

Kuantifikasi Mutu Kimia Pupuk Organik Padat Berbasis Cangkang Kelapa Sawit-Abu Boiler dengan Fortifikasi Konsorsium Bakteri Penambat Nitrogen dan Pelarut Fosfat

Nova Tribuyana^{1*}, Yuliantina², Nasir³, Faridatul Mukminah⁴, G. I. S. Putra⁵, M. Jumadi⁶

^{1,2}Departemen Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Tridinanti, Indonesia

³Departemen Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Tridinanti, Indonesia

⁴Departemen Biokimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, IPB, Indonesia

^{5,6}Divisi Penelitian dan Pengembangan PT. Agrinas Palma Nusantara (Persero), Jakarta Indonesia

Email: nova@univ-tridinanti.ac.id

Abstrak

Limbah padat dari industri pengolahan kelapa sawit merupakan potensi biomassa yang belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu biomassa limbah kelapa sawit yang kaya akan hara makro dan mikro serta berpotensi dijadikan pupuk organik padat yaitu cangkang kelapa sawit dan abu boiler. Cangkang sawit kaya akan kandungan karbon organik (C) sementara itu abu boiler kaya akan kalium (K). Untuk lebih memperkaya kandungan dan efikasinya terhadap kesuburan tanah dan tanaman maka dapat dilakukan fortifikasi Bakteri Penambat Nitrogen (BPN) dan Bakteri Pelarut Fosfat (BPF). Penelitian ini bertujuan untuk mengkuantifikasi mutu kimia pupuk organik padat cangkang kelapa sawit - abu boiler yang difortifikasi konsorsium BPN dan BPF berdasarkan SNI 7763:2024. Percobaan ini meliputi formulasi komposisi dan analisis kuantifikasi mutu kimia dan hara. Hasil analisis menunjukkan bahwa pupuk organik padat dengan fortifikasi BPN dan BPF mengandung senyawa yang bervariasi. Kandungan Nitrogen (N): 0,97%, Fosfor (P): 4,87%, Kalium (K₂O): 3,17%, Magnesium (MgO): 3,36%, Karbon Organik (C): 17,64%, Besi (Fe): 6919,8 ppm dan Seng (Zn): 629 ppm. Hasil tersebut telah memenuhi SNI 7763:2024. Hasil ini memberikan gambaran bahwa limbah biomassa minyak sawit memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai produk pupuk organik padat yang berkelanjutan.

Kata kunci: Abu boiler, Bakteri penambat nitrogen, Bakteri pelarut fosfat, Cangkang sawit

Abstract

Solid waste from the palm oil processing industry is a biomass potential that has not been optimally utilized. One of the palm oil waste biomasses that is rich in macro- and micro-nutrients and has the potential to be used as a solid organic fertilizer is palm kernel shells and boiler ash. Palm kernel shells are rich in organic carbon (C) while boiler ash is rich in potassium (K). To further enrich the content and efficacy of soil and plant fertility, fortification with nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria can be carried out. This study aims to quantify the chemical quality of solid organic fertilizer, palm kernel shells - boiler ash fortified with a consortium of nitrogen-fixing and phosphate-solvent bacteria based on SNI 7763:2024. This experiment includes composition formulation and quantification analysis of chemical and nutrient quality. The results of the analysis show that solid organic fertilizer with nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria fortification contains various compounds. Nitrogen (N): 0.97%, Phosphorus (P): 4.87%, Potassium (K₂O): 3.17%, Magnesium (MgO): 3.36% Organic Carbon (C): 17.64%, Iron (Fe): 6919.8 ppm, and Zinc (Zn): 629 ppm. These results have met SNI 7763:2024. These results provide an overview that palm oil biomass waste has great potential to be used as a sustainable solid organic fertilizer product.

Keywords: Boiler ash, Nitrogen-fixing bacteria, Palm shell, Phosphate-solubilizing bacteria

