

LAPORAN AKHIR

Hilirisasi Riset Pupuk Arromang (Transformasi Formula Cair ke Granul NPK 10-5-5 Slow Release Berbasis Biochar untuk Komersialisasi Nasional



Dr. Sukmawati, S.P., M.P. (Ketua) NIDN : 0906087601

Prof. Dr. Ieradhatullah Rahim, S.P., M.P. (Anggota) NIDN : 0926117601

Bahrudin, S.E., M.Si, (Anggota) NIDN : 0901028602

**PRODI AGROTEKNOLOGI
FAKULTAS PERTANIAN, PETERNAKAN DAN PERIKANAN
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PAREPARE
TAHUN 2025**

A. JUDUL: Isikan judul penelitian sesuai dengan yang anda tuliskan di proposal. Tidak diperkenankan ada perbedaan meskipun kosa kata.

Hilirisasi Riset Pupuk Arromang(Transformasi Formula Cair ke Granul NPK 10-5-5 Slow Release Berbasis Biochar untuk Komersialisasi Nasional..

B. RINGKASAN: Bagian ini memuat tujuan, target luaran, metode secara ringkas, hasil secara ringkas dan realisasi luaran. Lengkapi juga dengan keterkaitan penelitian yang dilakukan dengan *problem statement* delapan (8) bidang khusus industri strategis.

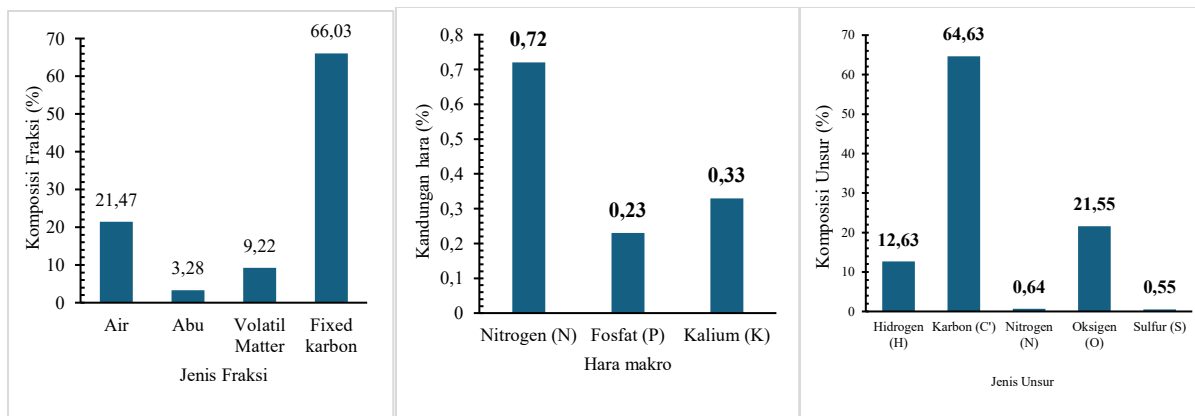
Tujuan hilirisasi ini adalah mengintegrasikan teknologi biochar sebagai matrik pupuk untuk transformasi pupuk cair Arromang menjadi pupuk granul NPK 10-5-5 slowrelease. Target luaran adalah Paten prototype pupuk dan izin edar produk pupuk granul NPK 10-5-5 slowrelease dari kementerian pertanian. Metode riset dalam bentuk hilirisasi teknologi biochar berbasis offset karbon dalam teknologi pembuatan pupuk padat NPK granul slowrelease. Dilaksanakan dalam dua tahun dengan tahapan kegiatan pertahun adalah: tahun pertama adalah finalisasi prototype pupuk meliputi 1) kegiatan persiapan bahan baku biochar sebagai matriks pupuk 2) Formulasi dan standarisasi Prototipe pupuk granula; 3) Uji Mutu Laboratorium ; 4) Uji Lapangan Terbatas ; 5) Penyusunan dokumen izin edar dan pengajuan ke instansi terkait; dan 6) Produksi pupuk skala pilot. Tahun Kedua fokus pelaksanaan prosedur izin edar yang terdiri dari: 1) Uji multilokasi produk NPK 10:5:5; 2) Optimasi Hara produk NPK Slow release sesuai SNI; 3) Lanjutan pengajuan (pengajuan SNI dan Uji lapang). Hasil kegiatan adalah prototype pupuk sudah mencapai tahap konsistensi hara NPK 10:5:5 dan perbaikan formula sudah mencapai kandungan hara >30% sesuai SNI yakni NPK (10:4:13). Selain itu pola pelepasan hara konsisten lepas lambat yang diperkuat oleh hasil analisis SEM, FTIR, pelepasan hara, hasil uji lapang. Dari hasil uji lapang diperoleh data penggunaan pupuk SRF NPK 10-5-5 mampu mendukung pertumbuhan tanaman secara tunggal hingga hari ke 35, sedangkan kombinasi terbaik adalah SRF NPK 10-5-5 yang ditambahkan urea 3 gram pada 14 HST. Secara umum pertumbuhan tanaman jagung melampaui karakter aktual benih jagung hibrida yang digunakan. Luaran yang dihasilkan adalah 1 paten dengan judul invensi” FORMULA PUPUK GRANUL NPK 10-5-5 SLOW RELEASE BERBASIS BIOCHAR nomor registrasi S00202511099 dengan status terdaftar telah mamsuki tahap pengumuman **permohonan paten pada tanggal 18 November 2025 dengan nomor publikasi: 2025/S/04017. Berdasarkan pada karakter** pupuk granul NPK slowrelease berbasis biochar dan aplikasinya pada tanaman jagung, dapat disimpulkan bahwa inovasi ini dapat menurunkan input kimia yang sangat tinggi dan tetap menjaga produktivitas jagung, sehingga dapat diadopsi untuk pengembangan pertanian rendah emisi berkelanjutan ditengah tekanan perubahan iklim.

C. HASIL PENELITIAN: Tuliskan secara ringkas hasil penelitian yang telah dicapai sesuai dengan pelaksanaan penelitian. Penyajian meliputi data, hasil analisis, dan interpretasi. Penyajian data dapat berupa gambar, tabel, grafik, dan sejenisnya, serta analisis didukung dengan sumber pustaka primer yang relevan dan terkini. Deskripsikan secara jelas keterlibatan mitra serta uraikan secara rinci penggunaan pendanaan mitra, baik dalam bentuk natura maupun tunai (jika ada), dalam pelaksanaan penelitian. Seluruh kontribusi tersebut dibuktikan dengan Surat Pernyataan Realisasi Kontribusi Mitra.

A. Karakterisasi Biochar sebagai Matriks Pupuk yang Stabil

1. Karakteristik kimia

Karakteristik kimia biochar meliputi komposisi fraksi, hara makro dan unsur (Gambar 1). Hasil analisis menunjukkan kadar air (21,47%), abu (3,28%), zat volatil (9,22%), dan *fixed carbon* (66,03%). Nilai *fixed carbon* yang tinggi menunjukkan proses pirolisis berlangsung optimal dan menghasilkan karbon stabil. Menurut European Biochar Certificate (1), biochar dengan *fixed carbon* >60% tergolong highly carbonized biochar dengan *carbon half-life* >1000 tahun di tanah. Kandungan abu yang rendah mengindikasikan sedikit komponen anorganik yang tidak terbakar, sehingga biochar ini lebih cocok untuk aplikasi pertanian (2). Data ini diperkuat oleh hasil analisis ultimate dengan Komposisi unsur biochar: C (73,15%), H (11,56%), N (0,53%), dan O (13,94%). Nilai rasio H/C = 0,16 dan O/C = 0,19 termasuk rendah, menunjukkan tingkat aromatisasi tinggi dan kestabilan karbon jangka panjang. biochar dengan H/C < 0,4 dan O/C < 0,4 dikategorikan “stable biochar”, menunjukkan dominasi struktur poliaromatik dan tahan terhadap dekomposisi mikroba. Rasio rendah ini berhubungan langsung dengan umur paruh karbon (*carbon half-life*), di mana biochar dengan H/C < 0,4 memiliki potensi bertahan lebih dari 1000 tahun dalam tanah (3).

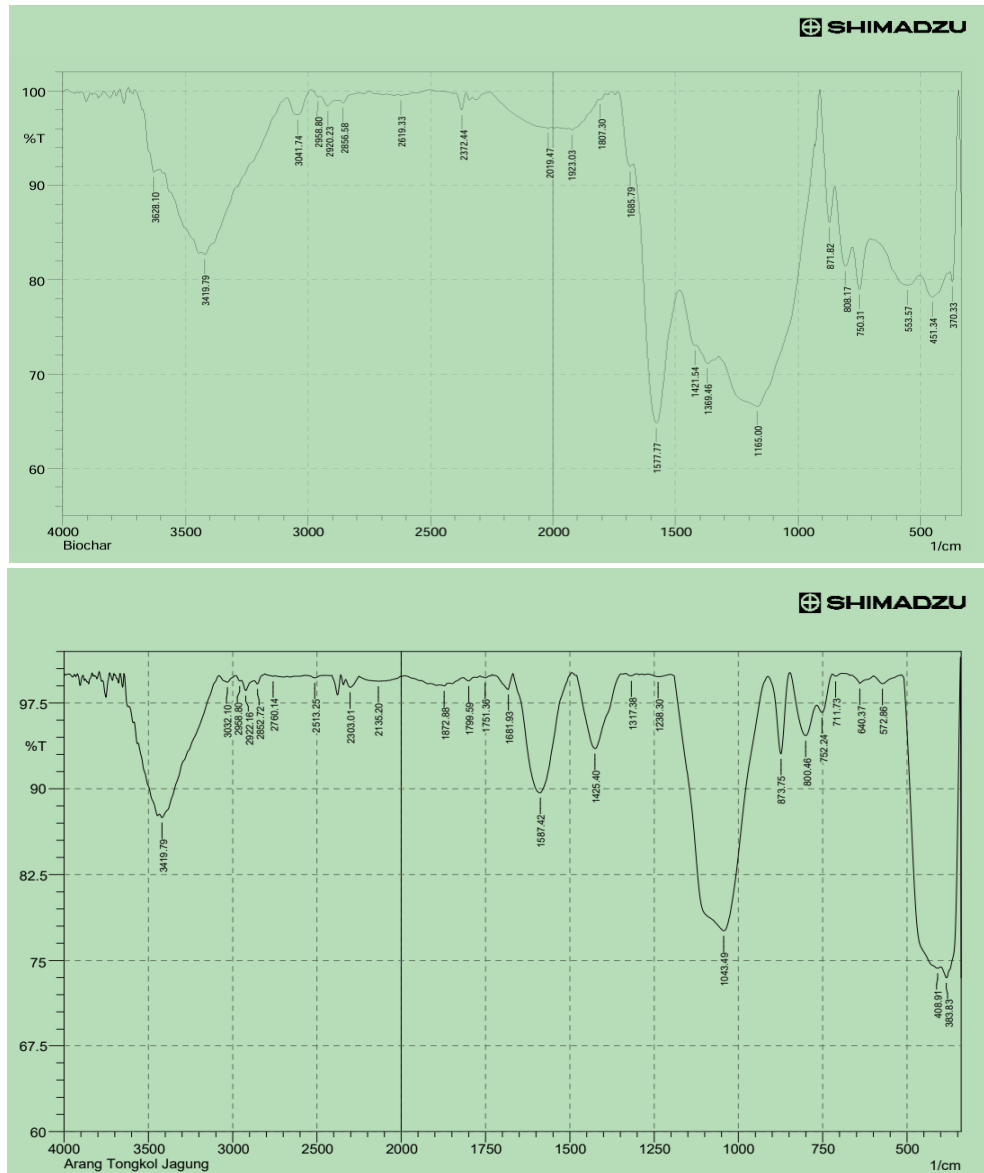


Gambar 1. Karakterisasi kimia biochar tongkol jagung hasil pirolisis dengan Metode Carbon Standard Internasional berdasarkan jenis fraksi, kandungan hara makro dan jenis unsur (Hasil analisis Lab Kimia Pakan Unhas, 2025)

