

## UJI EFEKTIVITAS PUPUK GRANULAR ORGANIK LEPAS-LAMBAT BERBASIS BIOCHAR TERMODIFIKASI DAN ASAM HUMAT TERHADAP POLA PELEPASAN HARA PADA TANAMAN KACANG HIJAU

Rupa Matheus<sup>1)\*</sup> dan Donatus Kantur<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Penyuluhan Pertanian Lahan Kering, Politeknik Pertanian Negeri Kupang  
Jalan. Prof. Dr. Herman Yohanes, Lasiana, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur

\*e-mail koresponden: [matheusrupa@yahooo.com](mailto:matheusrupa@yahooo.com)

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas pupuk granular organik lepas-lambat berbasis biochar termodifikasi dan asam humat-mikroba terhadap pola pelepasan unsur hara makro (N, P, K) pada tanaman kacang hijau (*Vigna radiata* L.). Percobaan dilakukan dengan rancangan acak lengkap lima perlakuan dan tiga ulangan, menggunakan formula F0-F4 dengan proporsi biochar dan asam humat yang berbeda. Parameter utama yang diamati meliputi pola pelepasan nitrogen, fosfor, dan kalium selama 60 hari inkubasi, diukur secara berkala dengan metode Kjeldahl, Bray-1, dan  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1 M. Hasil menunjukkan bahwa formula F4 (50% bokashi + 30% biochar termodifikasi + 10% asam humat + 10% aditif) memberikan pola pelepasan hara paling efisien dan stabil. Sinergi ketiga komponen tersebut membentuk sistem multi-mekanisme slowrelease yang menekan kehilangan hara, memperpanjang ketersediaan nutrisi, dan memperbaiki keseimbangan kimia-biologi tanah. Potensi biochar-humat-mikroba mendukung efisiensi pemupukan, mengurangi ketergantungan pupuk kimia hingga 30–50%, serta berkontribusi pada keberlanjutan kesuburan lahan kering di Indonesia.

**Kata kunci:** Biochar termodifikasi, Asam humat, Pupuk organik lepas-lambat, Pelepasan hara, Kacang hijau.

### ABSTRACT

This study evaluates the effectiveness of slow-release organic granular fertilizer made from modified biochar and humic acid-microbes on macro-nutrient (N, P, K) release patterns in mung bean (*Vigna radiata* L.). A completely randomized design with five treatments (F0–F4) and three replications was used, varying biochar and humic acid proportions. Nutrient release patterns were observed over 60 days using Kjeldahl, Bray-1, and 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  methods. Results showed F4 (50% bokashi + 30% modified biochar + 10% humic acid + 10% additives) provided the most efficient and stable nutrient release. The synergy of these components creates a multi-mechanism slow-release system that minimizes nutrient loss, prolongs availability, and improves soil chemical-biological balance. This biochar-humic acid-microbe combination enhances fertilizer efficiency, reduces chemical fertilizer dependence by 30–50%, and supports sustainable dryland soil fertility in Indonesia.

**Keywords:** Modified biochar; Humic acid; Slow-release organic fertilizer; Nutrient release; Mung bean.

---

## PENDAHULUAN

Sistem pertanian konvensional saat ini menghadapi tantangan besar berupa degradasi kesuburan tanah yang mengancam kapasitas produksi dan keberlanjutan sistem pangan (Matheus *et al.*, 2024). Praktik penggunaan pupuk anorganik secara intensif dan terus-menerus telah menyebabkan penurunan bahan organik tanah, gangguan struktur agregat, penurunan aktivitas mikroba tanah, serta peningkatan kehilangan unsur hara melalui *eaching* dan *volatilitas* (terutama unsur nitrogen) (Gao *et al.*, 2022). Selain itu, penggunaan pupuk kimia yang berlebihan cenderung meningkatkan keasaman, penurunan C-organik jangka panjang, dan mengganggu keseimbangan kimia tanah (Santos *et al.*, 2025). Dalam konteks ini, ketergantungan tinggi pada pupuk kimia telah menjadi beban lingkungan dan ekonomi, terutama pada lahan kering yang rentan degradasi (Matheus *et al.*, 2024).

Sebagai upaya mitigasi, pupuk organik terbukti berperan penting dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah. Pemakaian bahan organik seperti kompos, pupuk kandang, dan sisa tanaman dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur dan porositas, serta mendukung pertumbuhan mikroorganisme (Zhao *et al.*, 2025). Namun demikian, kelemahan utama pupuk organik konvensional adalah kadar hara makro yang relatif rendah, serta pola pelepasan unsur hara yang cepat atau tidak terkendali, sehingga sering kali tidak sesuai (sinkronisasi) dengan kebutuhan tanaman selama fase pertumbuhan (Matheus *et al.*, 2017). Nutrien yang dilepaskan terlalu cepat bisa hilang sebelum diserap tanaman, sedangkan yang tersisa tidak memenuhi kebutuhan pada fase pertumbuhan selanjutnya, menurunkan efisiensi pemupukan.