PENDAHULUAN

Sektor pertanian merupakan salah satu elemen kunci dalam menjamin ketahanan pangan global, seiring dengan meningkatnya kebutuhan pangan akibat pertumbuhan populasi dunia yang diproyeksikan mencapai 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050. Pasokan pangan harus meningkat hingga 70% untuk memenuhi kebutuhan tersebut (McDonald *et al.*, 2019). Pupuk merupakan input eksternal penting dalam produksi tanaman, dengan rata-rata peningkatan permintaan sebesar 1,3% per tahun antara 2019 hingga 2023, mencapai 203 juta metrik ton unsur hara pada tahun 2023 (El Idrissi *et al.*, 2022). Pupuk yang banyak digunakan dalam sektor pertanian adalah pupuk kimia. Pupuk kimia mampu meningkatkan produktivitas tanaman dengan menyesuaikan pH tanah dan menyediakan unsur hara secara cepat. Namun, penggunaan berlebihan dapat menyebabkan degradasi tanah, peningkatan keasaman, serta penurunan efisiensi penyerapan unsur hara. Inefisiensi penggunaan pupuk nitrogen tidak hanya menurunkan hasil panen dan meningkatkan biaya produksi, tetapi juga menimbulkan dampak lingkungan (V. Kumar *et al.*, 2023). Penggunaan pupuk organik menjadi solusi alternatif yang ramah lingkungan karena mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sekaligus memanfaatkan limbah biomassa pertanian sebagai bahan baku pupuk.

Industri kelapa sawit menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar, termasuk cangkang kelapa sawit (*palm kernel shell*) dan abu boiler kelapa sawit (*palm oil boiler ash*). Metode pengelolaan limbah di industri kelapa sawit dilakukan melalui pembakaran dalam boiler untuk menghasilkan uap di pabrik kelapa sawit (Acquah *et al.*, 2016). Namun, proses ini menghasilkan jelaga dan abu dalam jumlah besar yang berpotensi mencemari lingkungan. Pada tahun 2021, total produksi limbah biomassa di Indonesia mencapai 22 juta ton, termasuk sekitar 1,1 juta ton abu boiler kelapa sawit (Nabila *et al.*, 2023). Hal ini menunjukkan adanya peluang besar untuk pengembangan pemanfaatan limbah abu boiler kelapa sawit.

Tandan buah segar (*fresh fruit bunches*) menghasilkan sekitar 6–7% cangkang kelapa sawit (Abdulrazik *et al.*, 2017). Cangkang kelapa sawit sebagian besar tersusun atas karbon (48,06–57,91%), hidrogen (4,77–12,6%), nitrogen (0,04–1,89%), sulfur (0,05–0,2%), dan oksigen (34,10–49,99%) (Abnisa *et al.*, 2013; Idris *et al.*, 2012). Biochar merupakan bahan kaya karbon yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa dalam kondisi oksigen terbatas, biochar telah banyak dikenal karena kemampuannya dalam memperbaiki sifat tanah, termasuk meningkatkan retensi air, porositas, dan aktivitas mikroba (Jiang *et*

al., 2025). Biochar dari cangkang kelapa sawit juga dilaporkan mengandung unsur hara seperti K (2 wt%), Mg (1 wt%), dan Ca (2 wt%) yang bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman (Dominguez *et al.*, 2020).

Berdasarkan uraian data diatas dapat diketahui bahwa limbah kelapa sawit dalam bentuk cangkang sawit dan abu boiler memiliki potensi yang besar dijadikan bahan pembuatan pupuk organik karena kandungan haranya yang lengkap serta manfaatnya terhadap perbaikan kondisi tanah. Dalam penelitian ini, konsorsium bakteri digunakan untuk lebih memperkaya produk pupuk organik padat yang dihasilkan. Bakteri Penambat Nitrogen (BPN) berfungsi mengikat nitrogen atmosfer (N₂) dan hidup pada jaringan tanaman serta pada antarmuka tanah–rizosfer, sehingga mampu menyediakan nitrogen mineral dalam jumlah signifikan yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman (Lazali & Bargaz, 2017; Timmusk *et al.*, 2017). Semetara itu, Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) diketahui dapat meningkatkan ketersediaan fosfor dari tanah ke tanaman (Zhu *et al.*, 2011) dengan cara melarutkan fosfat anorganik serta memineralisasi bentuk fosfor organik yang tidak larut (Sharma *et al.*, 2013).

Integrasi biochar dengan bahan dan lain menjadi strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja serta mengoptimalkan ketersediaan unsur hara (Li *et al.*, 2025). Hingga saat ini masih terbatas penelitian yang mengkaji sinergi antara biochar cangkang kelapa sawit, abu boiler kelapa sawit, dan konsorsium bakteri sebagai bahan komposit untuk pupuk organik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan karakterisasi mutu kimia pupuk organik padat yaitu cangkang kelapa sawit dan abu boiler yang difortifikasi konsorsium BPN dan BPF berdasarkan SNI 7763:2024 (Badan Standardisasi Nasional, 2024).

