Berat K ₂ O pada Contoh (gr)					0,028
SD					0,059
RSD (%)					2,16
Recovery (%)					114,96

Analisis menunjukkan kadar K₂O pada PAP01 sebesar 2,86 %, PAP02 sebesar 1,59 %, dan PAP03 sebesar 2,74 %. Nilai ini diperoleh melalui metode pengukuran berat larut kalium hasil ekstraksi dan perhitungan persentase berdasarkan bobot sampel pupuk. Dalam agronomi, kadar K₂O minimal sekitar 2 % dianggap cukup untuk mendukung pertumbuhan tanaman yang adaptif terhadap stres lingkungan. Dengan demikian, PAP 01 dan PAP03 memenuhi ambang batas agronomis, sementara PAP02 tidak ideal untuk penggunaan langsung. Nilai Recovery sebesar 87,81 % untuk PAP01, 112,51 % untuk PAP 02, dan 114,96 % untuk PAP 03. Pada umumnya, recovery di laboratorium harus berada di rentang 95–105 % untuk menunjukkan keakuratan metode analisis. Sedangkan RSD (Relative Standard Deviation) berturut-turut adalah 2,69 %, 1,2 %, dan 2,16 %, semua masih di bawah batas maksimal 5 %. Meski demikian, nilai recovery di atas 100 % menunjukkan kemungkinan kelebihan estimasi atau kontaminasi dari bahan sampel atau media, yang perlu dikontrol lebih lanjut dalam pengujian lanjutan (Ullah et al., 2022). Perbedaan kadar K₂O antara sampel kemungkinan disebabkan oleh variasi bahan baku organik yang

digunakan. PAP 01 dan PAP 03 mungkin mengandung abu sekam, limbah pertanian kaya kalium, atau aktivator mikroba pelarut K, sedangkan PAP 02 mungkin menggunakan bahan organik dengan kandungan K rendah seperti daun kering atau sisa dapur biasa. Pengomposan yang tidak merata, kurangnya aktivator biologis, atau proses pengeringan berlebih juga bisa memengaruhi kelarutan dan ketersediaan K_2O dalam pupuk. Kalium sangat berperan dalam regulasi air tanaman, aktivitas enzim, dan ketahanan terhadap stres seperti kekeringan serta serangan patogen (Andrews *et al.*, 2021). PAP 02 dengan kadar K_2O rendah (1,59 %) berisiko menurunkan efisiensi pemupukan dan produktivitas tanaman, terutama di area lahan gambut Riau yang memiliki tantangan iklim seperti kekeringan dan rendahnya ketersediaan air. Sebaliknya, PAP 01 dan PAP 03 dapat mendukung pertumbuhan yang lebih optimal karena kandungan kalium yang memadai. Metode analisis K_2O melibatkan ekstraksi kalium melalui asam, diikuti dengan pembacaan menggunakan flame photometry atau AAS (Atomic Absorption Spectroscopy). Mekanisme reaksi yang terjadi antara lain:



Ion K^+ yang terbentuk diukur berdasarkan intensitas serapan cahaya atau emisi dalam instrumen. Kalium dalam bentuk K^+ adalah bentuk yang langsung tersedia untuk tanaman dan menjadi parameter penting dalam quality control pupuk. Teknik ini umumnya tervalidasi dengan recovery mendekati 100 % dan linieritas yang tinggi, sebagaimana dijelaskan dalam studi metodologi flame photometry untuk pupuk (Damalas and Koutroubas, 2024).