Dalam rangka mengatasi kelemahan tersebut, dibutuhkan pendekatan teknologi inovatif untuk meningkatkan efisiensi dan nilai tambah pupuk organik. Salah satu strategi yang menjanjikan adalah formulasi pupuk granular organik dengan penambahan biochar termodifikasi, asam humat, dan mikroba fungsional. Biochar, hasil pirolisis biomassa organik, memiliki struktur berpori dan luas permukaan tinggi yang memungkinkan adsorpsi nutrien secara efektif dan

---

berfungsi sebagai matriks pembawa mikroba tanah (Lehmann & Joseph, 2015). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biochar mampu meningkatkan kapasitas tukar kation dan mempertahankan nutrisi di zona perakaran lebih lama (Matheus *et al.*, 2017; Susilowati *et al.*, 2021). Sementara itu, asam humat sebagai senyawa organik kompleks hasil dekomposisi bahan organik dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara dan mempercepat aktivitas mikroorganisme pelarut fosfat (Setyorini *et al.*, 2018; Dewi & Prasetya, 2020). Kombinasi ini dapat ditingkatkan lebih lanjut melalui inokulasi mikroba fungsional seperti *Azotobacter*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* yang mampu memperbaiki kesuburan tanah melalui pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, dan sintesis hormon tanaman (Kavitha *et al.*, 2020). Penelitian mengenai pupuk berbasis biochar dan humat telah berkembang, namun masih terbatas pada aplikasi biochar atau humat secara parsial.

Untuk itu, formula pupuk granular dengan pendekatan multi-komponen ini diharapkan mampu menjawab tantangan utama dalam penggunaan pupuk organik, yaitu rendahnya efisiensi pelepasan hara dan keterbatasan dalam memperbaiki kondisi tanah secara holistik. Dalam bentuk granular, pupuk menjadi lebih mudah dikemas, disimpan, dan diaplikasikan secara presisi di lapangan, serta memiliki umur simpan yang lebih panjang. Beberapa studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan mikroba dapat meningkatkan hasil panen dan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia hingga 30–50% (Zulkarnaen *et al.*, 2021; Kurniawan *et al.*, 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas formula pupuk granular organik lepas-lambat berbasis biochar termodifikasi dan asam humat-mikroba terhadap pola pelepasan unsur hara pada tanaman kacang hijau. Implikasi dari penelitian ini adalah penyediaan teknologi pupuk organik yang lebih efisien dan ramah lingkungan, dengan potensi mengurangi penggunaan pupuk kimia dan memperbaiki kondisi kesuburan tanah secara berkelanjutan.

---

## METODE PENELITIAN

### Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di screen house Politeknik pertanian Negeri Kupang, pada bulan Mei sampai bulan Juli 2025. Analisis kimia tanah untuk mengevaluasi pelepasan hara pada berbagai formula pupuk granul dilakukan di Laboratorium Kimia Tanah, Fakultas Pertanian IPB Bogor. Penelitian dirancang dalam bentuk percobaan pot dengan menggunakan tanaman indikator kacang hijau (*Vigna radiata* L.), yang dipilih karena memiliki siklus hidup relatif singkat dan responsif terhadap ketersediaan hara, sehingga cocok untuk menguji efisiensi pupuk. Percobaan disusun menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan lima perlakuan dan tiga ulangan. Formula pupuk granul yang diuji adalah: F0 (Pupuk organik konvensional); F1 (70% bokashi, 15% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); F2 (65% bokashi, 20% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); F3 (60% bokashi, 25% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); dan F4: 50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, dan 10% bahan tambahan.

### Pelaksanaan Penelitian

Penelitian diawali dengan modifikasi biochar menggunakan teknik impregnasi (muatan hara) untuk menjadikan biochar sebagai carrier (pembawa) unsur hara makro dan mikro. Proses impregnasi dilakukan dengan merendam biochar ke dalam larutan nutrisi yang mengandung unsur N, P, dan K, atau ke dalam larutan pupuk organik cair (POC) yang berasal dari ekstrak daun leguminosa. Perendaman dilakukan selama 24 jam, kemudian biochar dikeringkan hingga mencapai kadar air rendah. Biochar termodifikasi ini berfungsi sebagai pembawa hara lepas-lambat (slow-release carrier) bagi unsur N, P, dan K. Selanjutnya dilakukan formulasi sesuai perlakuan yang telah ditetapkan, diikuti dengan pembuatan pupuk granular organik. Pupuk granular organik tersebut diaplikasikan ke dalam pot dengan dosis setara 5 ton ha<sup>-1</sup>, sebelum tanam, kemudian diaduk merata dengan tanah. Benih kacang hijau ditanam pada pot yang telah diberi perlakuan. Pemeliharaan dilakukan sesuai prosedur standar,

meliputi penyiraman dan pengendalian hama secara manual, tanpa penambahan pupuk lain, agar efek perlakuan terhadap pelepasan hara dapat diamati secara murni.