METODE

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu oven Memmert UN 55, *crusher*, *sieve shaker*, ayakan, reaktor pirolisis sederhana, cetakan pelet, timbangan duduk, kjeldahl term, labu kjeldahl, gelas ukur 10 mL, labu ukur 100 mL, kaca arloji, pemanas listrik, neraca analitik Ohaus Pioneer PX22, pH meter Mettler Toledo, serta spektrofotometer Agilent Cary 60-UV-Vis, wadah kaca, wadah plastik tertutup untuk penyimpanan sampel, peralatan gelas laboratorium seperti gelas ukur, pipet, dan erlenmeyer yang digunakan dalam proses analisis kimia.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu cangkang kelapa sawit yang diperoleh dari salah satu perkebunan kelapa sawit di daerah Kalimantan Selatan. Sementara itu, abu boiler kelapa sawit yang diperoleh dari salah satu pabrik pengolahan kelapa sawit (PKS) di daerah Kalimantan Selatan. Konsorsium bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat dengan kepadatan 10^9CFU mL^{-1} , bahan campuran pupuk lainnya yaitu molase, bentonite-clay, humik acid, serta bahan kimia standar analisis seperti larutan HCl, NaOH, dan indikator yang digunakan dalam pengujian kualitas pupuk sesuai dengan standar SNI 7763:2024 tentang Pupuk Organik Padat.

Prosedur Penelitian

Preparasi Cangkang Kelapa Sawit

Cangkang kelapa sawit terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 1,5 jam untuk menghilangkan kadar air. Setelah proses pengeringan, cangkang kelapa sawit dihancurkan menggunakan crusher hingga berukuran lebih kecil dan seragam. Selanjutnya, dilakukan proses pengayakan menggunakan sieve shaker untuk memperoleh ukuran partikel dengan diameter antara 300–600 μm . Proses pirolisis cangkang kelapa sawit dilakukan menggunakan reaktor pirolisis sederhana dengan kapasitas 20 Kg untuk menghasilkan biochar. Produk biochar hasil pirolisis kemudian didinginkan hingga suhu ruang sebelum digunakan pada tahap formulasi pupuk (Ibrahim *et al.*, 2023).

Pembuatan Pupuk Organik Padat

Pupuk organik padat diformulasikan dengan memanfaatkan biochar hasil pirolisis cangkang kelapa sawit dan abu boiler kelapa sawit sebagai bahan utama. Kedua bahan tersebut dicampurkan dengan rasio perbandingan tertentu 1:3 (b/b) hingga homogen. Campuran tersebut kemudian ditambahkan bahan filler lain yaitu bentonite-clay 30% (b/b) dan aditif molase 5% (b/v), humik acid 10% (b/v). Untuk mengkaji pengaruh penambahan mikroba terhadap mutu pupuk, dilakukan variasi perlakuan berupa: (1) pupuk organik padat dengan penambahan konsorsium BPN dan BPF, dan (2) pupuk organik padat tanpa penambahan konsorsium bakteri (sebagai kontrol). Bakteri yang digunakan terdiri atas konsorsium BPN dan BPF dengan kepadatan 10^9CFU mL^{-1} yang kemudian difortifikasi ke dalam campuran bahan padat dengan konsentrasi yaitu 5% dari bobot total formulasi (b/v). Proses pencampuran dilakukan secara merata hingga bahan mencapai homogenitas optimal. Selanjutnya, campuran tersebut dicetak dalam cetakan pelet. Pupuk yang dihasilkan kemudian dikeringanginkan pada suhu ruang selama 3-5 hari untuk menurunkan

kadar air tanpa mengganggu aktivitas mikroba. Setelah kering, pupuk organik padat disimpan dalam wadah tertutup untuk tahap analisis selanjutnya.

Analisa Mutu Pupuk Organik Padat

Pengujian kualitas mutu pupuk organik padat mengacu pada prosedur SNI 7763:2024 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik Padat. Adapun parameter yang dianalisa meliputi parameter: Kadar air, C-organik (%), C/N ratio, pH, Hara makro (N + P₂O₅, K₂O, MgO) dan Hara mikro (Fe- total dan Zn Total).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Fisik Pupuk Organik Padat