Pengujian kadar kalium oksida (K_2O) pada tiga sampel pupuk organik padat (PAP 01, PAP 02, dan PAP 03) menunjukkan variasi kadar K_2O yang cukup signifikan. Sampel PAP 01 menunjukkan kadar tertinggi dengan rata-rata 2,86%, disusul PAP 03 sebesar 2,74%, dan PAP 02 yang paling rendah yaitu 1,59%. Berdasarkan literatur agronomi, kadar K_2O dalam pupuk organik yang baik seharusnya minimal 2% agar mampu memenuhi kebutuhan kalium bagi tanaman yang penting untuk pertumbuhan akar, pembungaan, dan resistensi terhadap kekeringan (Chejara *et al.*, 2021). Hal ini berarti PAP 01 dan PAP 03 memenuhi syarat kelayakan agronomis, sedangkan PAP 02 kurang optimal. Ketidakesesuaian ini dapat berdampak terhadap penurunan efektivitas pupuk saat diaplikasikan di lahan gambut tropis Riau yang miskin hara dan mudah mengalami pencucian unsur. Variasi kadar K_2O di antara ketiga sampel kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan komposisi bahan baku organik, terutama dalam proporsi limbah tanaman, abu sekam, kotoran ternak, atau bahan mineral yang digunakan. Selain itu, efektivitas proses pengomposan juga mempengaruhi tingkat kelarutan K yang tersedia bagi tanaman. Nilai Recovery dari PAP 01 tercatat 87,81%, PAP 02 sebesar 112,51%, dan PAP 03 sebesar 114,96%. Nilai recovery di atas 100% mengindikasikan adanya kemungkinan kontaminasi dari media atau reagen, atau kelebihan estimasi dalam proses ekstraksi K_2O . Nilai recovery yang ideal seharusnya berada pada kisaran 95–105% untuk menjaga akurasi hasil analisis.

Kandungan K_2O yang rendah, seperti yang ditemukan pada PAP 02 (1,59%), berpotensi menurunkan kualitas pupuk dan efisiensi serap oleh tanaman. Kalium sangat penting untuk regulasi osmotik, transportasi nutrisi, dan toleransi terhadap stres biotik dan abiotik. Dalam konteks perubahan iklim di Riau, yang ditandai dengan suhu tinggi dan curah hujan ekstrem, tanaman yang tidak mendapatkan cukup kalium akan lebih rentan terhadap layu, serangan penyakit, dan gagal panen (Sulaman *et al.*, 2025). Oleh karena itu, formulasi pupuk organik dengan kandungan K yang memadai akan berperan penting dalam mendukung adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim dan menjaga ketahanan pangan. Data hasil ini sangat relevan dalam mengembangkan pupuk organik padat lokal yang adaptif terhadap perubahan iklim, khususnya di Riau. Kalium menjadi salah satu elemen

kunci dalam meningkatkan hasil pertanian berkelanjutan, terutama dalam mendukung target SDGs 2 (Zero Hunger), SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Berkelanjutan), dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Penggunaan pupuk organik padat dengan kadar K_2O optimal tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia sintetis yang berdampak negatif pada ekosistem. Dengan demikian, optimalisasi kandungan kalium dalam pupuk organik menjadi langkah ilmiah penting dalam meningkatkan daya tahan pertanian terhadap iklim ekstrem dan memperkuat ketahanan pangan daerah.

3.4. Hasil Pengujian Logam Zn

Kode Contoh	Konsentrasi (C)	Berat Contoh (mg) (W)	KA	P	Kons. Akhir (ppm)
PAP 01					
PAP 01	0,2559	1,0024	1,32	10	255,29
	0,2728	1,0074	1,32	10	270,8
	0,259	1,0055	1,32	10	257,58
Rata-Rata (%)					261,22
Berat pada Contoh (gr)					0,016
SD					0,013
RSD (%)					0,85
Recovery (%)					112,51
PAP 02					
PAP 02	0,9361	1,0006	1,83	1	170,84
	0,9354	1,0007	1,83	1	170,7
Rata-Rata (%)					170,77
Berat pada Contoh (gr)					1,0006
SD					0,1
RSD Horwitz (%)					3,69
RPD (%)					0,084
PAP 03					
PAP 03	1,2291	1,0012	1,05	1	128,912
	1,2691	1,0012	1,05	1	133,107
	1,2817	1,002	1,05	1	134,321
Rata-Rata (%)					132,11
Berat pada Contoh (gr)					1,0014
SD					2,84
RSD (%)					2,15
Recovery (%)					85,51

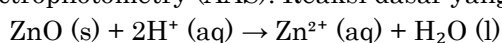
Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar Zn Total dalam tiga sampel pupuk organik padat (PAP 01–PAP 03) masing-masing sebesar 261,22 ppm ($\pm 0,85\%$ RSD), 170,77 ppm ($\pm 3,69\%$), dan 132,11 ppm ($\pm 2,15\%$). Seluruh nilai tersebut masih jauh di bawah ambang batas maksimum 5000 ppm sesuai SNI 7763:2018, sehingga dapat dikategorikan aman untuk aplikasi pertanian. Nilai-nilai ini juga masih termasuk dalam rentang optimal untuk

mendukung kebutuhan mikro tanaman. Zinc merupakan unsur hara mikro esensial yang berperan dalam proses enzimatik, pembentukan klorofil, dan pertumbuhan akar. Kadar Zn dalam rentang 100–300 ppm tergolong baik untuk pupuk organik padat berbasis limbah organik. Perbedaan kadar antar sampel mencerminkan perbedaan komposisi bahan baku serta efisiensi proses dekomposisi bahan organik. Oleh karena itu, evaluasi rutin terhadap kandungan Zn diperlukan untuk memastikan keamanan dan efektivitas pupuk.