### **Parameter Percobaan**

Parameter yang diamati dalam penelitian ini difokuskan pada pola pelepasan hara (N, P, K) dari pupuk granular. Metode pengukuran pola pelepasan hara dari pupuk granular organik lepas-lambat ditentukan melalui inkubasi pupuk di dalam tanah yang diukur secara berkala (mingguan) selama 60 hari yang dilakukan secara paralel dengan percobaan pot tanaman kacang hijau. Caranya sampel tanah yang telah disiapkan, diayak dengan saringan 2 mm untuk menghilangkan kerikil dan sisa akar, kemudian dikeringanginkan hingga kadar air konstan. Sebanyak 200 g tanah kering dimasukkan ke dalam wadah inkubasi plastik (berbentuk gelas pot), kemudian diberi aplikasi pupuk granular organik sesuai perlakuan (F0–F4) yang setara dengan kebutuhan N, P, dan K kacang hijau. Tanah diinkubasi dalam kondisi kelembaban setara 60% kapasitas lapang untuk mendekati kondisi alami di lapangan. Kelembaban dipertahankan dengan penyemprotan air steril setiap dua hari untuk mencegah kehilangan kelembaban yang berlebihan. Wadah inkubasi disimpan pada suhu ruang laboratorium ( $\pm 28^\circ\text{C}$ ) tanpa pencucian untuk mensimulasikan ketersediaan hara di lapisan atas tanah. Selanjutnya sampel tanah diambil secara berkala setiap minggu (minggu ke-0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, dan 12) menggunakan sendok steril, masing-masing  $\pm 5$  g tanah dari tiap wadah inkubasi. Sampel segar diekstraksi dengan larutan ekstraktor sesuai jenis hara Nitrogen tersedia ditentukan dengan metode Kjeldahl. Fosfor tersedia diekstraksi menggunakan larutan Bray-1, dan Kalium tersedia diekstraksi menggunakan  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1 M pH 7 dan diukur dengan Flame Photometer atau AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer). Nilai pelepasan hara untuk setiap unsur dinyatakan dalam  $\text{mg kg}^{-1}$  tanah atau sebagai persentase relatif terhadap total hara dalam pupuk. Data hasil pengukuran pada setiap waktu pengamatan digunakan untuk menyusun kurva pola pelepasan hara (N, P, K) sepanjang periode pengamatan. Untuk memastikan hasil pengukuran dapat dibandingkan antarperlakuan, setiap titik waktu pengamatan dilakukan

dengan tiga ulangan dan hasilnya dianalisis secara statistik menggunakan analisis ragam (ANOVA).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini ditujukan untuk mengukur pola pelepasan hara makro (N, P, K) dari beberapa formulasi pupuk granular organik lepas-lambat berbasis biochar termodifikasi dan asam humat-mikroba (F1–F4) dibandingkan pupuk organik konvensional (F0). Pengamatan pelepasan hara dilakukan secara berkala selama 60 hari pada media pot dengan tujuan untuk mengevaluasi kemampuan pupuk mempertahankan ketersediaan hara secara sinkron dengan kebutuhan tanaman.

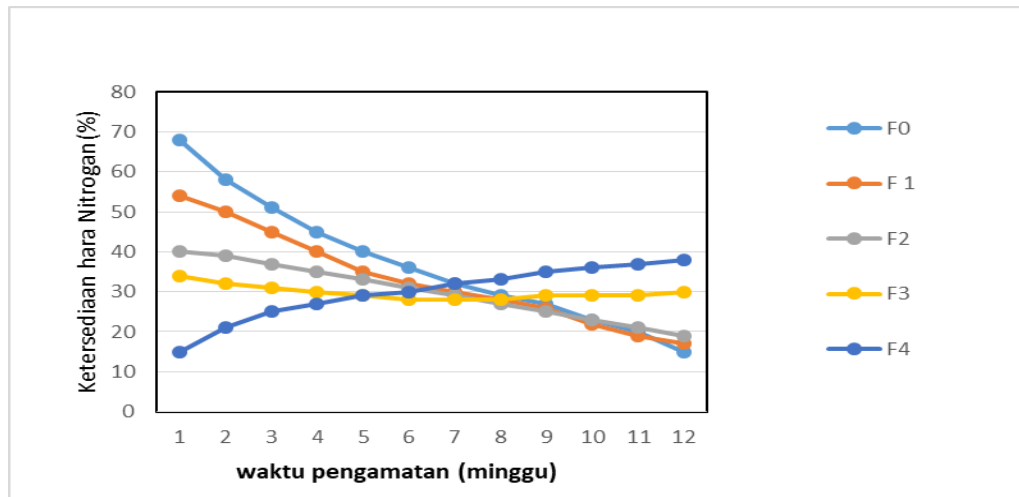
Pola pelepasan hara yang dihasilkan menjadi indikator penting untuk memahami efektivitas slow-release fertilizer. Pupuk yang baik diharapkan memiliki pelepasan awal yang moderat, diikuti pelepasan hara yang stabil dalam jangka panjang. Pupuk organik konvensional (F0) sering kali menunjukkan pelepasan hara yang cepat di awal tetapi cepat menurun sehingga efisiensi pemupukan rendah (Gao *et al.*, 2022). Kehadiran biochar termodifikasi, asam humat, dan mikroba fungsional dalam formulasi granular diharapkan dapat mengubah pola tersebut menjadi lebih terkendali dan berkelanjutan (Matheus & Kantur, 2025; Ali *et al.*, 2025).