Sifat fisik pupuk organik padat merupakan karakteristik fisik yang dapat diukur dan diamati, parameter fisik penting untuk ditentukan karena berpengaruh terhadap penyimpanan, penanganan, dan aplikasi pupuk ke tanah. Parameter fisik yang dapat dinilai yaitu kadar air, tekstur, dan warna pupuk. Kadar air merupakan persentase kandungan air dalam suatu bahan berdasarkan berat basah atau berat kering (Widarti *et al.*, 2015). Berdasarkan Tabel 1, kadar air pupuk organik padat bervariasi dengan nilai terendah pada pupuk organik padat tanpa fortifikasi bakteri yaitu 3,56% sementara pada pupuk organik padat dengan fortifikasi bakteri sebesar 5,54%. Berdasarkan persyaratan SNI 7763:2024, kadar air yang dipersyaratkan untuk pupuk organik padat adalah 8-25%. Kadar air suatu produk berpengaruh pada daya simpan produk tersebut. Kadar air akan sangat berpengaruh dalam mempercepat terjadinya perubahan dan penguraian bahan-bahan organik yang digunakan pada pupuk (Widarti *et al.*, 2015). Kadar air yang rendah dapat memperlambat proses penguraian bahan organik dalam pupuk selama penyimpanan. Ketika pupuk digunakan di tanah dan terjadi peningkatan kelembapan di tanah, maka dapat terjadi metabolisme mikroba serta pelarutan bahan organik (Widarti *et al.*, 2015).

Parameter lain yang dievaluasi pada sifat fisik pupuk organik padat adalah tekstur dan warna. Fortifikasi bakteri penambat nitrogen (BPN) dan bakteri pelarut fosfat (BPP) berpengaruh terhadap tekstur pupuk organik padat yang dihasilkan. Pada pupuk organik padat yang difortifikasi bakteri, tekstur pupuk sedikit rapuh dibandingkan dengan pupuk yang tidak difortifikasi. Evaluasi parameter warna didapati warna pupuk yang hitam keabuan, tidak terjadi pengaruh antara pupuk tanpa bakteri dengan pupuk fortifikasi bakteri. Hasil sifat fisik pupuk organik dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Fisik Pupuk Organik Padat

Parameter	Tanpa Bakteri	Fortifikasi Bakteri
Kadar Air (%)	3,56	5,54
Tekstur	Keras	Sedikit Rapuh
Warna	Hitam keabuan	Hitam keabuan

Mutu Kimia Pupuk Organik Padat

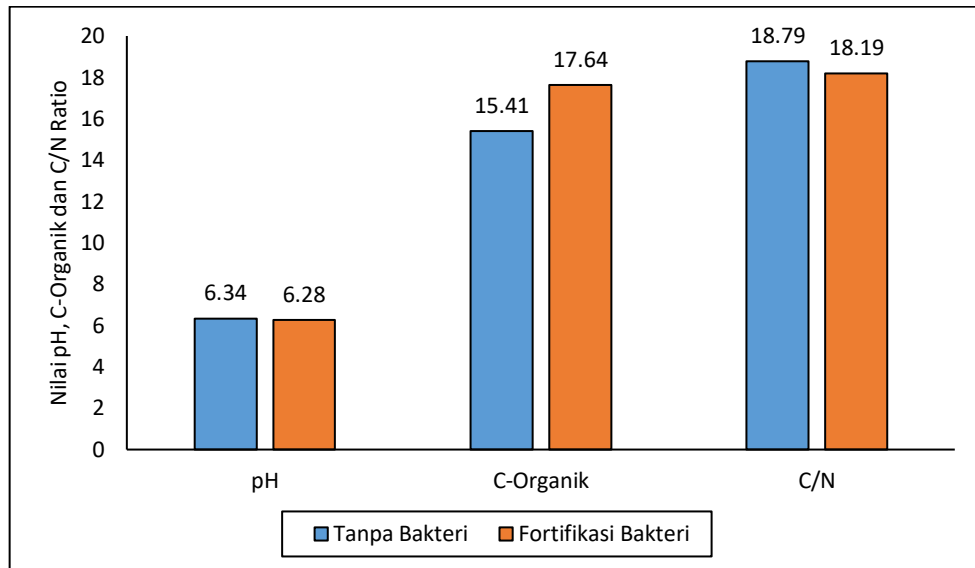
Penentuan mutu kimia pupuk organik padat dilakukan berdasarkan standar SNI 7763:2024, dilakukan evaluasi nilai derajat keasaman (pH), C-organik dan C/N ratio. Perbandingan mutu kimia pupuk organik padat dibandingkan antara formula tanpa fortifikasi bakteri dan dengan fortifikasi bakteri. Perlakuan fortifikasi bakteri penambat nitrogen (BPN) dan bakteri pelarut fosfat (BPP) memberikan pengaruh terhadap kualitas mutu kimia pupuk organik padat yang dihasilkan (Gambar 1).