2. Distribusi gugus fungsi & implikasinya untuk sistem slow-release

Distribusi gugus fungsi permukaan biochar memiliki keterkaitan langsung dengan **fungsi biochar sebagai matriks pupuk slow-release. Biochar memiliki kapasitas adsorpsi nutrisi (N, P, K), dimana terdapat** Gugus polar **O–H dan C–O** pada 3416 dan 1165 cm^{-1} memberikan **situs aktif** untuk interaksi elektrostatik atau ikatan hidrogen dengan ion NH_4^+ , H_2PO_4^- , dan K^+ . Gugus oksigen permukaan (C–O, C=O, O–H) memiliki pengaruh dalam interaksi ion hara dan retensi nutrisi (2). Biochar memiliki **Stabilitas kerangka karbon yang ditunjukkan oleh struktur aromatik C=C 1617 cm^{-1}** . Struktur aromatik terkondensasi tidak mudah larut atau terdegradasi, menjaga hara tetap berada dalam matriks dalam jangka panjang. Hal ini menurunkan kehilangan N akibat volatilisasi atau leaching. Biochar memiliki **mekanisme difusi lambat**. Porositas tinggi (umumnya meningkat di suhu $>500^\circ\text{C}$) dan permukaan aromatik menyebabkan **penyerapan hara di mikropori**; pelepasan hanya terjadi bila kadar air meningkat sehingga timbul efek slow-release alami. Adanya sisa gugus polar (O–H, C–O) mendukung proses **impregnasi** pupuk NPK larut air (urea, KH_2PO_4) ke dalam biochar melalui ikatan permukaan, menunjukkan **kompatibilitas untuk coating atau impregnasi NPK**. Wang et al (4) menyimpulkan bahwa kombinasi antara gugus polar residual dan kerangka karbon aromatik menyebabkan pelepasan hara lambat (kontrol oleh difusi dan desorpsi).

Berdasarkan spektrum FTIR, biochar ini menunjukkan dominasi gugus aromatik (C=C, 1617 cm^{-1}) dengan residu fenolik/eter (3416 & 1165 cm^{-1}). Kombinasi ini ideal sebagai matriks slow-release fertilizer (SRF): kerangka aromatik memberikan stabilitas dan pelepasan lambat, sementara sisa gugus oksigen menyediakan titik adsorpsi untuk nutrisi. (4). Meskipun defungsionalisasi pada suhu tinggi menurunkan kapasitas adsorpsi awal, porositas dan stabilitas tinggi memastikan difusi lambat dan pelepasan terkontrol.



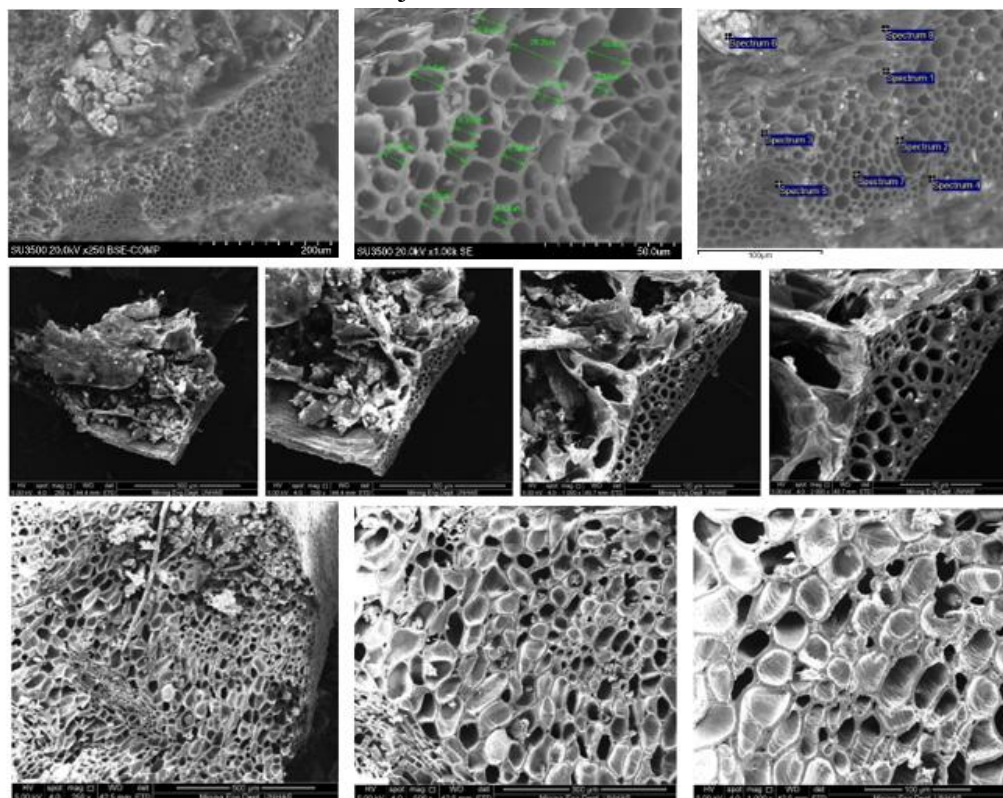
Gambar 2. Spktrum FTIR Biochar Tongkol Jagung

3. Morfologi Pori

Citra SEM menyajikan informasi tentang morfologi pori dan mikrostruktur biochar yang berperan langsung dengan kemampuan penyimpanan karbon (Carbon Offset Capacity) untuk stok karbon tanah. Berdasarkan pada Gambar 3, citra SEM (perbesaran 1000x, skala 50 μm), terlihat bahwa biochar memiliki struktur berpori dengan diameter pori berkisar antara 4,8 – 20,3 μm . Ukuran ini termasuk dalam kategori mesopori hingga makropori (IUPAC classification: 2–50 μm)(5). Distribusi pori yang bervariasi menunjukkan proses devolatilisasi yang sempurna saat pirolisis, menghasilkan dinding sel karbon berlapis dan jaringan saling terhubung. Pori berukuran besar ($\geq 10 \mu\text{m}$) berasal dari lumen sel bahan biomassa (misalnya jaringan xylem atau parenkim),

sedangkan pori kecil ($<10\text{ }\mu\text{m}$) terbentuk dari dekomposisi senyawa volatil dan *micro-cracks* akibat pelepasan gas.

Citra SEM (Gambar bawah) menunjukkan bahwa biochar memiliki struktur berpori berkembang dengan jaringan pori mikro–meso–makro yang saling terhubung dan morfologi seluler menyerupai jaringan vaskular biomassa asal. Struktur ini menyediakan luas permukaan tinggi dan jalur difusi berlapis yang mendukung peran biochar sebagai reservoir hara dan matriks pelepasan hara tertunda namun berkelanjutan.

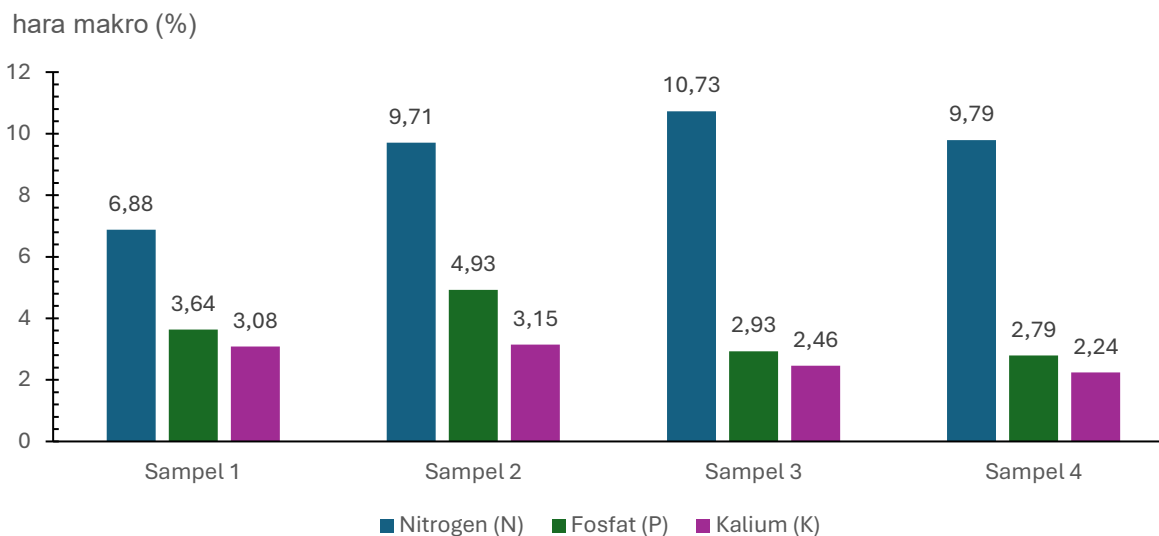


Gambar 3. Morfologi pori biochar berdasarkan Citra SEM (Scanning Electron Microscope)
(Hasil analisis Laboratorium Fisika material Unhas, 2025)

B. Formulasi dan standarisasi Prototipe pupuk granula

Pupuk **Granul NPK 10-5-5 Slow Release Berbasis Biochar** diformulasi dengan menggunakan biochar sebagai matriks dengan sumber hara terdiri dari urea, TSP, KCL, Zeolit dan arromang cair dengan komposisi 3:2:1:1:2:1. Formulasi dilakukan bersama dengan mitra untuk mendapatkan komposisi hara yang tepat. Dalam melakukan formulasi, tim bersama mitra melakukan konsultasi terhadap analis kimia untuk mendapatkan informasi konsistensi pengikatan hara secara kimia antar bahan. Hasil karaterisasi formula diperoleh konsistensi kandungan hara pada kisaran N 9-10%, sedangkan Posfat 2-5% dan K 2-3% (Gambar 4). Namun setelah dilakukan perbaikan formula, maka diperoleh kisaran kandungan NPK 10-4-13. (Tabel 1)Kondisi ini masih perlu dilakukan optimasi hingga kandungan hara $>30\%$ sesuai standar SNI.