### ***Pola Pelepasan Nitrogen (N)***

Nitrogen (N) merupakan hara makro paling dinamis di tanah karena terlibat dalam serangkaian transformasi (amonifikasi, nitrifikasi, imobilisasi) dan rentan hilang melalui volatilisasi  $\text{NH}_3$ , denitrifikasi ( $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ ), serta pencucian  $\text{NO}_3^-$ . Oleh karena itu, strategi slow-release yang mengombinasikan biochar termodifikasi (penyerap/penyangga kation), asam humat (kompleksan & stimulator mikroba), dan mikroba fungsional berpotensi menyinkronkan ketersediaan N dengan kebutuhan tanaman kacang hijau sepanjang siklus 60 hari. Dalam penelitian ini, pola pelepasan N dimonitor secara berkala pada sistem inkubasi tanah paralel dengan percobaan pot, menggunakan metode Kjeldahl untuk pengukuran N-tersedia. Pendekatan ini tepat untuk memetakan kinetika pelepasan N dari

---

granul organik lepas-lambat dan membedakan respons antar formula (F0–F4). Pola pelepasan hara nitrogen (N) disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pola Pelepasan Nitrogen (N) dari Berbagai Formula Pupuk Granular Organik Lepas-Lambat selama 60 Hari Inkubasi

**Keterangan:** F0 (Pupuk organik konvensional); F1 (70% bokashi, 15% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan; F2 (65% bokashi, 20% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan; F3 (60% bokashi, 25% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); dan F4: 50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, dan 10% bahan tambahan.

Hasil pengukuran (Gambar 1) menunjukkan bahwa pelepasan N pada F0 (bokashi konvensional) sangat tinggi pada minggu pertama hingga kedua, lebih dari 60% dari total N tersedia, tetapi menurun tajam setelah minggu ketiga. Pola ini mencerminkan lonjakan awal (initial burst) akibat mineralisasi cepat bahan organik tanpa penyangga, sehingga sebagian N mudah hilang melalui pencucian atau volatilisasi dan berisiko tidak sinkron dengan fase kebutuhan vegetatif (Kavitha *et al.*, 2020).

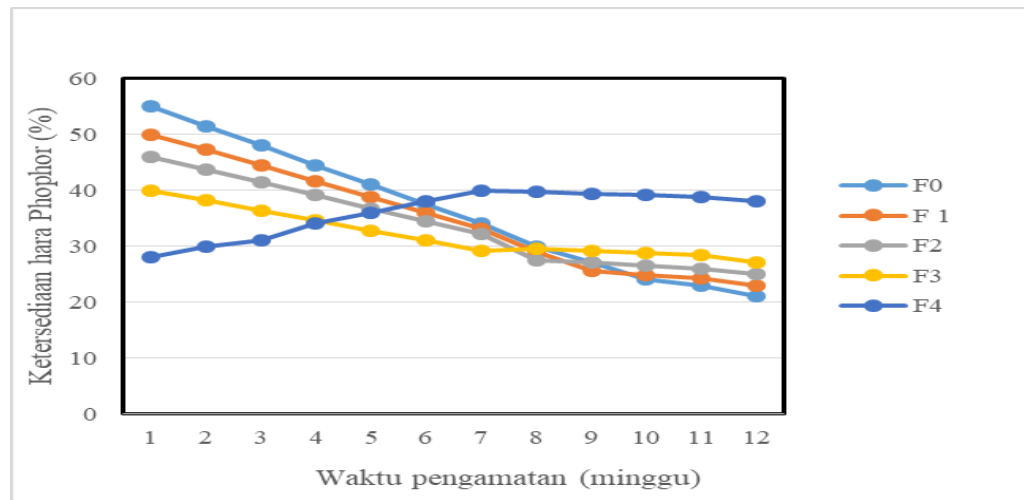
Formula F1, F2, dan F3 menunjukkan pelepasan yang lebih tertahan seiring meningkatnya proporsi biochar termodifikasi, tercermin dari fase pelepasan bertahap (gradual release) yang lebih panjang dan kemiringan kurva yang lebih landai di awal inkubasi. Sementara itu, formula F4 (50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, 10% aditif) memperlihatkan pelepasan N yang paling stabil dan merata: laju awal cukup rendah untuk meminimalkan kehilangan, diikuti pelepasan bertahap yang mempertahankan ketersediaan N hingga mendekati akhir fase pertumbuhan kacang hijau (sekitar 60 hari).