Berdasarkan hasil pengujian nilai pH didapati pH pupuk organik padat tanpa fortifikasi bakteri dan dengan fortifikasi bakteri sebesar 6,34 dan 6,28 berturut-turut. Hal ini sudah sesuai dengan standar SNI 7763:2024 yaitu nilai 4-9. Berdasarkan penelitian (Widarti *et al.*, 2015), kisaran pH optimal untuk pengomposan adalah 6,5 hingga 7,5. Proses pengomposan akan mentransformasi bahan organik dan mengubah pH bahannya. Pada akhir proses, kompos yang matang umumnya memiliki pH yang mendekati netral.

Penentuan kandungan bahan organik dilakukan dengan menentukan jumlah C-organik. Berdasarkan hasil pengujian persentase C-organik didapati C-organik pupuk organik padat tanpa fortifikasi bakteri dan dengan fortifikasi bakteri sebesar 15,41% dan 17,64% berturut-turut. Hal ini sudah sesuai dengan standar SNI 7763:2024 yaitu minimal 15%. Berdasarkan hasil pengujian, fortifikasi BPN dan BPP dapat meningkatkan persentase C-organik pada pupuk organik yang dihasilkan. Pupuk organik dengan kandungan C-organik tinggi akan berpengaruh terhadap peningkatan layanan siklus hara pada tanah (J. Li *et al.*, 2018).

Berdasarkan hasil pengujian rasio C/N didapati rasio C/N pada pupuk organik padat tanpa fortifikasi bakteri dan dengan fortifikasi bakteri sebesar 18,79 dan 18,19 berturut-turut. Hal ini sudah sesuai dengan standar SNI 7763:2024 yaitu maksimal rasio C/N sebesar 25. Rasio C/N yang sesuai penting dalam mendukung proses dekomposisi komponen organik pupuk. Menurut Pandebesie (Pandebesie & Rayuanti, 2013), efektivitas proses pembusukan sangat bergantung pada rasio C/N. Apabila rasio ini terlalu tinggi, dekomposisi akan berlangsung lambat. Sebaliknya, rasio yang terlalu rendah hanya

mendorong pembusukan yang cepat pada tahap awal, yang kemudian akan melambat akibat keterbatasan karbon (C) untuk energi mikroorganisme.



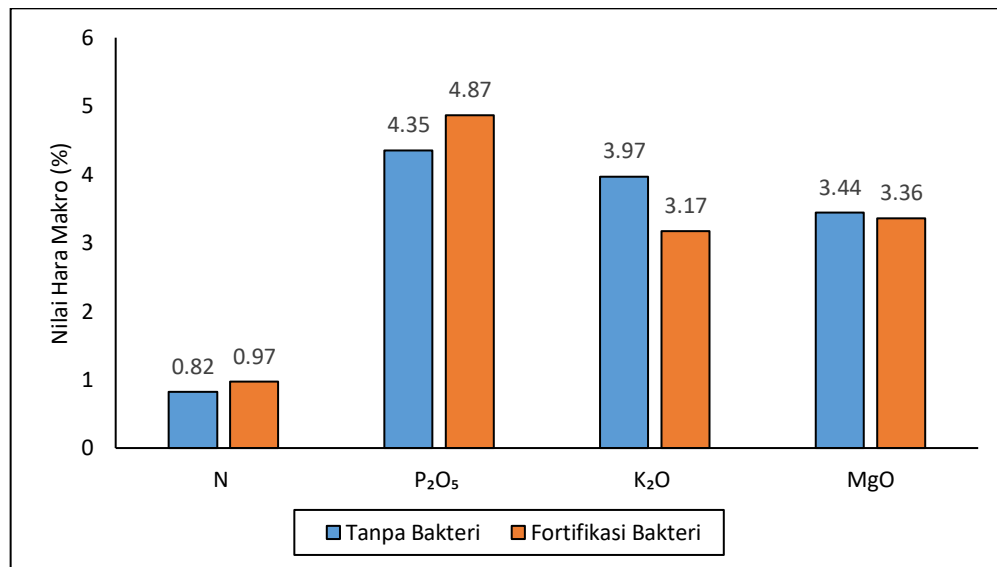
Gambar 1. pH, C-Organik dan C/N Ratio pupuk organik padat