Kandungan nitrogen dan kalium relatif tinggi, sementara fosfat berada pada tingkat sedang. Seluruh parameter logam berat, termasuk As, Hg, Pb, Cd, Cr, dan Ni, berada di bawah ambang batas maksimum yang ditetapkan, sehingga pupuk ini memenuhi persyaratan mutu dan keamanan lingkungan. Selain itu, keberadaan unsur mikro esensial seperti Fe, Zn, Cu, dan Mn berpotensi memberikan manfaat tambahan bagi pertumbuhan dan fisiologi tanaman.



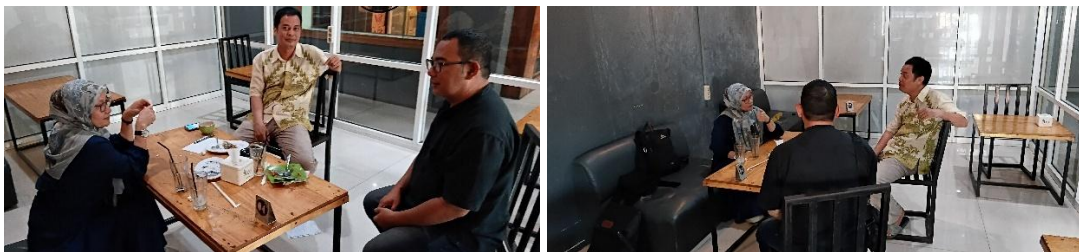
Gambar 4. Konsistensi hara pupuk berdasarkan hasil analisis kandungan hara NPK (Hasil analisis Laboratorium kimia pakan Fakultas peternakan Unhas, 2025)

Tabel 1. Hasil analisis lengkap sampel pupuk Granul NPK SRF berbasis biochar (Hasil analisis Laboratorium Badan Standardisasi Dan Kebijakan Jasa Industri, 2025)

Parameter	satuan	S1	S2
Nitrogen Total	%	10,62	9,75
P2O5	%	3,8	4,27
Kalium (K2O)	%	12,77	12,93
Besi	ppm	1113,99	2844,89
Arsen	ppm	0,0831	0,0481
Hg	ppm	0,0015	0,003
Zn	ppm	99,4232	63,5720
Cu	ppm	172,304	347,295
Mn	ppm	1756,04	1819,47
Pb	ppm	50,5091	37,3959
Cd	ppm	<0,50	<0,50
Cr	ppm	16,9055	32,6536
Ni	ppm	5,8607	5,7837



Gambar 5. Formulasi pupuk arromang untuk batch 10 kg untuk kepentingan identifikasi kinerja bahan untuk transformasi bentuk cair ke bentuk padat (granul) (PT-Mitra)



Gambar 6. Konsultasi tim dan mitra bersama analis kimia untuk konsistensi perbandingan bahan penyusu pupuk granul



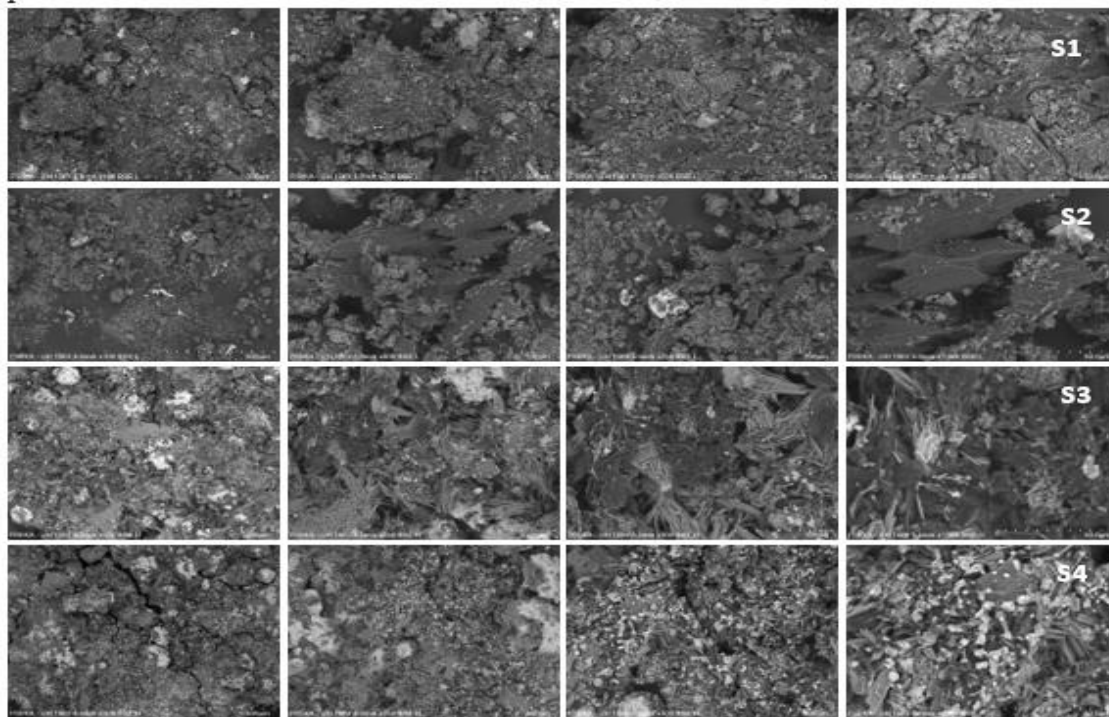
Gambar 7. Bahan pupuk untuk batch 100 kg (perbaikan konsistensi kandungan hara makro)

C. Uji Mutu Laboratorium

1. Karakteristik Fisik

Citra SEM menunjukkan bahwa pupuk Arromang memiliki struktur heterogen dengan permukaan kasar dan berpori, disertai aglomerasi partikel mineral–organik yang mengindikasikan peran matriks biochar sebagai pengikat dan penyimpan hara melalui mekanisme adsorpsi dan difusi terkontrol (Lehmann & Joseph, 2015; Liu et al., 2017). Perbedaan morfologi antar sampel (S1–S4) mencerminkan variasi mekanisme pelepasan hara. Sampel S1 menunjukkan struktur padat dan aglomeratif dengan partikel besar–menengah serta pori yang sebagian tertutup, yang mendukung pelepasan hara tertunda (*delayed*) dan berfungsi sebagai reservoir hara jangka menengah–panjang. Sampel S2 memiliki struktur lebih seragam dan kompak dengan susunan lempeng pipih, sehingga memungkinkan difusi hara yang stabil dan berkelanjutan (*sustained*).

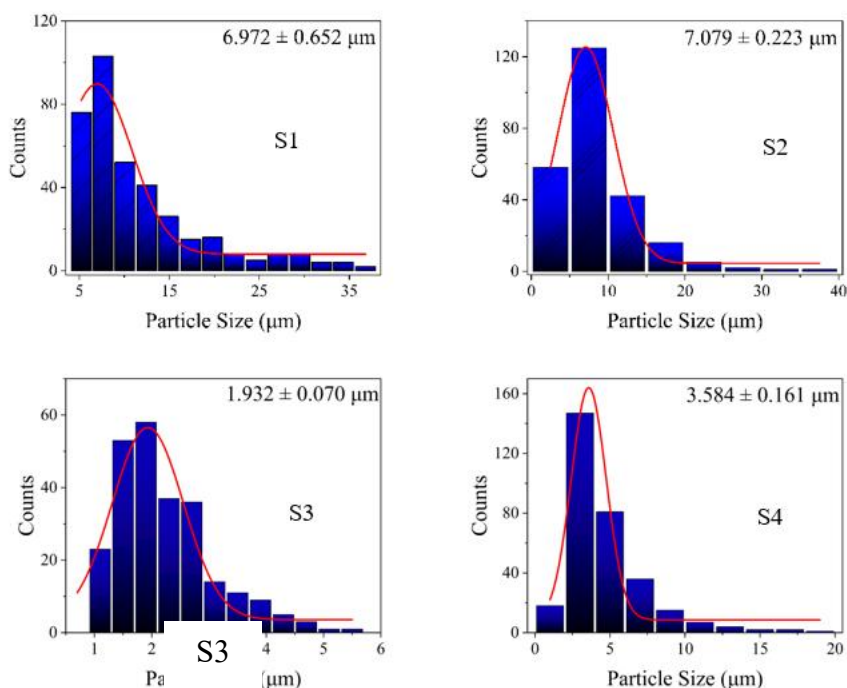
release) akibat degradasi fisik yang lebih lambat (6). Sampel S3 didominasi struktur fibrous berukuran sangat halus dengan pori terbuka dan luas permukaan tinggi, yang memfasilitasi pelepasan hara cepat sebagai *starter nutrient* (7). Sementara itu, sampel S4 menunjukkan struktur granular menengah dengan pori mikro–meso terbuka, yang berperan menjembatani pelepasan hara cepat dan lambat (*intermediate release*). Secara keseluruhan, kombinasi biochar sebagai matriks hara dan zeolit sebagai pembungkus eksternal mendukung karakter pupuk Arromang sebagai *slow-release fertilizer* dengan mekanisme *delayed but sustained*, di mana zeolit berperan sebagai pembawa kation yang mampu menyalurkan hara secara perlahan dan berkelanjutan(8).