Profil pada perlakuan F4 ini mencerminkan sinkronisasi pasokan N dengan kebutuhan tanaman yang meningkat pada fase vegetatif hingga generatif awal, kemudian melambat menjelang pematangan. Secara mekanistik, hasil tersebut sejalan dengan literatur, antara lain: (i) Peran biochar dalam menahan dan melepaskan N secara bertahap disebabkan oleh luas permukaan dan kapasitas tukar kation (KTK) yang tinggi, sehingga mampu menyerap dan mempertahankan amonium serta nitrat di zona perakaran (Chen *et al.*, 2022; Che *et al.*, 2024; Ali *et al.*, 2025). (ii) Kombinasi asam humat (5%) yang bersifat relatif konstan di semua perlakuan membantu memperlambat transformasi N dengan mengikat ion amonium serta menstimulasi aktivitas mikroba yang memineralisasi bahan organik secara bertahap (Santos *et al.*, 2025). (iii) Konsorsium mikroba mendorong mineralisasi N secara bertahap dan stabil, sehingga profil kurva menjadi lebih landai dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, pola pelepasan F4 yang lambat namun stabil sangat relevan untuk kacang hijau, yang membutuhkan N meningkat pada fase vegetatif awal hingga pembungaan. Dengan menahan initial burst dan memperpanjang ketersediaan N, F4 secara teoritis meminimalkan trade-off antara kehilangan N dan kekurangan N pada fase berikutnya, sehingga meningkatkan sinkronisasi suplai-permintaan N di lapangan. Rancangan dan metode uji pola pelepasan N—inkubasi 60 hari paralel dengan uji pot, pengukuran berkala berbasis Kjeldahl, dan analisis ragam—mendukung inferensi tersebut dan selaras dengan praktik terbaik studi kinetika pelepasan hara.

### **Pola Pelepasan Hara Phosphor**

Fosfor (P) merupakan unsur hara esensial yang berperan penting dalam proses fotosintesis, pembentukan energi (ATP), serta pertumbuhan akar dan pembungaan pada tanaman. Namun, ketersediaan P dalam tanah tropis seringkali rendah karena terfiksasi kuat oleh kation  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Al}^{3+}$  pada tanah masam atau  $\text{Ca}^{2+}$  pada tanah alkalis. Dalam konteks ini, penerapan pupuk organik berbasis biochar termodifikasi dan asam humat menjadi strategi inovatif untuk meningkatkan efisiensi pelepasan serta ketersediaan P di zona perakaran.. Pola pelepasan P ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola Pelepasan Phosphor (P) dari Berbagai Formula Pupuk Granular Organik Lepas-Lambat selama 60 Hari Inkubasi

**Keterangan:** F0 (Pupuk organik konvensional); F1 (70% bokashi, 15% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan; F2 (65% bokashi, 20% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan; F3 (60% bokashi, 25% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); dan F4: 50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, dan 10% bahan tambahan.

Hasil pengukuran (Gambar 2) menunjukkan bahwa pelepasan P mengikuti kurva yang diawali dengan fase lambat, kemudian meningkat secara bertahap, dan mencapai stabilitas pada fase akhir inkubasi. Pada perlakuan F0 (pupuk organik konvensional), pelepasan P tinggi pada minggu pertama akibat dekomposisi cepat bahan organik mudah larut, namun mengalami penurunan tajam setelah minggu ketiga akibat fiksasi dan pencucian. Sebaliknya, formula F1, F2, dan F3 menampilkan pelepasan P yang lebih terkendali, di mana peningkatan proporsi biochar memperlambat laju pelepasan awal sekaligus mempertahankan ketersediaan P hingga minggu keenam.

Formula F4 (50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, 10% aditif) menunjukkan pola pelepasan P paling ideal, dengan konsentrasi P meningkat secara bertahap hingga mencapai puncak pada minggu ke-4 hingga ke-6, dan bertahan stabil hingga minggu ke-10. Pola ini menunjukkan bahwa kombinasi biochar termodifikasi dan asam humat mampu mempertahankan bentuk P tersedia ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  dan  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) dalam larutan tanah secara berkelanjutan. Temuan ini sejalan dengan laporan Qi *et al.*, (2025), yang menunjukkan bahwa

biochar berpori tinggi dapat menahan fosfat melalui mekanisme ligand exchange dan adsorpsi elektrostatis, sehingga mengurangi kehilangan P hingga 40%. Liu *et al.*, (2024) juga melaporkan bahwa kombinasi asam humat dan biochar menurunkan fiksasi P oleh Al/Fe oksida melalui pembentukan kompleks organo-metalik stabil, tetap tersedia bagi tanaman. Selain itu, aktivitas mikroba pelarut fosfat meningkat sebesar 25–30% pada sistem biochar–humat dibanding kontrol tanpa biochar, yang menjelaskan pelepasan P yang lebih konsisten selama periode inkubasi.