Nilai RSD (Relative Standard Deviation) pada ketiga sampel menunjukkan hasil yang akurat dan presisi. PAP 01 memiliki RSD sebesar 0,85%, PAP 02 sebesar tidak ditampilkan, dan PAP 03 sebesar 2,15%, semuanya berada di bawah batas maksimum 5%. Nilai recovery PAP 01 yaitu 112,51%, PAP 03 85,51%, sedangkan PAP 02 tidak ditampilkan namun diperkirakan stabil. Recovery yang terlalu tinggi (>110%) bisa mengindikasikan adanya kontaminasi reagen atau kesalahan perhitungan blanko. Sementara recovery rendah (<90%) bisa menandakan efisiensi pelarutan Zn yang tidak sempurna. Dalam konteks analisis unsur logam menggunakan metode spektrofotometri, validitas metode sangat penting untuk menjamin akurasi hasil. Nilai RPD (Relative Percent Difference) pada PAP 02 sebesar 0,084% memperkuat tingkat keseragaman hasil duplikat analisis (Szerement *et al.*, 2022). Dengan nilai statistik ini, data Zn dapat digunakan untuk pengambilan keputusan teknis pertanian secara valid

Perbedaan kandungan Zn antara PAP 01, PAP 02, dan PAP 03 kemungkinan besar disebabkan oleh variabilitas bahan baku pupuk, terutama yang berasal dari limbah organik hewani, abu sekam, atau limbah industri agro. Kandungan Zn tinggi dapat berasal dari abu pembakaran, kulit telur, dan pupuk kandang tertentu. Faktor lain yang berpengaruh adalah durasi dan suhu pengomposan, di mana suhu tinggi dapat memfasilitasi pelarutan dan ketersediaan mikro hara seperti Zn. Paparan Zn yang terlalu tinggi dapat berdampak fitotoksik pada tanaman, namun jika berada dalam kisaran optimal seperti hasil ini, Zn berfungsi meningkatkan imunitas tanaman terhadap patogen dan stres lingkungan (Hardman *et al.*, 2022). Rendahnya kandungan Zn dalam PAP 03 perlu diantisipasi karena dapat menyebabkan gejala klorosis pada tanaman, terutama pada tanaman padi dan jagung. Penguatan formula pupuk organik melalui rekayasa bahan baku sangat penting dalam menjaga kestabilan unsur mikro. Penambahan Zn pada pupuk organik meningkatkan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan akar tanaman. Oleh karena itu, peran Zn sebagai indikator mutu pupuk organik sangat krusial dalam ekosistem pertanian berkelanjutan (Yan *et al.*, 2021).

Tingkat akurasi pengukuran ditunjukkan oleh nilai RSD yang rendah (<5 %), menandakan konsistensi data analitik. Sementara itu, nilai Recovery pada PAP 01 tercatat 112,51 %, PAP 02 dan PAP 03 sekitar 85,51 %, berada di luar rentang ideal (95–105 %) —yang mengindikasikan potensi kontaminasi atau ketidakakuratan prosedur ekstraksi pada sampel tertentu dan memerlukan pengecekan ulang. Variasi kadar Zn kemungkinan disebabkan oleh perbedaan proporsi bahan baku seperti limbah pertanian, abu unggas, atau bahan organik lain yang memang dikenal kaya Zn. Selain itu, perbedaan teknis seperti durasi pengomposan, derajat dekomposisi, dan penggunaan aktivator chelating Zn juga dapat memengaruhi kelarutan serta ketersediaan Zn dalam pupuk (Recena *et al.*, 2021). Zink merupakan kofaktor esensial untuk banyak enzim, terlibat dalam sintesis hormon pertumbuhan, pembelahan sel, dan antioksidan. Kadar Zn sekitar 130–260 ppm sudah berada dalam rentang optimal untuk membantu meningkatkan produktivitas tanaman, mengurangi stres oksidatif, serta memperbaiki ketahanan fisiologis tanaman terhadap kondisi lingkungan ekstrem (Sarker and Kashem, 2021). Metoda yang digunakan dilaporkan serupa dengan analisis logam lainnya, yaitu melalui digesti asam kuat (misalnya HNO₃) untuk melarutkan Zn dalam sampel organik, lalu dianalisis dengan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Reaksi dasar yang berlangsung:



Intensitas serapan Zn^{2+} dicocokkan dengan kurva kalibrasi untuk menentukan kadar Zn. Presisi tinggi (RSD rendah) menunjukkan bahwa metodologi valid meski recovery perlu dikaji ulang untuk beberapa sampel (Sarker and Kashem, 2021).

Hasil pengujian kadar Zn yang memenuhi syarat SNI sangat relevan dengan upaya pengembangan pertanian berkelanjutan di daerah rentan iklim seperti Provinsi Riau. Zn yang tersedia secara biologis akan memperkuat ketahanan tanaman terhadap cekaman abiotik seperti suhu tinggi dan kekeringan—masalah umum di daerah gambut tropis. Formulasi pupuk organik padat dengan kadar Zn optimal mendukung pencapaian SDG 2 (Zero Hunger), SDG 12 (Produksi dan Konsumsi Berkelanjutan), serta SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Penelitian terbaru oleh (Recena et al., 2021) menunjukkan bahwa pupuk organik dengan mikronutrien Zn dapat meningkatkan hasil tanaman sebesar 15–20%. Di sisi lain, kandungan Zn yang terlalu rendah seperti pada PAP 03 (132,11 ppm) memerlukan penyesuaian komposisi untuk menghindari kekurangan unsur mikro. Dengan demikian, pengendalian mutu Zn dalam pupuk organik bukan hanya soal keamanan, tetapi juga efisiensi hasil dan keberlanjutan lahan. Inovasi pupuk ramah lingkungan seperti ini sangat strategis untuk masa depan pertanian adaptif terhadap krisis iklim.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, kualitas pupuk organik padat menunjukkan variabilitas yang signifikan terhadap parameter-parameter kunci, meskipun beberapa di antaranya telah memenuhi standar yang ditetapkan. Kadar air sampel PAP 01 sebesar 23,97% berada dalam rentang persyaratan SNI 7763:2018 (maks. 40%), namun terdapat hasil kadar air lain sebesar 45,24% yang tidak memenuhi syarat keberterimaan 8–25% (berdasarkan data tambahan yang terlihat pada tabel). Variasi ini mengindikasikan perlunya kontrol proses produksi yang lebih ketat, khususnya dalam tahapan pengeringan, untuk memastikan konsistensi kadar air yang optimal.

Analisis kadar P_2O_5 total menunjukkan rata-rata 4,00%, yang melampaui batas minimum 2% yang disyaratkan oleh SNI 7763:2018, menunjukkan potensi pupuk sebagai sumber fosfor yang baik. Namun, terdapat juga hasil 1,58% dan 1,47% yang tidak memenuhi standar minimum P_2O_5 , mengindikasikan ketidakseragaman dalam komposisi bahan baku atau proses pengayaan. Untuk mencapai kualitas yang konsisten dan sesuai dengan SNI 7763:2018 secara menyeluruh, disarankan untuk mengoptimalkan proses produksi, termasuk pemilihan bahan baku, formulasi, dan teknik pengeringan. Upaya ini akan memastikan bahwa pupuk organik padat yang dihasilkan memiliki kualitas yang stabil, efektif, dan aman untuk aplikasi pertanian.

5. Daftar Pustaka

- [1] Abidin, M.Y. And Novika, E. (2024a) 'PENGARUH PENAMBAHAN KOTORAN SAPI TERHADAP KARAKTERISTIK PUPUK ORGANIK PADAT BERBAHAN SABUT KELAPA DAN JERAMI PADI', *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 10(1), Pp. 151–159.
- [2] Abidin, M.Y. And Novika, E. (2024b) 'PENGARUH PENAMBAHAN KOTORAN SAPI TERHADAP KARAKTERISTIK PUPUK ORGANIK PADAT BERBAHAN SABUT KELAPA DAN JERAMI PADI', *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 10(1), Pp. 151–159.
- [3] Ahsanti, A. And Husen, A. (2022) 'PENGELOLAAN SAMPAH BERBASIS MASYARAKAT DALAM MITIGASI PERUBAHAN IKLIM: SUATU TELAAH SISTEMATIK', *Growth Dan Manajemen Lingkungan*, 11(1), Pp. 2597–8020.