Gambar 8. Morfologi struktur pupuk granul NPK SRF berdasarkan citra SEM (Hasil analisis Laboratorium Fisika Material, Unhas 2025)

Gambar 9 menunjukkan distribusi ukuran partikel pupuk Arromang (S1–S4) dengan kisaran dominan 1,9–7,1 μm dan pola multimodal. Sampel S1 ($6,972 \pm 0,652 \mu\text{m}$) dan S2 ($7,079 \pm 0,223 \mu\text{m}$) memiliki ukuran partikel relatif besar, di mana S1 lebih heterogen dan S2 lebih seragam, yang mengindikasikan pelepasan hara yang lebih lambat dan terkendali akibat jalur difusi yang lebih panjang, sesuai karakter *slow-release fertilizer*. Sampel S3 memiliki ukuran partikel paling kecil dan homogen ($<3 \mu\text{m}$) dengan luas permukaan tinggi, sehingga mendukung pelepasan hara cepat dan peningkatan ketersediaan awal nitrogen, namun berpotensi meningkatkan risiko pencucian apabila tidak terenkapsulasi secara efektif(6). Sampel S4 menunjukkan ukuran menengah dengan kombinasi partikel halus dan menengah, yang berperan sebagai fraksi transisi antara pelepasan cepat dan lambat. Secara keseluruhan, distribusi ukuran partikel pupuk Arromang mengindikasikan mekanisme pelepasan hara *delayed but sustained*, khas pupuk *slow-release*

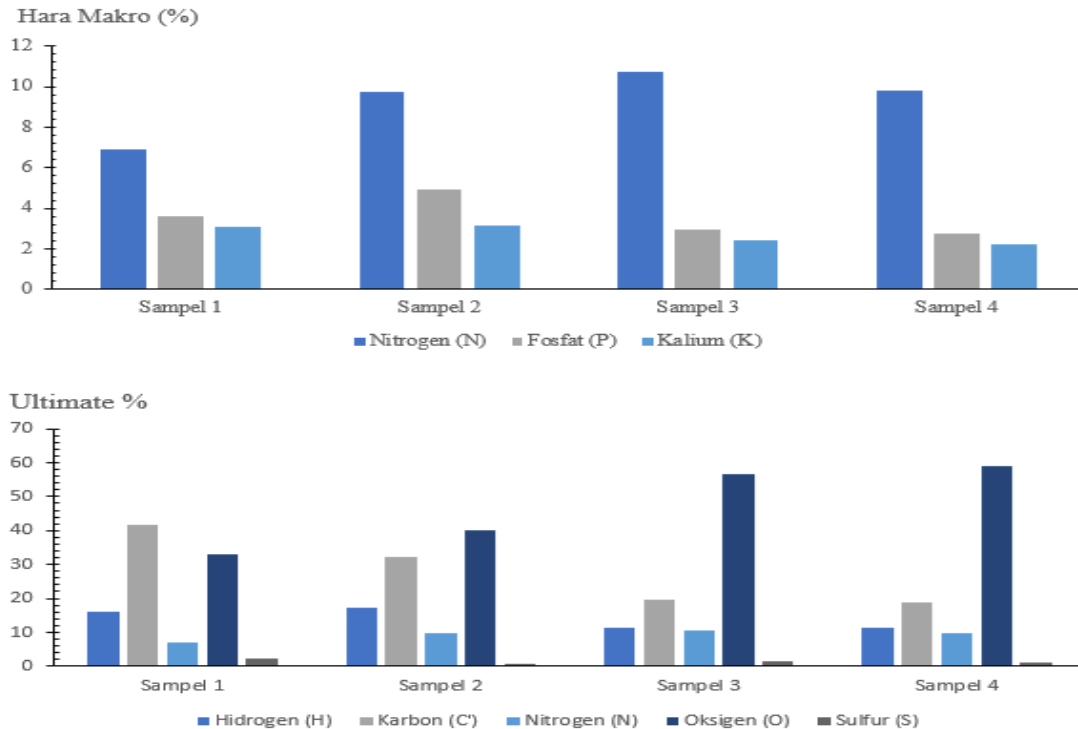
berbasis biochar. Namun demikian perlu diperhatikan ketebalan lapisan sebagai parameter kritis untuk mengendalikan atau menunda laju pelepasan nutrisi (7).



Gambar 9. Rata-rata ukuran partikel pupuk granul Arromang NPK SRF berbasis Biochar (Hasil analisis Laboratorium Fisika Material, Unhas 2025)

2. Karakterisasi dan analisis kimia

Berdasarkan pada Gambar 10, Kandungan N relatif tinggi ($\pm 6\text{--}11\%$) pada seluruh sampel, sementara P dan K pada tingkat sedang, berfungsi sebagai nutrisi pendukung. Fraksi karbon dan oksigen tinggi pada analisis ultimate, yang mengindikasikan dominasi matriks organik–biochar. Kombinasi ini menguatkan peran Arromang sebagai slow-release fertilizer (SRF) dengan fungsi ganda: penyedia hara dan pembenah tanah. Sampel 1 (S1) memiliki kandungan nutrisi Seimbang dengan karbon Tinggi. Hara makro: N sedang ($\sim 6\text{--}7\%$), P relatif lebih tinggi dibanding S3–S4, K sedang. Hasil ultimate menunjukkan Karbon tinggi ($\sim 40\%$), Oksigen sedang ($\sim 30\%$), N dan H moderat. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan C tinggi menyebabkan kapasitas adsorpsi hara baik. Sampel 2 (S2) – Kandungan P dan N Lebih Tinggi, dimana N meningkat ($\sim 9\text{--}10\%$), P tertinggi di antara sampel dan K relatif stabil. Hasil ultimate menunjukkan Karbon masih tinggi dan Oksigen meningkat struktur oksidasi biochar lebih aktif. Kondisi ini mendukung fase pertumbuhan vegetatif awal menengah.

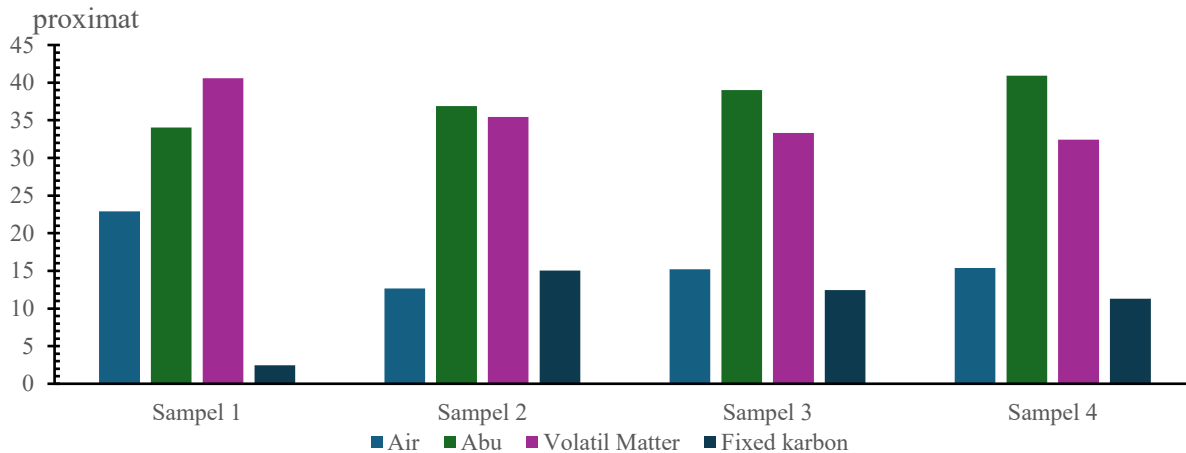


Gambar 10. Karakterisasi pupuk granul NPK SRF berdasarkan kandungan hara, dan kandungan unsur (Hasil analisis laboraotium kimia pakan Unhas, 2025)

3. Karakterisasi termal dan struktur

1) Hasil Proximat

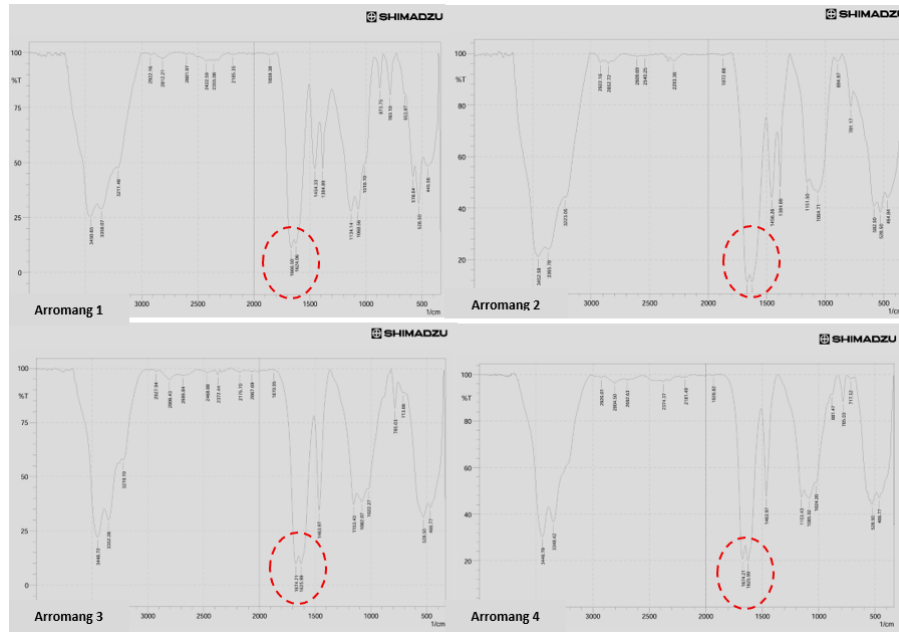
Berdasarkan Gambar 11, diketahui bahwa Kadar air cukup tinggi, menandakan pupuk memiliki kelembapan yang masih signifikan, berpotensi membantu pelarutan bertahap namun perlu stabilisasi agar tidak mempercepat pelepasan hara. Kandungan mineral anorganik tinggi (Kadar abu 30,04%), menunjukkan kontribusi dari bahan sumber seperti biochar atau mineral pembawa yang berperan sebagai matriks lepas lambat. Volatil Matter (40,59%) menunjukkan banyaknya senyawa organik mudah menguap (senyawa C, N, O kompleks) yang dapat terdegradasi perlahan, mendukung pelepasan nitrogen secara bertahap. Rendahnya fixed carbon menunjukkan biochar belum dominan sebagai fraksi karbon stabil, namun cukup memberi fungsi adsorpsi dan penahan nitrogen (C tetap 2,46%). Kombinasi volatil matter tinggi dan fixed carbon rendah mencerminkan pupuk yang masih memiliki aktivitas biologis dan kimia aktif untuk melepaskan N secara perlahan..