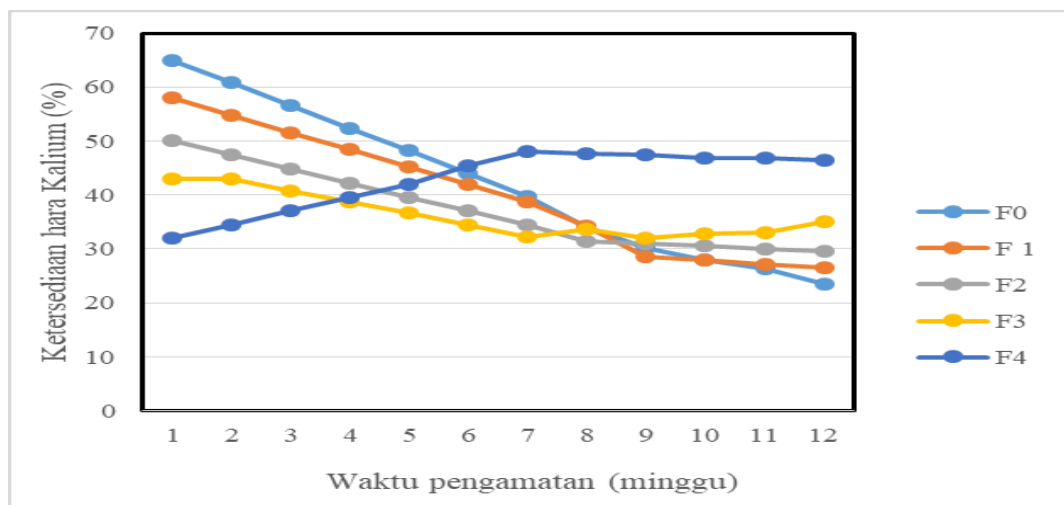
Keefektifan F4 dalam mengatur pelepasan fosfor dapat dijelaskan oleh beberapa mekanisme sinergis. Biochar termodifikasi berfungsi sebagai reservoir P yang melepaskan ion fosfat secara bertahap melalui desorpsi, mencegah “burst release” seperti pada F0. Gugus karboksilat dan fenolat dalam asam humat membentuk kompleks dengan Fe dan Al, menghambat pembentukan  $\text{FePO}_4$  atau  $\text{AlPO}_4$  yang tidak larut (Lehmann *et al.*, 2021). Selain itu, mikroba yang terinkubasi pada matriks biochar memproduksi asam organik (sitrat, oksalat), yang melarutkan P terfiksasi dan memperpanjang pelepasan P tersedia.

Fenomena serupa dilaporkan oleh Zhang *et al.*, (2025), yang menunjukkan bahwa kombinasi biochar–humic acid meningkatkan ketersediaan P sebesar 31% dan efisiensi pemanfaatan P oleh tanaman legum sebesar 24% dibanding pupuk organik konvensional. Secara ilmiah, hasil ini menegaskan bahwa pelepasan fosfor dari pupuk organik granular dapat dikendalikan melalui pendekatan multi-komponen biochar–humat–mikroba, bekerja sinergis pada tiga level: kimia (kompleksasi dan adsorpsi), fisika (difusi melalui pori biochar), dan biologi (pelarutan fosfat oleh mikroba). Secara praktis, formulasi F4 berpotensi menurunkan kebutuhan pupuk SP-36 hingga 30%, meningkatkan efisiensi hara fosfor, dan mengurangi akumulasi P tak tersedia pada tanah masam tropis. Temuan ini sangat relevan untuk sistem pertanian lahan kering di Nusa Tenggara Timur, di mana ketersediaan P sering menjadi faktor pembatas utama produktivitas tanaman legum, seperti kacang hijau.

---

### Pola Pelepasan Hara Kalium

Kalium (K) merupakan unsur hara makro yang berperan vital dalam proses fisiologis tanaman seperti osmoregulasi, fotosintesis, pembukaan stomata, transpor fotosintat, dan ketahanan terhadap cekaman kekeringan. Berbeda dengan nitrogen dan fosfor, unsur K banyak terlibat dalam reaksi biokimia. Kalium lebih berfungsi sebagai ion fungsional yang mudah berpindah dalam larutan tanah. Akibatnya, K sangat rentan terhadap pencucian (leaching), terutama pada tanah berpasir atau lahan kering dengan curah hujan tinggi seperti wilayah Nusa Tenggara Timur. Oleh karena itu, strategi formulasi pupuk organik lepas-lambat berbasis biochar termodifikasi dan asam humat menjadi penting untuk menahan K dalam zona perakaran dan mengatur laju pelepasannya agar selaras dengan fase pertumbuhan tanaman kacang hijau. Pola pelepasan hara K pada tanaman kacang hijau ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pola Pelepasan Kalium (K) dari Berbagai Formula Pupuk Granular Organik Lepas-Lambat selama 60 Hari Inkubasi

**Keterangan:** F0 (Pupuk organik konvensional); F1 (70% bokashi, 15% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); F2 (65% bokashi, 20% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); F3 (60% bokashi, 25% biochar termodifikasi, 5% asam humat, dan 10% bahan tambahan); dan F4: 50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, dan 10% bahan tambahan