- [4] Andrews, E.M. *Et Al.* (2021) 'A Review Of Potassium-Rich Crop Residues Used As Organic Matter Amendments In Tree Crop Agroecosystems', *Agriculture (Switzerland)*. MDPI AG.
- [5] Anicetus Wihardjaka Dan Elisabeth Srihayu Harsanti (2020) 'Dukungan Pupuk Organik Untuk Memperbaiki Kualitas Tanah Pada Pengelolaan Padi Sawah Ramah Lingkungan'.
- [6] Chataut, G. *Et Al.* (2023) 'Greenhouse Gases Emission From Agricultural Soil: A Review', *Journal Of Agriculture And Food Research*. Elsevier B.V.
- [7] Chejara, S. *Et Al.* (2021) 'Integrated Nutrient Management: Concept, Constraints, And Advantages For A Sustainable Agriculture', *Journal Of Natural Resource Conservation And Management*, 2(2), Pp. 85–94.
- [8] Damalas, C.A. And Koutroubas, S.D. (2024) 'Potassium Supply For Improvement Of Cereals Growth Under Drought: A Review', *Agronomy Journal*. John Wiley And Sons Inc, Pp. 3368–3382.
- [9] Davin, M. *Et Al.* (2024) *Implementasi Budidaya Black Soldier Fly (BSFL) Sebagai Upaya Pengelolaan Sampah Organik Di Desa Cikasungka*.
- [10] Ermi Abriyani Nanda Selvia Putri Risma Siti Nur Rosidah Salwa Sukma Ismanita (2022) 'Analisis Kafein Menggunakan Metode Uv-Vis: Tinjauan Literatur', *Jurnal Pendidikan Dan Konseling*, 4.
- [11] Fadila Oktaviani Lubis, N. And Nurmaini, E.N. (2025) 'Factors Affecting Household-Level Climate Change Mitigation: A Study In Medan', *Indonesia. International Journal Of Health, Education And Social (IJHES)*, 8(6), Pp. 51–65.
- [12] Febriani Irma, M. *Et Al.* (2024) *JSSIT: Jurnal Sains Dan Sains Terapan Tingginya Kenaikan Suhu Akibat Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca Di Indonesia High Temperature Rise Due To Increased Greenhouse Gas Emissions In Indonesia*.
- [13] Gulo, A. *Et Al.* (No Date) 'PENARIK: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan INOVASI PUPUK ORGANIK UNTUK PERTANIAN RAMAH LINGKUNGAN'.
- [14] Hardman, M., Clark, A. And Sherriff, G. (2022) 'Mainstreaming Urban Agriculture: Opportunities And Barriers To Upscaling City Farming', *Agronomy*, 12(3).
- [15] Hayat Maddu, N.Z. *Et Al.* (2025) 'Pengaruh Penyuluhan Pembuatan Pupuk Organik Padat (Kompos Dan Kascing) Dengan Pemanfaatan Limbah Peternakan', *Jurnal Agrisistem: Seri Sosek Dan Penyuluhan*, 21(1), Pp. 1–13.
- [16] Hesti, R.L.R. (2023) 'Penentuan Kadar NPK (Nitrogen, Fosfor Dan Kalium) Dari Pelepah Aren (Arenga Pinnata M.)', *Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia*, 12.
- [17] Kabato, W. *Et Al.* (2025) 'Towards Climate-Smart Agriculture: Strategies For Sustainable Agricultural Production, Food Security, And Greenhouse Gas Reduction', *Agronomy*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- [18] Maghfiroh, D., Monica, E. And Afthoni, M.H. (2022) *Pengembangan Dan Validasi Metode Spektrofotometri Uv Vis Metode Derivatif Untuk Analisis Kafein Dalam Suplemen, Sainsbertek Jurnal Ilmiah Sains & Teknologi*. FARMASI.
- [19] Pampana, S. *Et Al.* (2022) 'Impact Of Climate Change On Agricultural Production: Issues, Challenges, And Opportunities In Asia. Impact Of Climate Change On Agricultural Production: Issues, Challenges, And Opportunities In Asia'.
- [20] Recena, R., García-López, A.M. And Delgado, A. (2021) 'Zinc Uptake By Plants As Affected By Fertilization With Zn Sulfate, Phosphorus Availability, And Soil Properties', *Agronomy*, 11(2).
- [21] Romadhon, M.R. *Et Al.* (2024) 'Assessing The Quality Of Organic Fertilizer Products Made From Cow Dung In Wonogiri Regency, Indonesia', *Agroindustrial Journal*, 10(2), P. 65.