Gambar 11. Komposisi fraksi pupuk granul NPK SRF berdasarkan kandungan hara, dan kandungan unsur (Hasil analisis laboratorium kimia pakan Unhas, 2025)

2) Identifikasi gugus fungsi (FTIR)

Berdasarkan pada Gambar 8, Spektrum FTIR pupuk SRF menunjukkan pita broad pada $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ (O–H), pita C–H pada $2922\text{--}2851\text{ cm}^{-1}$, dan serangkaian band pada $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ yang diasosiasikan dengan C–O–C/ PO_4 stretching. Kehadiran band pada $\sim 1380\text{ cm}^{-1}$ dan 1540 cm^{-1} menunjukkan kontribusi gugus nitrat/amina. Kombinasi gugus hidrofilik (–OH, C–O) dan gugus adsorbtif (C=O, karboksilat, aromatik) menunjukkan bahwa nutrisi teradsorpsi dan sebagian terikat dalam matriks organik–biochar: kondisi ini mendukung retensi dan pelepasan terkendali tetapi juga menjelaskan mengapa proporsi N–P–K pada produk akhir masih di kisaran 6–3–3—karena sebagian massa produk terdiri dari matriks organik dan bentuk nutrisi terikat yang mempengaruhi pengukuran kuantitatif. Langkah perbaikan adalah mengurangi ketebalan coating agar persentase inti (nutrien) naik, sambil tetap menjaga fungsi slow-release. Target formula 10.5.5 diperoleh pada produk Arromang 2, Arromang 3 dan Arromang 4. Konsistensi penyerapan hara terlihat pada gugus karboksil (lingkaran merah) yang terserap dengan intensitas yang cukup tinggi berkisar 90%. Gugus fungsional pada biochar ini berkontribusi pada pemuatan nutrisi yang efisien, sehingga mengurangi kehilangan nutrisi tanah(7).

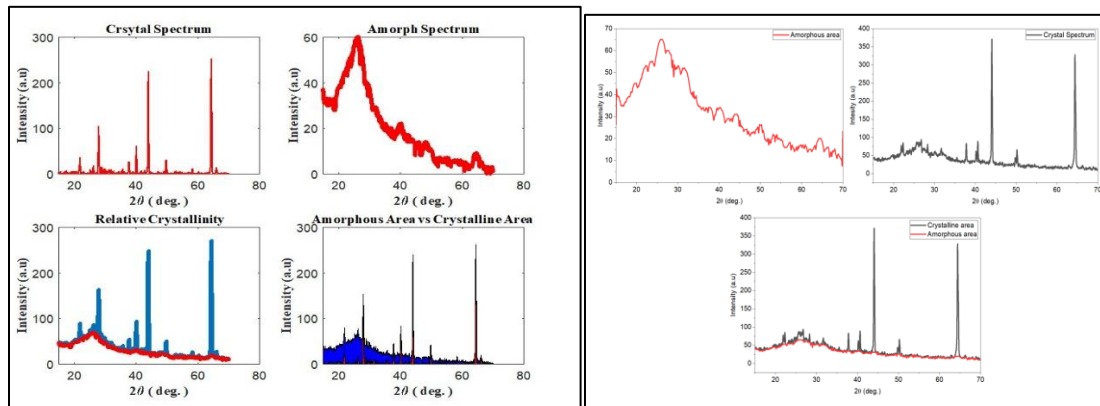


Gambar 12. Spektrum FTIR distribusi gugus fungsi pada permukaan pupuk granul NPK SRF (Hasil analisis laboratorium kimia organik UNHAS, 2025)

3) Fasa kristal dan amorf (XRD)

Berdasarkan pada Gambar 13, terdapat beberapa informasi mengenai struktur kristal dari pupuk granul NPK SRF diantaranya: Crystal Spectrum (atas kiri) menampilkan puncak-puncak tajam pada beberapa posisi 2θ . Puncak-puncak ini menunjukkan adanya fasa kristalin terpisah (kemungkinan garam mineral seperti fosfat, klorida, sulfat, atau garam alkali yang terpresipitasi). Amorph Spectrum (atas kanan) menunjukkan broad halo (hump) pada rentang sudut rendah—umumnya $15\text{--}35^\circ 2\theta$. Itu ciri khas fase amorf/terdispersi. □ Relative Crystallinity (bawah kiri) Plot gabungan: sering dipakai untuk menunjukkan overlay antara sinyal total (background + amorf) dan puncak kristalin. Biasanya kurva merah = baseline/amorf, kurva biru = puncak yang diekstrak. Amorphous Area vs Crystalline Area (bawah kanan). Menampilkan hasil integrasi area (area bawah kurva) yang dipisahkan: area amorf (biasanya diarsir/warna biru) vs area kristalin (puncak hitam/merah). Interaksi karbon-silikon yang kuat atau pembentukan kompleks lainnya dalam biochar yang sangat kristalin juga berkontribusi terhadap pelepasan yang lebih lambat dan lebih berkelanjutan dalam jangka waktu yang lebih lama(9). Implikasi fisik dan fungsi untuk pupuk SRF perbandingan amorphosis dengan kristalinitas pupuk adalah 1) Struktur semi-kristalin (amorf dominan + kristalin terdispersi). Amorf dominan menunjukkan permukaan aktif, kapasitas adsorpsi ion, dan jaringan pori yang mendukung penyimpanan dan pelepasan bertahap (difusi). material amorf seringkali lebih unggul daripada material kristalin dalam aspek aplikasi elektrokimia karena fitur strukturalnya yang unik, termasuk situs aktif yang melimpah, komposisi kimia yang dapat diatur (10). Fasa kristalin memberikan *local rigidity* dan sumber hara yang lebih

terikat; dapat memperbaiki kekuatan mekanik granul (kurangi abrasi). 2) perilaku pelepasan nutrisi, kombinasi ini umum untuk SRF: dua fase pelepasan adalah fraksi larut atau teradsorpsi cepat (dari area amorf/permukaan) dan pelepasan lambat dari fasa kristalin yang tahan larut atau dari nutrisi yang tersimpan dalam pori.

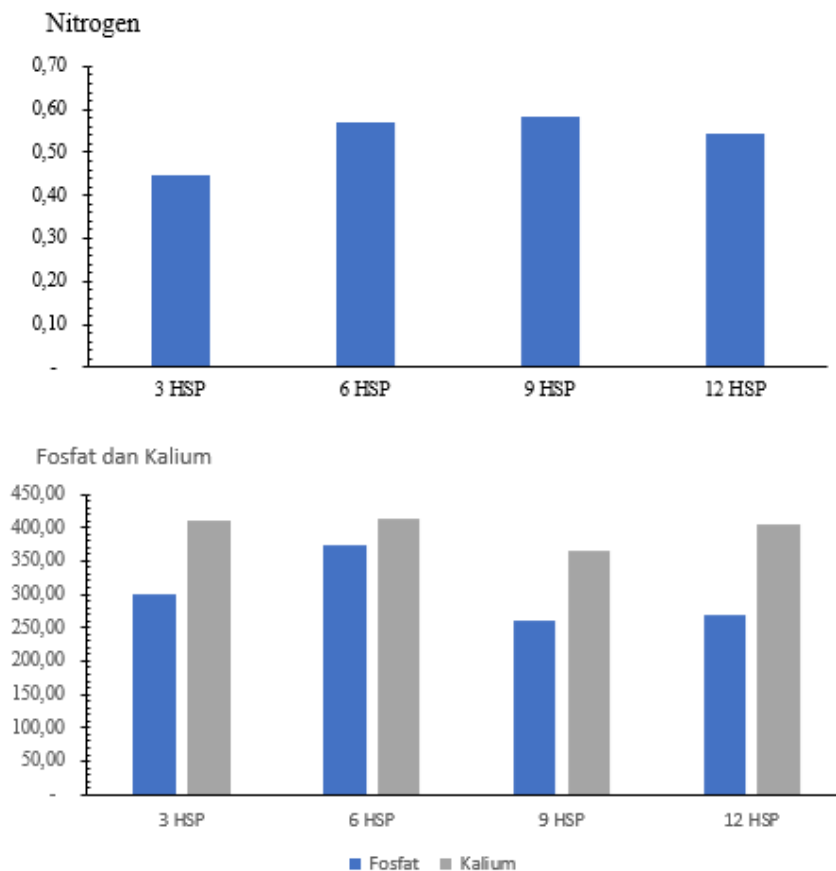


Gambar 13. Diagram perbandingan wilayah amorf dan kristal pupuk granul NPK SRF (Hasil analisis Laboratorium Fisika Materi, UNHAS, 2025)

4) Karakterisasi Kelarutan dan Pelepasan Hara

Analisis kelarutan hara dilakukan dengan melakukan perendaman selama 12 hari, dimana sampel larutan diambil per tiga hari untuk dilakukan analisis hara makro. Berdasarkan pada Gambar 14 Pola pelepasan nitrogen, fosfat, dan kalium dari pupuk menunjukkan konsistensi yang tinggi sepanjang periode inkubasi (3–12 HSP). Nitrogen dilepaskan secara bertahap dengan puncak pada 6–9 HSP, fosfat menunjukkan fluktuasi moderat namun tetap tersedia secara berkelanjutan, sementara kalium dilepaskan secara stabil pada seluruh waktu pengamatan. Pola ini mengindikasikan mekanisme pelepasan hara bertipe *delayed but sustained*, yang merupakan karakter khas pupuk slow-release berbasis biochar, sehingga lebih sinkron dengan dinamika serapan hara tanaman dan berpotensi meningkatkan efisiensi pemupukan

Pola ini menunjukkan mekanisme *delayed but sustained release*, di mana nitrogen tidak dilepaskan sekaligus pada fase awal, tetapi meningkat seiring waktu. Penurunan ringan pada 12 HSP mengindikasikan fase pemanfaatan aktif oleh tanaman, bukan kehilangan mendadak. Sinkron dengan kebutuhan N tanaman pada fase vegetatif aktif. Berpotensi menekan kehilangan N melalui pencucian dan volatilisasi, khas pupuk SRF berbasis matriks biochar. Pola Pelepasan Fosfat (P) yakni: 3–6 HSP: Fosfat meningkat cukup tajam → mendukung kebutuhan awal pembentukan akar. 9 HSP: Terjadi penurunan → indikasi penyerapan oleh tanaman atau pengikatan sementara. 12 HSP: Kembali meningkat dan stabil. Terjadi Fluktuasi moderat namun tetap dalam rentang terkendali. Menunjukkan pelepasan bertahap dengan kontrol adsorpsi–desorpsi, kemungkinan dipengaruhi oleh interaksi P dengan biochar/mineral (mis. Ca, Fe, atau zeolit). Mendukung ketersediaan P berkelanjutan. Lebih efisien dibanding pupuk P konvensional yang cenderung cepat terfiksasi di tanah. Pola Pelepasan Kalium (K), yakni nilai K relatif tinggi dan stabil pada seluruh waktu pengamatan. Tidak terlihat lonjakan ekstrem maupun penurunan tajam. mengindikasikan mekanisme pelepasan sangat terkendali dan konsisten. Kemungkinan terkait dengan Pertukaran kation (CEC) biochar atau adanya peran mineral pembawa (mis. zeolit atau matriks silikat)