Kandungan Unsur Hara Makro Pupuk Organik Padat

Penentuan nilai hara makro pada pupuk organik padat dilakukan dengan menentukan persentase hara makro N, P_2O_5 , K_2O , dan MgO sesuai dengan prosedur pada SNI 7763:2024. Hara makro merupakan unsur esensial yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah besar karena berperan sebagai penyusun utama jaringan tanaman serta penentu produktivitas tanah. Unsur hara makro utama meliputi nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), yang dikenal sebagai unsur NPK (Agrahari *et al.*, 2021). Berdasarkan hasil pengujian dapat diketahui bahwa kandungan nitrogen (N) pada pupuk sebesar 0,82% dan 0,97% pada pupuk tanpa bakteri dan pupuk dengan fortifikasi bakteri berturut-turut. Kandungan fosfor dalam bentuk P_2O_5 pada pupuk sebesar 4,35% dan 4,87% pada pupuk tanpa bakteri dan pupuk dengan fortifikasi bakteri berturut-turut. Kandungan kalium dalam bentuk K_2O pada pupuk sebesar 3,97% dan 3,17% pada pupuk tanpa bakteri dan pupuk dengan fortifikasi bakteri berturut-turut. Selain NPK, unsur hara makro sekunder seperti magnesium (Mg) juga penting bagi tanaman. Kandungan magnesium (Mg) pada pupuk sebesar 3,44% dan 3,36% pada pupuk tanpa bakteri dan pupuk dengan fortifikasi bakteri berturut-turut (Gambar 2).

Nitrogen berfungsi sebagai komponen utama dalam sintesis klorofil, asam amino, asam nukleat, dan protein, yang secara langsung mendorong pertumbuhan vegetatif

tanaman yang kuat dan hijau. Kekurangan nitrogen akan menyebabkan daun menguning dan pertumbuhan terhambat, sedangkan kelebihan nitrogen dapat menurunkan efisiensi penyerapan unsur lainnya. Fosfor berperan penting dalam pembentukan akar, transfer energi, fotosintesis, serta proses pembungaan dan pembuahan tanaman (Dikr, 2022). Kalium berfungsi dalam pengaturan keseimbangan air di jaringan tanaman, aktivasi enzim, serta peningkatan daya tahan tanaman terhadap stres lingkungan dan penyakit (Kumar *et al.*, 2024). Magnesium merupakan unsur pusat molekul klorofil yang berperan penting dalam proses fotosintesis dan transfer energi di dalam tanaman (Kirkby, 2023).