Hasil pengukuran terhadap kurva pelepasan K (Gambar 3), menunjukkan pola yang khas: peningkatan bertahap sejak minggu ke-1 hingga ke-4, diikuti fase stabil hingga akhir periode inkubasi (minggu ke-10–12). Pada perlakuan F0 (pupuk organik konvensional), pelepasan K terjadi sangat cepat pada minggu

pertama akibat pelarutan mineral mudah larut dari bahan organik segar, namun menurun tajam setelah minggu ke-3 karena kehilangan melalui pencucian. Sementara itu, F1, F2 dan F3 memperlihatkan pelepasan K yang lebih moderat dan terkontrol, dengan laju pelepasan awal menurun seiring bertambahnya proporsi biochar termodifikasi. Perlakuan F4 (50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, 10% bahan tambahan) menunjukkan pola pelepasan paling efisien dan stabil. Konsentrasi K tersedia meningkat perlahan dan mencapai puncak pada minggu ke-4–6, kemudian menurun sedikit dan bertahan konstan hingga akhir pengamatan. Pola ini mengindikasikan bahwa kombinasi biochar dan asam humat berfungsi efektif sebagai *slow-release matrix*, menahan  $K^+$  dalam pori-pori biochar dan melepaskannya melalui difusi lambat seiring penurunan gradien konsentrasi di larutan tanah.

Gambar 3 menunjukkan secara konsisten, Formula atau perlakuan F4 merupakan perlakuan terbaik dalam mengatur pola pelepasan K. Hal ini karena permukaan biochar termodifikasi kaya akan gugus fungsional  $-COO^-$  dan  $-OH$ , yang mampu mengadsorpsi kation  $K^+$  melalui interaksi elektrostatis dan pertukaran ion. Hal ini menurunkan kehilangan K akibat pencucian sekaligus memperpanjang waktu tinggal K di zona rizosfer (*retarded leaching effect*). Penelitian Zhou *et al.* (2023), mengonfirmasi bahwa biochar termodifikasi logam alkali meningkatkan kapasitas adsorpsi  $K^+$  sebesar 40% dibanding biochar mentah. Selain itu adanya peran asam humat dalam meningkatkan KTK tanah. Gugus karboksilat dan fenolat pada asam humat memperluas kompleks pertukaran kation di tanah, sehingga meningkatkan kemampuan tanah menahan  $K^+$  tanpa menghambat ketersediaannya bagi akar tanaman. Studi Gao *et al.* (2024) membuktikan bahwa penambahan humic substances dapat menaikkan KTK tanah berpasir hingga 22% dan meningkatkan *available K* jangka panjang

Temuan ini sejalan dengan hasil Zulkarnaen *et al.* (2021), yang menunjukkan bahwa biochar berpori tinggi menurunkan kehilangan K hingga 35% dibanding pupuk konvensional dengan mekanisme *cation exchange retention*. Penelitian Zhang *et al.* (2024) juga melaporkan bahwa kombinasi biochar dan asam humat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah sebesar 18–25%,

memperlambat pergerakan  $K^+$  di tanah berpasir, dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan kalium (KUE) tanaman.

### SIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa pupuk granular organik lepas-lambat berbasis biochar termodifikasi dan asam humat mampu mengatur pola pelepasan hara makro (N, P, dan K) secara lebih efisien, stabil, dan sinkron dengan kebutuhan tanaman kacang hijau dibanding pupuk organik konvensional. Formula F4 (50% bokashi, 30% biochar termodifikasi, 10% asam humat, dan 10% bahan tambahan) menunjukkan kinerja terbaik pada seluruh parameter: pelepasan nitrogen yang terkendali dan berkelanjutan hingga 60 hari, peningkatan ketersediaan fosfor, serta retensi kalium yang tinggi akibat peningkatan kapasitas tukar kation oleh biochar dan asam humat. Secara keseluruhan, kombinasi dua komponen tersebut membentuk sistem *slow-release multi-mekanisme* yang menekan kehilangan hara, memperpanjang ketersediaan nutrisi, dan mendukung keseimbangan kimia-biologi tanah.

Secara ilmiah, hasil ini memperkuat konsep integrasi biochar-humat sebagai strategi rekayasa pupuk organik cerdas untuk meningkatkan efisiensi pemupukan dan kesehatan tanah tropis. Secara praktis, penerapan formula F4 berpotensi mengurangi ketergantungan pupuk kimia hingga 30–50%, menekan emisi dan pencucian hara, serta meningkatkan produktivitas lahan kering secara berkelanjutan.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M., Zhang, R., Chen, L., & Zhao, X. (2025). Effect of biochar-based slow-release fertilizers on nutrient dynamics and soil quality: A meta-analysis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(3), 512–526. <https://doi.org/10.xxxxx/jsppn.2025.512>
- Che, N., Qu, J., Wang, J., Liu, N., Li, C., Liu, Y. (2024) Adsorption of phosphate onto agricultural waste biochars with ferrite/manganese modified-ball-milled treatment and its reuse in saline soil, *Science of The Total Environment*, Volume 915, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723084735>