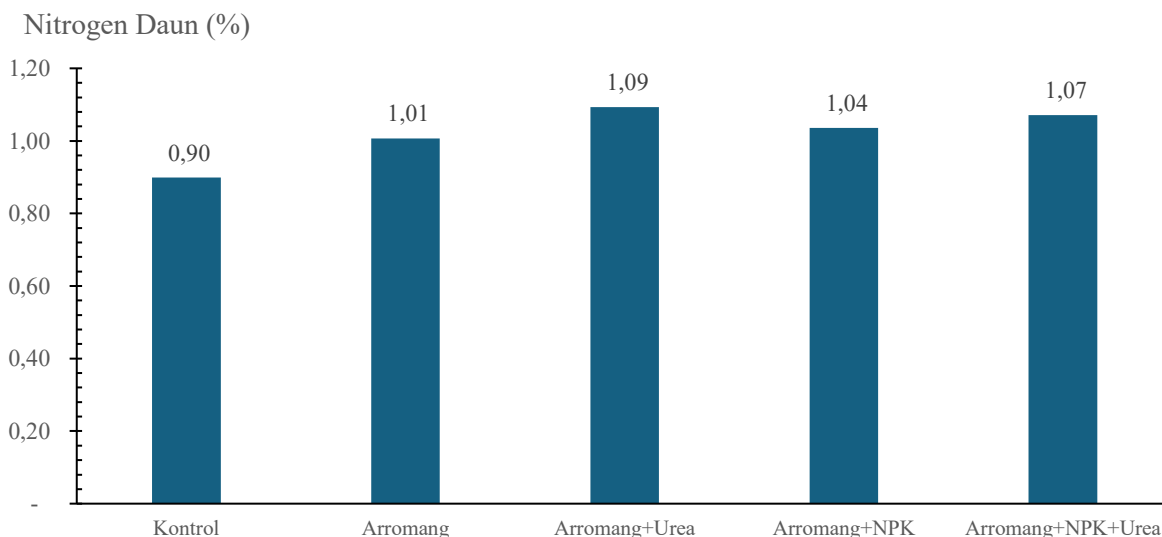
Gambar 14. Pelepasan hara makro pupuk Arromang NPK SRF berbasis biochar (Hasil uji Laboratorium pakan ternak Unhas 2025)

D. Uji Lapang Terbatas

1. Evaluasi efektifitas pupuk dilihat dari kandungan NPK tanah dan tanaman

Berdasarkan data kandungan nitrogen daun dan NPK tanah, perlakuan pupuk SRF NPK berbasis Arromang menunjukkan peningkatan efisiensi penyerapan hara dibandingkan kontrol. Kandungan N daun pada perlakuan Arromang dan kombinasinya lebih tinggi dibandingkan kontrol, sementara residu NPK di tanah relatif tidak mengalami akumulasi berlebih. Pola ini mengindikasikan bahwa hara yang dilepaskan dari pupuk SRF tidak tertahan di tanah, melainkan dimobilisasi dan diserap secara efektif oleh tanaman. Secara agronomis, kondisi ini mencerminkan peningkatan sinkronisasi antara ketersediaan hara dan kebutuhan fisiologis tanaman. Pupuk lepas terkontrol yang ideal dilapisi dengan bahan makromolekul alami atau semi-alami yang ramah lingkungan yang memperlambat pelepasan pupuk hingga kecepatan yang sangat lambat sehingga satu kali aplikasi ke tanah dapat memenuhi kebutuhan nutrisi untuk pertumbuhan tanaman model(6).

Perlakuan Arromang tanpa tambahan pupuk cepat larut menghasilkan kandungan N daun yang lebih tinggi meskipun nilai NPK tanah relatif lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pelepasan hara dari pupuk SRF berlangsung secara bertahap dan berkelanjutan, sehingga meningkatkan efisiensi serapan nitrogen. Karakter ini berbeda dengan pupuk konvensional yang umumnya meningkatkan kandungan hara tanah secara cepat namun tidak selalu diikuti oleh peningkatan serapan tanaman. Dengan demikian, rendahnya residu NPK tanah pada perlakuan SRF dapat ditafsirkan sebagai indikator efisiensi, bukan keterbatasan pasokan hara. Kombinasi pupuk SRF Arromang dengan urea atau NPK meningkatkan kandungan N daun lebih lanjut, dengan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan Arromang + urea. Temuan ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara sumber nitrogen cepat tersedia dan pelepasan hara lambat dari SRF, di mana urea berperan memenuhi kebutuhan awal tanaman, sementara SRF mempertahankan suplai nitrogen pada fase pertumbuhan berikutnya. Pola respon ini mencerminkan karakter “delayed but sustained nutrient release” yang menjadi ciri utama pupuk slow-release. Secara keseluruhan, hubungan antara peningkatan kandungan N daun dan tidak terjadinya akumulasi NPK tanah menegaskan bahwa pupuk SRF NPK Arromang mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara oleh tanaman

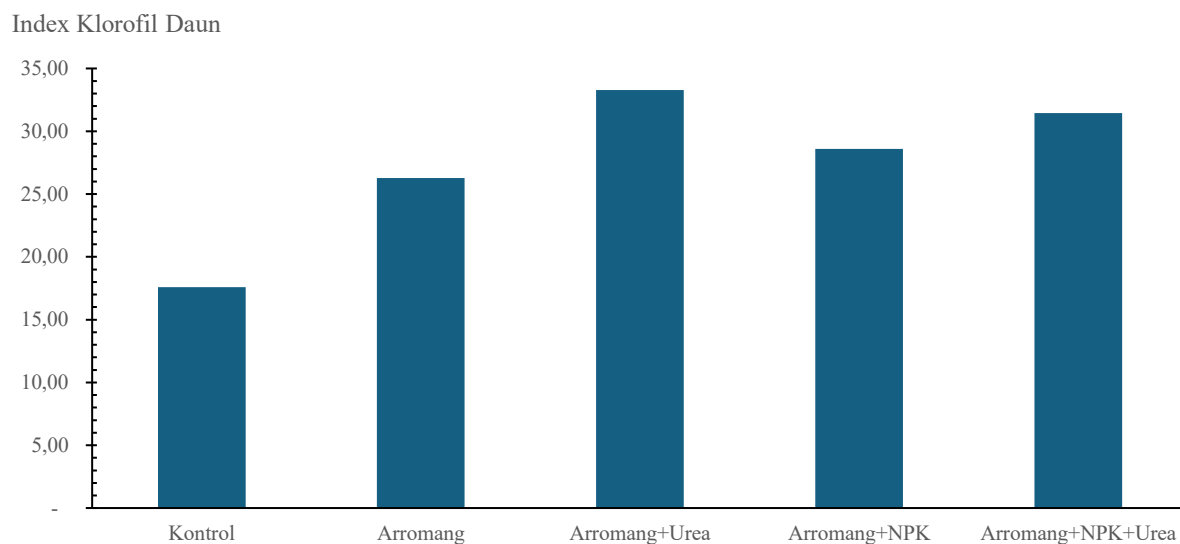


Gambar 15. Rata-rata Kandungan Nitrogen daun jagung pada umur 35 hari pada pemupukan arromang dan kombinasinya

2. Respon pertumbuhan tanaman diidentifikasi melalui kandungan klorofil daun dan parameter agronomi lainnya

Berdasarkan pada Gambar 16, Menunjukkan pola umum data klorofil daun jagung yang diaplikasi pupuk SRF dan kominasinya. Semua perlakuan pupuk SRF menunjukkan peningkatan kandungan klorofil dengan baseline diukur dari perlakuan kontrol. Efek utama slow release dilihat dari peningkatan kontrol ke SRF (40%) menunjukkan bahwa teknologi NPK SRF efektif meningkatkan status nitrogen fungsional daun yang tercermin dari peningkatan klorofil. Secara

statistik menidikasi efek perlakuan yang kuat. SRF yang ditambahkan urea menghasilkan nilai klorofil tertinggi, mengindikasikan sinergi antara N cepat tersedia (Urea) dan N lepas lambat (SRF). Secara statistik menunjukkan adanya efek aditif yang bersifat positif. Urea memenuhi kebutuhan N pada awal pertumbuhan tanaman, sementara SRF menjaga ketersediaan nitrogen berkelanjutan dengan adanya akumulasi klorofil secara optimal. Adapun Nilai SRF + NPK lebih rendah dibanding SRF + Urea, menunjukkan bahwa Nitrogen tetap menjadi faktor pembatas utama klorofil, bukan P atau K. Penambahan P dan K tanpa tambahan N cepat tidak memaksimalkan klorofil. *Sedangkan* SRF + Urea + NPK menghasilkan Nilai klorofil tinggi namun sedikit lebih rendah dari SRF + Urea. Ada kemungkinan dilution effect atau kompetisi ionik. Penambahan input berlebih tidak selalu menghasilkan peningkatan linear. Pemberian pupuk NPK slow-release secara signifikan meningkatkan kandungan klorofil daun jagung dibandingkan kontrol. Kombinasi SRF dengan urea menghasilkan kandungan klorofil tertinggi, mengindikasikan adanya sinergi antara nitrogen cepat tersedia dan nitrogen lepas lambat. Penambahan NPK pada SRF meningkatkan klorofil, namun tidak seefektif penambahan urea, menunjukkan bahwa nitrogen merupakan faktor dominan dalam pembentukan klorofil daun jagung.