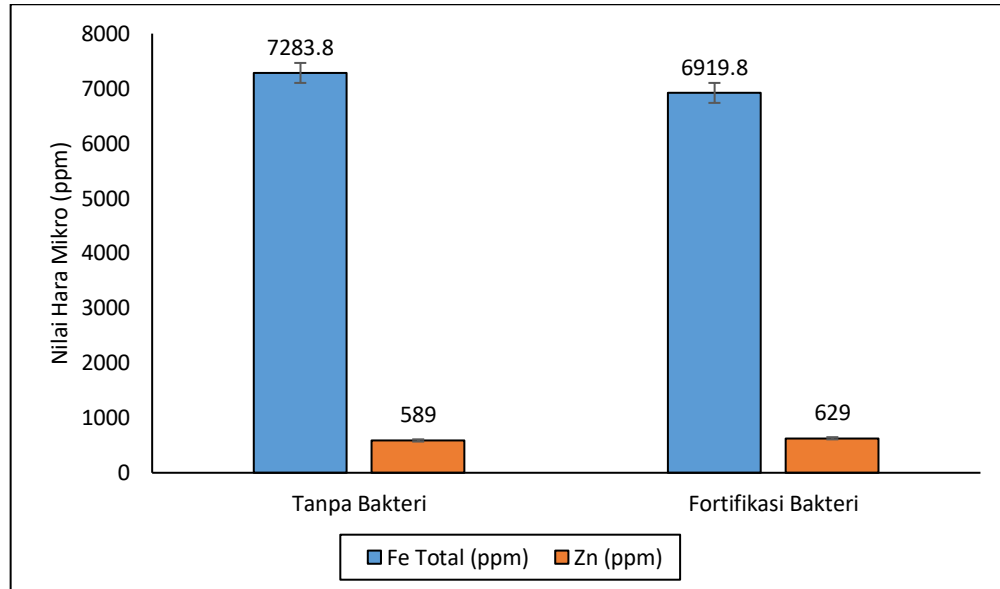


Gambar 2. Nilai Hara Makro pupuk organik padat

Kandungan Unsur Hara Mikro Pupuk Organik Padat

Penentuan nilai hara mikro pada pupuk organik padat dilakukan dengan menentukan persentase hara mikro Fe total dan Zn sesuai dengan prosedur pada SNI 7763:2024. Unsur hara mikro atau trace elements merupakan unsur hara yang walaupun dibutuhkan dalam jumlah kecil, memiliki fungsi vital dalam mendukung pertumbuhan dan metabolisme tanaman. Unsur hara mikro meliputi seng (Zn), tembaga (Cu), besi (Fe), boron (B), mangan (Mn), molibdenum (Mo), klorin (Cl), dan nikel (Ni) (Cakmak *et al.*, 2023; Kabiri *et al.*, 2017). Berdasarkan hasil pengujian dapat diketahui bahwa kandungan besi (Fe) total pada pupuk sebesar 7283,8 ppm dan 6919,8 ppm pada pupuk tanpa bakteri dan pupuk dengan fortifikasi bakteri berturut-turut. Sementara itu, kandungan seng (Zn) pada pupuk sebesar 589 ppm dan 629 ppm pada pupuk tanpa bakteri dan pupuk dengan fortifikasi bakteri berturut-turut (Gambar 3). Unsur hara mikro besi (Fe) dan seng (Zn) sangat penting bagi pertumbuhan tanaman. Besi (Fe) diperlukan untuk sintesis klorofil dan

proses respirasi (Cakmak *et al.*, 2023). Seng (Zn) berperan dalam pembentukan hormon pertumbuhan dan pemeliharaan sistem perakaran serta meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan (Cakmak *et al.*, 2023).



Gambar 3. Nilai Hara Mikro pupuk organik padat

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian pembuatan pupuk organik padat dengan fortifikasi bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat diperoleh kandungan produk antara lain: Nitrogen (N): 0,97%, Fosfor (P): 4,87%, Kalium (K_2O): 3,17%, Magnesium (MgO): 3,36% Karbon Organik (C): 17,64%, Besi (Fe): 6919,8 ppm dan Seng (Zn): 629 ppm. Nilai mutu kimia untuk parameter Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Karbon Organik (C) lebih tinggi jika dibandingkan dengan formulasi tanpa fortifikasi bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat. Kandungan tersebut memenuhi persyaratan mutu pupuk organik berdasarkan SNI 7763:2024. Saran pengembangan pada penelitian lanjutan yaitu perlu dilakukan pengujian produk pupuk organik terhadap respon tanaman serta perubahan hara dan mikrofauna tanah setelah aplikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Yayasan Nasional Pendidikan Tridinanti dan LPPM Universitas Tridinanti Yang telah memberikan pendanaan untuk kegiatan Penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrazik, A., Elsholkami, M., Elkamel, A., & Simon, L. (2017). Multi-products productions from Malaysian oil palm empty fruit bunch (EFB): Analyzing economic potentials from the optimal biomass supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 168, 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.088>
- Abnisa, F., Arami-Niya, A., Wan Daud, W. M. A., Sahu, J. N., & Noor, I. M. (2013). Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, 76, 1073–1082. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.038>
- Acquah, C., Sie Yon, L., Tuah, Z., Ling Ngee, N., & Danquah, M. K. (2016). Synthesis and performance analysis of oil palm ash (OPA) based adsorbent as a palm oil bleaching material. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1098–1104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.004>
- Agrahari, R. K., Kobayashi, Y., Tanaka, T. S. T., Panda, S. K., & Koyama, H. (2021). Smart fertilizer management: the progress of imaging technologies and possible implementation of plant biomarkers in agriculture. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(3), 248–258. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1897479>
- Badan Standardisasi Nasional. (2024). *SNI 7763-2024 Pupuk Organik Padat*.
- Cakmak, I., Brown, P., Colmenero-Flores, J. M., Husted, S., Kutman, B. Y., Nikolic, M., Rengel, Z., Schmidt, S. B., & Zhao, F.-J. (2023). Micronutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Plants* (pp. 283–385). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00017-4>
- Dikr, W. (2022). Effects of Phosphorus Fertilizer on Agronomic, Grain Yield and Other Physiological Traits of Some Selected Legume Crops. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. <https://doi.org/10.7176/JBAH/12-12-01>
- Dominguez, E. L., Uttran, A., Loh, S. K., Manero, M.-H., Upperton, R., Idris Tanimu, M., & Thomas Bachmann, R. (2020). Characterisation of industrially produced oil palm kernel shell biochar and its potential as slow release nitrogen-phosphate fertilizer and carbon sink. *Materials Today: Proceedings*, 31, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.143>
- El Idrissi, A., El Gharrak, A., Achagri, G., Essamlali, Y., Amadine, O., Akil, A., Sair, S., & Zahouily, M. (2022). Synthesis of urea-containing sodium alginate-g-poly(acrylic acid-co-acrylamide) superabsorbent-fertilizer hydrogel reinforced with carboxylated cellulose nanocrystals for efficient water and nitrogen utilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108282. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108282>
- Ibrahim, N. R., Ahmad, R., Wan Ahmad, W. A. A., Vikneswaran, V., Santiagoo, R., Mohammed, S. A., Khalid, A. F., & Ani, A. Y. (2023). Bio-Char And Bio-Oil Production From Pyrolysis of Palm Kernel Shell And Polyethylene. *International Journal of Conservation Science*, 14(2), 705–712. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2023.02.22>