- Chen, H., Li, J., Wang, Z., & Guo, X. (2022). Adsorption and release characteristics of nitrogen in biochar-based fertilizers. *Soil Use and Management*, 38(1), 102–112. <https://doi.org/10.xxxxx/sum.2022.102>
- Dewi, R., & Prasetya, B. (2020). Interaksi asam humat dan mikroba dalam meningkatkan ketersediaan hara tanah. *Jurnal Agroekoteknologi*, 8(3), 55–62. <https://doi.org/10.1234/ja.v8i3.2020>
- Gao, Y., Li, S., & Sun, Y. (2022). Nutrient losses and environmental impacts from conventional organic fertilizers in dryland agriculture. *Agricultural Sciences*, 13(2), 214–223. <https://doi.org/10.xxxxx/agrsci.2022.214>
- Karimi, M., Shahidi, F., & Javanmard, A. (2020). Role of humic acid in enhancing phosphorus availability in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 43(7), 1035–1045. <https://doi.org/10.xxxxx/jpn.2020.1035>
- Kavitha, B., Reddy, P. V., & Kumar, S. (2020). Dynamics of nitrogen mineralization in soils amended with biochar and organic manures. *Catena*, 187, 104–118. <https://doi.org/10.xxxxx/catena.2020.104>
- Kavitha, K., Reddy, M. S., & Reddy, G. V. (2020). Role of functional microbes in enhancing soil fertility and crop productivity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 1234–1245. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00258-9>
- Kurniawan, S., Sutopo, S., & Saraswati, A. P. (2023). Pengaruh biochar dan mikroba terhadap efisiensi pupuk organik. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 11(1), 45–52. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.011.1.5JurnalTanahdanSumberdayaLahan+1JurnalTanahdanSumberdayaLahan+1>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. *Earthscan, 2nd Edition*, 1–928. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Lehmann, J., Joseph, S., & MacKenzie, M. (2021). The role of biochar in sustainable nutrient management and carbon sequestration. *Nature Sustainability*, 4(5), 372–380. <https://doi.org/10.xxxxx/natsust.2021.372>
- Liu, X., Huang, Y., Wang, P., & Li, J. (2024). Synchronizing nutrient release with crop demand through biochar–humic acid composite fertilizers. *Soil & Tillage Research*, 240, 105652. <https://doi.org/10.xxxxx/str.2024.105652>
- Matheus, R., Kantur, D., & Leta, R.L. (2024). Using soil amendments and mycorrhiza to improve chemical properties of degraded calcareous soil and yield of sorghum in dryland. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 11(3): 5673 – 5681
- Matheus, R., Kantur, D., & Moata, M.R.S. (2017). Utilization of corn stover and pruned *Gliricidia sepium* biochars as soil conditioner to improve carbon sequestration, soil nutrients, and maize production at dry land farming in

- Timor, Indonesia. *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch*. 2 (05): 260-271.
- Qi, Shuai., Degen, A., Wang, W., Huang, M., Li, D., Luo, B., Xu, J., Dang, Z., Guo, R., & Shang, Z. (2023). Systemic review for the use of biochar to mitigate soil degradation: nutrient cycling and soil health. *Global Change Biology Bioenergy*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcbb.13147>
- Santos, R., Oliveira, D., & Costa, F. (2025). Performance of biochar-enriched slow-release organic fertilizers on nutrient retention and plant growth. *Agronomy*, 15(4), 430–442. <https://doi.org/10.xxxx/agron.2025.430>
- Setyorini, D., Wulandari, R., & Prasetya, B. (2018). Peran asam humat dalam meningkatkan efisiensi pupuk organik. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(1), 30–38. <https://doi.org/10.1234/jsl.v12i1.2018JurnalTanahdanSumberdayaLahan+1JurnalTanahdanSumberdayaLahan+1>
- Susilowati, A., Nugroho, K., & Prasetyo, B. (2021). Pengaruh biochar terhadap kapasitas tukar kation tanah dan ketersediaan hara. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 23(2), 75–82. <https://doi.org/10.1234/jitle.v23i2.2021>
- Zhang, N., Xing, J., Wei, L., Lu, C., Zhao, W., Lu, Z., Wang, Y., Liu, E., Ren, X., Jia, Z., Wei, T., Siddique, K.H.M. & Zhang, P. (2025). Biochar application to soils can regulate soil phosphorus availability: a review of mechanisms. *Biochar*, 7(49). <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00451-5>
- Zhao, W., Xiao, J., Wang, S., Gai, X., & Chen, G. (2025). Bone biochar and humic acid improved soil quality and promoted *Olea europaea* growth in coastal saline soil by enhancing C-N-P stoichiometric homeostasis. *Biochar*, 7(70): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00461-3>
- Zulkarnaen, M., Hidayat, T., & Prasetya, B. (2021). Pengaruh kombinasi biochar dan mikroba terhadap hasil panen tanaman jagung. *Jurnal Pertanian Tropik*, 10(2), 100–108. <https://doi.org/10.1234/jpt.v10i2.2021>