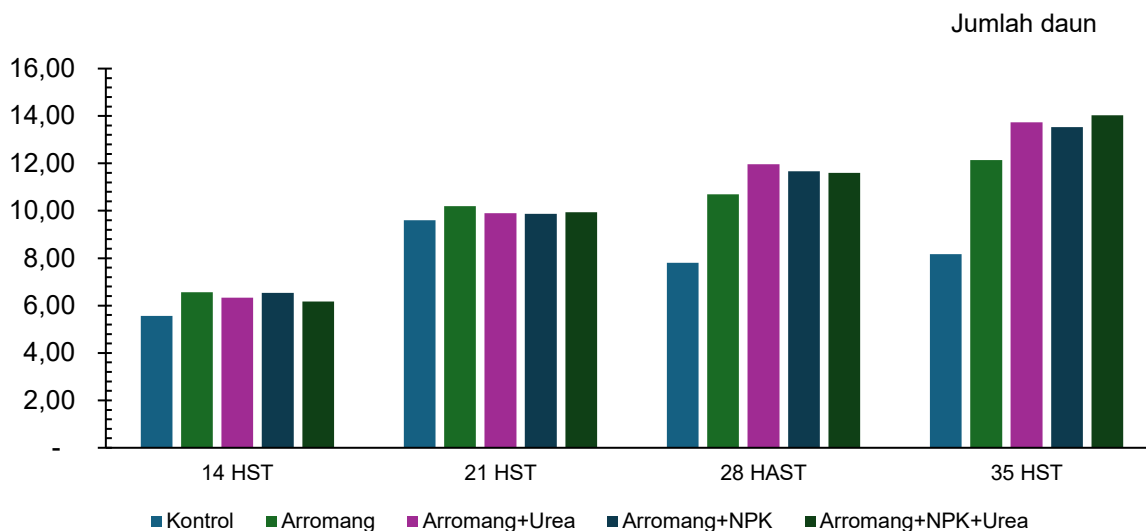


Gambar 16. Indeks kandungan klorofil daun jagung pada umur 35 hari pada pemukan arromang dan kombinasinya

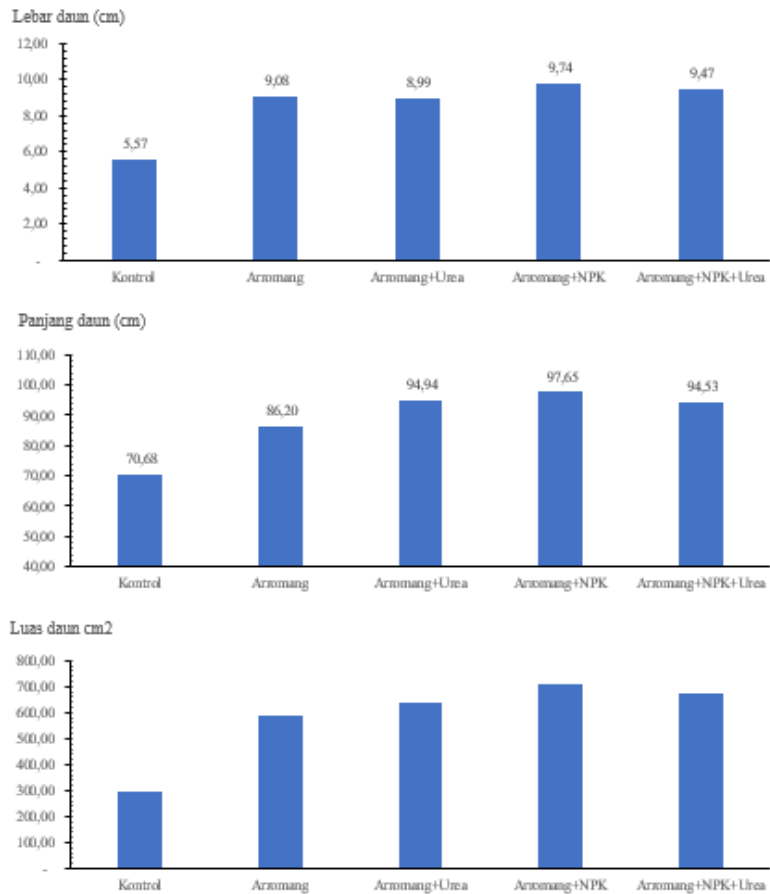
Berdasarkan data pertumbuhan vegetatif tanaman jagung, penggunaan pupuk kimia lepas lambat menunjukkan respon yang lebih baik dibandingkan kontrol pada parameter tinggi tanaman, jumlah daun, dan diameter batang. Perbedaan antar perlakuan mulai tampak nyata pada umur 28–35 HST, ketika kebutuhan hara meningkat, menunjukkan efektivitas mekanisme pelepasan hara bertahap. Perlakuan Arromang yang dikombinasikan dengan NPK dan/atau urea menghasilkan tinggi tanaman dan jumlah daun lebih tinggi, mencerminkan ketersediaan nitrogen yang berkelanjutan untuk mendukung pembelahan dan pemanjangan sel serta pembentukan daun sebagai *source* fotosintat. Diameter batang tertinggi diperoleh pada perlakuan Arromang + NPK (24,85 mm), diikuti Arromang + urea dan Arromang + NPK + urea, sedangkan kontrol dan

Arromang tunggal terendah. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan nitrogen yang terkendali dan keseimbangan hara meningkatkan efisiensi N serta hubungan *source-sink* secara lebih optimal.

Berdasarkan seluruh parameter pertumbuhan vegetatif, penggunaan pupuk kimia lepas lambat menunjukkan respon yang lebih baik dibandingkan kontrol, baik pada perkembangan tajuk daun maupun pertumbuhan batang tanaman jagung. Perlakuan berbasis Arromang meningkatkan panjang dan lebar daun secara nyata, yang tercermin dari kenaikan panjang daun dari 70,68 cm pada kontrol menjadi 86,20–97,65 cm serta lebar daun dari 5,57 cm menjadi 8,99–9,74 cm, sehingga secara implisit meningkatkan luas daun dan **kapasitas fotosintesis**. Peningkatan luas dan jumlah daun ini memperkuat fungsi daun sebagai *source* fotosintat, yang selanjutnya mendukung pertumbuhan tinggi tanaman yang lebih besar pada perlakuan slow-release, terutama pada fase 28–35 HST.

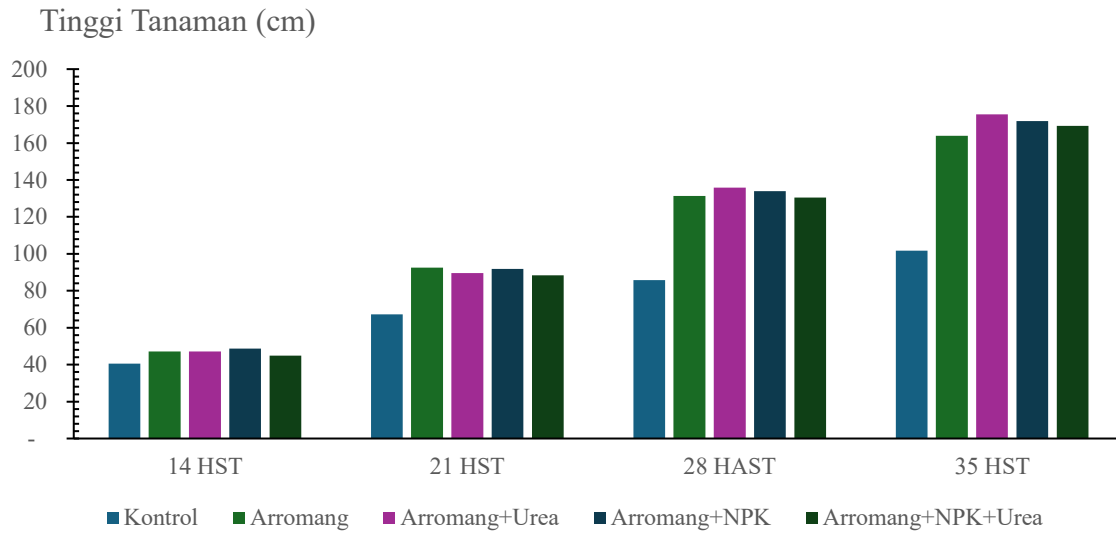


Gambar 17. Rata-rata jumlah daun tanaman jagung selama fase vegetatif

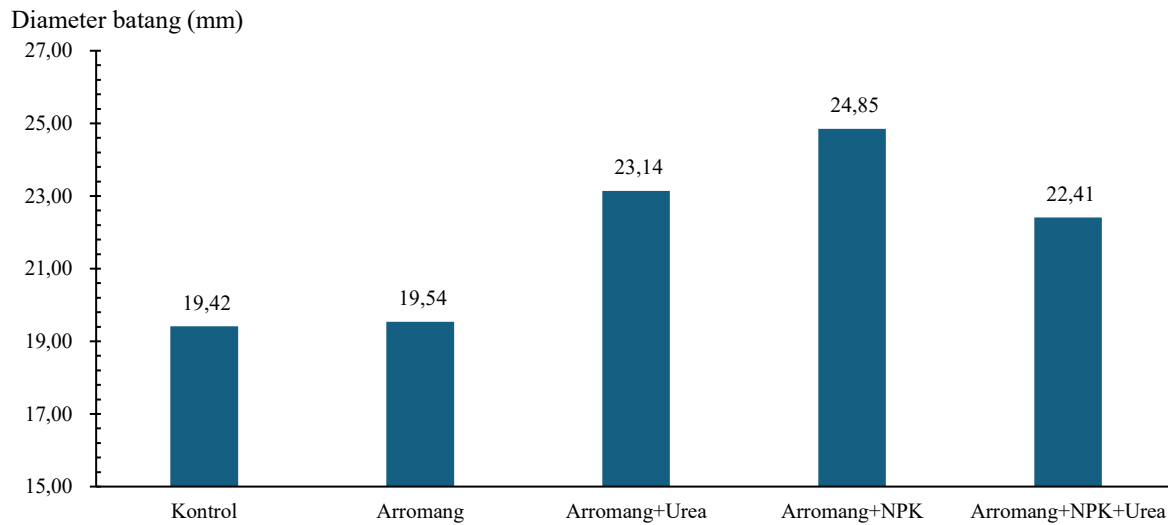


Gambar 18. Rata-rata lebar, panjang dan luas daun jagung pada hari ke-35 pertumbuhan tanaman jagung

Data pertumbuhan vegetatif menunjukkan bahwa penggunaan pupuk SRF NPK berbasis Arromang memberikan respon positif dan berkelanjutan terhadap pertumbuhan tanaman dibandingkan kontrol. Sejak fase awal pertumbuhan (14 HST), perlakuan berbasis SRF telah meningkatkan tinggi tanaman, meskipun perbedaannya relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pelepasan hara dari pupuk SRF berlangsung secara bertahap, sehingga respon awal tanaman tidak bersifat eksplosif sebagaimana pada pupuk cepat larut, tetapi mulai membangun kondisi nutrisi yang lebih stabil. Pada fase pertumbuhan selanjutnya (21–28 HST), perbedaan antarperlakuan semakin nyata. Perlakuan Arromang dan kombinasinya secara konsisten menghasilkan tinggi tanaman yang lebih tinggi dibandingkan kontrol. Memasuki fase 35 HST, perlakuan kombinasi SRF dengan urea atau NPK menunjukkan pertumbuhan tertinggi, sementara SRF Arromang tunggal tetap menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan kontrol. Pola ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara nitrogen cepat tersedia sebagai sumber awal dan pelepasan hara lambat dari SRF untuk menopang pertumbuhan lanjutan. Dengan demikian, tanaman tidak mengalami fase kekurangan hara pada periode kritis pertumbuhan vegetatif.