- [22] Rosa, L. And Gabrielli, P. (2023) 'Achieving Net-Zero Emissions In Agriculture: A Review', *Environmental Research Letters*, 18(6).
- [23] Salazar, L. And Luis Alvarez, M.G.-F. (2024) *Food Insecurity And Climate Vulnerability: Empirical Evidence For Countries In Latin America And The Caribbean*.
- [24] Saleem, A. *Et Al.* (2024) 'Securing A Sustainable Future: The Climate Change Threat To Agriculture, Food Security, And Sustainable Development Goals', *Journal Of Umm Al-Qura University For Applied Sciences* [Preprint]. Springer.
- [25] Sarker, M.M.H. And Kashem, M.A. (2021) 'Performance Of Vermicompost In Zinc And Boron Nutrition For Quality Production Of Cabbage', *Eurasian Journal Of Soil Science*, 10(2), Pp. 161–170.
- [26] Sarwar, M.A. *Et Al.* (2024) 'Research & Development Of P2o5 Determination Method In Phosphate Fertilizers And Its Validation', *Pakistan Journal Of Biotechnology*, 21(2), Pp. 513–517.
- [27] Sulaman, S. *Et Al.* (2025) 'Exogenous Application Of Nitrogen (N) And Potassium (K) Improves Drought Tolerance In Plants: A Review', *Journal Of Soil Science And Plant Nutrition*. Springer Science And Business Media Deutschland Gmbh, Pp. 4850–4865.
- [28] Suparto, H., Rizalli Saidy, A. And Fatimah, S. (2025) 'ANALISIS MUTU PUPUK ORGANIK LIMBAH BUAH AREN DENGAN BERBAGAI BIOAKTIVATOR', *Agripeat*, 26(01), Pp. 36–47.
- [29] Susanti, W.I., Cholidah, S.N. And Agus, F. (2024) 'Agroecological Nutrient Management Strategy For Attaining Sustainable Rice Self-Sufficiency In Indonesia', *Sustainability (Switzerland)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- [30] Szerement, J. *Et Al.* (2022) 'Agronomic Biofortification With Se, Zn, And Fe: An Effective Strategy To Enhance Crop Nutritional Quality And Stress Defense—A Review', *Journal Of Soil Science And Plant Nutrition*. Springer Science And Business Media Deutschland Gmbh, Pp. 1129–1159.
- [31] Tasya Hermawati, A., Indah Fajarwati, F. And Widada, S. (2021) *Analysis Of Total Nitrogen Levels In Solid Fertilizer With Kjedahl Method In Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Yogyakarta Analisis Kadar Nitrogen Total Pada Pupuk Padat Dengan Metode Kjedahl Di Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Yogyakarta, Hal.XX*.
- [32] Ullah, R. *Et Al.* (2022) 'Method Development And Validation For The Determination Of Potassium (K2O) In Fertilizer Samples By Flame Photometry Technique', *Journal Of King Saud University - Science*, 34(5).
- [33] Waqas, M. *Et Al.* (2025) 'A Comprehensive Review Of The Impacts Of Climate Change On Agriculture In Thailand', *Farming System*. China Agricultural University.
- [34] Yan, B.F. *Et Al.* (2021) 'The Use Of Stable Zinc Isotope Soil Labeling To Assess The Contribution Of Complex Organic Fertilizers To The Zinc Nutrition Of Ryegrass', *Frontiers In Plant Science*, 12.
- [35] Yuan, X. *Et Al.* (2024) 'Impacts Of Global Climate Change On Agricultural Production: A Comprehensive Review', *Agronomy*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- [36] Zinkevičienė, R. *Et Al.* (2022) 'Determination Of Properties Of Loose And Granulated Organic Fertilizers And Qualitative Assessment Of Fertilizer Spreading', *Sustainability (Switzerland)*, 14(7).



[38] This Work Is Licensed Under A [Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)