- Idris, S. S., Rahman, N. A., & Ismail, K. (2012). Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*, 123, 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.065>
- Jiang, Z., Vancov, T., Fang, Y., Tang, C., Zhang, W., Xiao, M., Song, X., Zhou, J., Ge, T., Cai, Y., Yu, B., White, J. C., & Li, Y. (2025). Sustained superiority of biochar over straw for enhancing soil biological-phosphorus via the mediation of phoD-harboring bacteria in subtropical Moso bamboo forests. *Forest Ecology and Management*, 584, 122606. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122606>
- Kabiri, S., Degryse, F., Tran, D. N. H., da Silva, R. C., McLaughlin, M. J., & Losic, D. (2017). Graphene Oxide: A New Carrier for Slow Release of Plant Micronutrients. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(49), 43325–43335. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b07890>
- Kirkby, E. A. (2023). Introduction, definition, and classification of nutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Plants* (pp. 3–9). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00016-2>
- Kumar, S. A., Kaniganti, S., Hima Kumari, P., Sudhakar Reddy, P., Suravajhala, P., P, S., & Kishor, P. B. K. (2024). Functional and biotechnological cues of potassium homeostasis for stress tolerance and plant development. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 40(4), 3527–3570. <https://doi.org/10.1080/02648725.2022.2143317>
- Kumar, V., Maity, A., Kumar, A., Saha, S., Kay, P., Singh, B., & Mukherjee, T. (2023). Critical review on uranium and arsenic content and their chemical mobilization in groundwater: A case study of the Malwa region Punjab, India. *Science of The Total Environment*, 885, 163885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163885>
- Lazali, M., & Bargaz, A. (2017). Examples of Belowground Mechanisms Enabling Legumes to Mitigate Phosphorus Deficiency. In *Legume Nitrogen Fixation in Soils with Low Phosphorus Availability* (pp. 135–152). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55729-8_7
- Li, J., Wen, Y., Li, X., Li, Y., Yang, X., Lin, Z., Song, Z., Cooper, J. M., & Zhao, B. (2018). Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 175, 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.008>
- Li, M., Zhao, X., Cheng, Y., Wu, M., Dong, C., Xiang, H., Li, Y., Cai, Y., Zhang, Z., & Yu, B. (2025). Zinc oxide nanoparticles coupled biochar-based slow-release fertilizer for enhanced nutrient efficiency and sustainable agriculture. *Industrial Crops and Products*, 232, 121265. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121265>
- McDonald, R. I., Mansur, A. V., Ascensão, F., Colbert, M., Crossman, K., Elmqvist, T., Gonzalez, A., Güneralp, B., Haase, D., Hamann, M., Hillel, O., Huang, K., Kahnt, B., Maddox, D., Pacheco, A., Pereira, H. M., Seto, K. C., Simkin, R., Walsh, B., ... Ziter, C. (2019). Research gaps in knowledge of the impact of urban growth on biodiversity. *Nature Sustainability*, 3(1), 16–24. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0436-6>

- Nabila, R., Hidayat, W., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Lee, S., Kim, S., Kim, S., Chun, D., Choi, H., Im, H., Lim, J., Kim, K., Jun, D., Moon, J., & Yoo, J. (2023). Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading and its utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113193>
- Pandebesie, E. S., & Rayuanti, D. (2013). Pengaruh Penambahan Sekam Pada Proses Pengomposan Sampah Domestik. *Jurnal Lingkungan Tropis. Jurnal Lingkungan Tropis*, 6(1), 31–40.
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- Timmusk, S., Behers, L., Muthoni, J., Muraya, A., & Aronsson, A.-C. (2017). Perspectives and Challenges of Microbial Application for Crop Improvement. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00049>
- Widarti, B. N., Wardhini, W. K., & Sarwono, E. (2015). PENGARUH RASIO C/N BAHAN BAKU PADA PEMBUATAN KOMPOS DARI KUBIS DAN KULIT PISANG. *Jurnal Integrasi Proses*, 5, 75–80.
- Zhu, F., Qu, L., Hong, X., & Sun, X. (2011). Isolation and Characterization of a Phosphate-Solubilizing Halophilic Bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao Saltern on the Coast of Yellow Sea of China. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2011(1). <https://doi.org/10.1155/2011/615032>