Gambar 19. Rata-rata tinggi tanaman pertumbuhan tanaman jagung dari 14 HST hingga 35 HST



Gambar 20. Rata-rata diameter batang tanaman jagung pada hari ke-35 pertumbuhan tanaman jagung

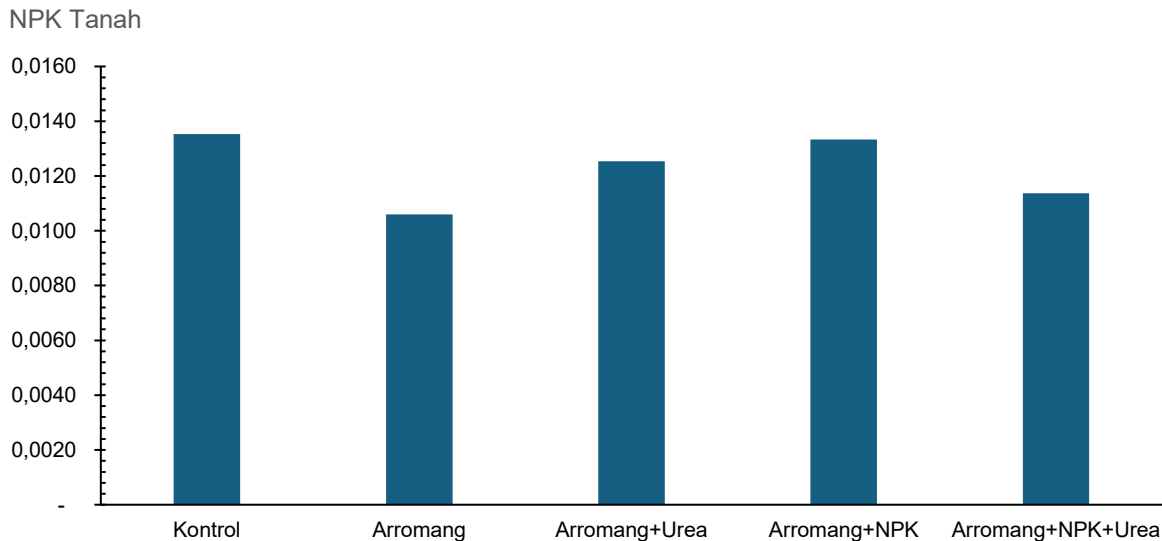


Gambar 21. Pengambilan data agronomi tanaman jagung (mahasiswa agroteknologi)

Pola pelepasan hara NPK

Berdasarkan nilai pelepasan hara, kontrol menunjukkan nilai tertinggi (0,01353), yang mencerminkan ketersediaan hara yang cepat tetapi tidak terkendali, sehingga berpotensi meningkatkan kehilangan hara melalui pencucian atau volatilisasi. Pelepasan pupuk berlapis pada dasarnya adalah transfer nutrisi dari antarmuka pupuk-polimer ke antarmuka polimer-tanah(6). Perlakuan Arromang tunggal memiliki nilai pelepasan terendah (0,0106), menunjukkan karakter pelepasan hara yang paling lambat dan stabil, namun berpotensi kurang menyediakan hara awal bagi tanaman. Kombinasi Arromang dengan pupuk anorganik meningkatkan laju pelepasan hara,

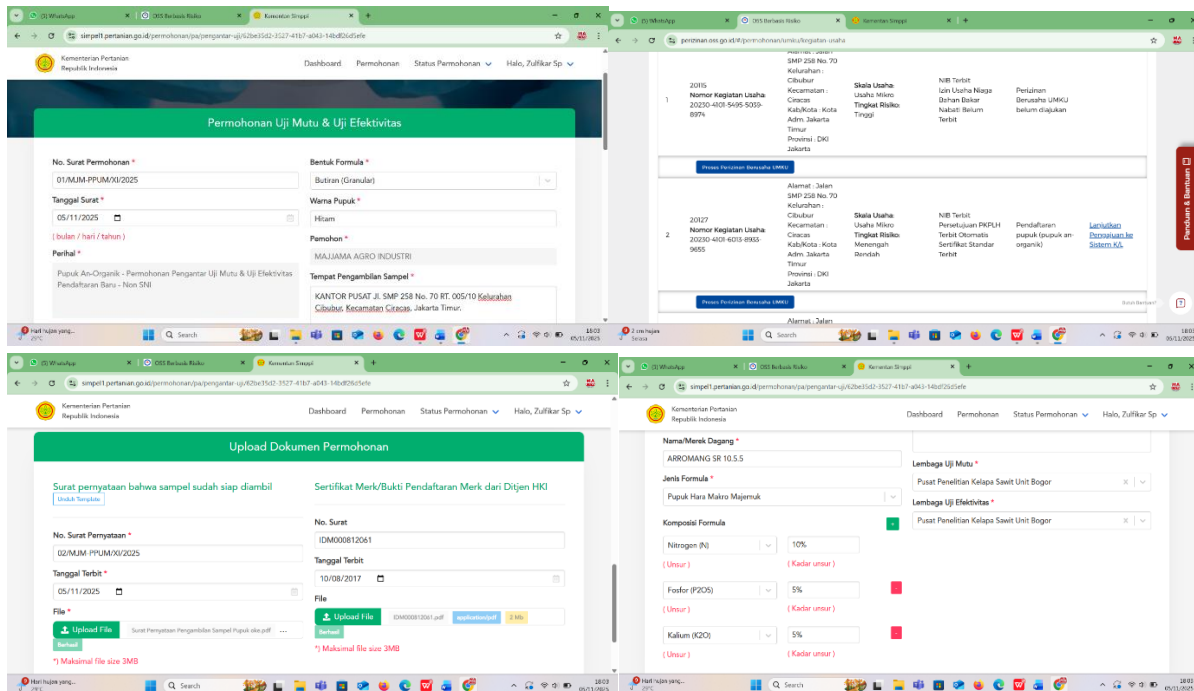
di mana Arromang + NPK (0,0133) mendekati kontrol, sedangkan Arromang + urea (0,0125) dan Arromang + NPK + urea (0,0114) berada pada tingkat menengah. Pola ini menunjukkan bahwa Arromang berfungsi sebagai pengendali pelepasan hara, sementara penambahan urea atau NPK berperan sebagai sumber hara cepat tersedia. Nilai pelepasan hara yang berada pada kisaran menengah mencerminkan kondisi paling ideal bagi pupuk slow-release, karena mampu menyeimbangkan antara ketersediaan hara awal dan suplai hara lanjutan, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara dan mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman secara berkelanjutan.



Gambar 22. Kandungan NPK tanah pada hari ke-35 pemupukan arromang pada media penanaman jagung

E. Penyusunan dokumen izin edar dan pengajuan ke instansi terkait

Penyusunan dokumen izin edar dan pengajuan ke instansi terkait telah dilakukan per tanggal 4 November 2025 oleh mitra PT. Majjama di Jakarta. Penyusunan dokumen izin edar sepenuhnya dibantu oleh mitra PT. Majjama Agroindustri menyangkut kelengkapan administrasi seperti surat pernyataan merk Arromang, Surat pernyataan pengambilan sampel pupuk, Surat permohonan pengantar uji mutu dan Sertifikat merk dari dirjen HKI. Tahapan yang telah dilakukan adalah Proses di situs OSS Majjama Agro Industri, dan Situs Kementan dengan akun Majjama Agro. Pada proses ini, pendaftaran pupuk Arromang NPK 10.5.5 mengalami kendala untuk didaftarkan sebagai pupuk majemuk, karena kandungan hara <30%. Sesuai SNI 2803:2024 kandungan hara N, P₂O₅, dan K₂O minimal 30%. Dengan demikian diperlukan penyesuaian formula awal kandungan NPK 10-5-5 dengan kandungan hara >30%.



Gambar 23. Proses pendaftaran dokumen izin edar dan pengajuan ke kementerian pertanian RI

F. Produksi skala pilot

Produksi skala pilot meliputi dua bagian formulasi yakni formula NPK 10.5.5 sesuai dengan formula awal yang diajukan dan formula NPK>30% diproduksi setelah adanya petunjuk dari kementan terkait prosedur SNI Pupuk NPK Padat yang mensyaratkan kandungan hara NPK>30%. Produksi skala pilot melalui tahapan pengeringan biochar, penepungan, formulasi, pengadukan, granulasi, pengeringan, pengayakan dan pengemasan. Tahapan kegiatan disajikan pada gambar 24 Hasil produksi disajikan pada Gambar 25.



Gambar 24. Prose produksi pupuk skala pilot



Gambar 25. Hasil produksi pupuk skala pilot

G.Kontribusi Mitra PT. Majjama Agro Industri

Mitra Pt Majjama Agro Industri sangat aktif dalam kegiatan hiliriset ini teridentifikasi dari berbagai kegiatan yang dilakukan seperti memfasilitasi dan pendampingan produksi uji coba pupuk Arromang Slow Release ± 3.000 kg, akses lokasi produksi, kelompok tani/usaha binaan, serta dukungan teknis evaluasi proses produksi dan kesiapan uji mutu awal. Selain itu, secara aktif mengunjungi dan memonitoring kegiatan perakitan peralatan dan pendampingan produksi produksi di Kabupaten Soppeng dan Pinrang dan uji lapang di kampus UMPAR dimana biaya akomodasi, transportasi, dan konsumsi kegiatan ditanggung sendiri oleh mitra. Selain dari itu karena terjadi kenaikan harga pada bahan baku pupuk arromang sehingga kekurangan volume bahan baku pupuk Arromang ditanggung oleh mitra serta biaya operasional pendukung kegiatan awal hilirisasi. Dalam hal ini penyediaan bahan baku untuk formula awal pupuk batch 10 kg. Mitra Industri memiliki kontribusi yang cukup tinggi di setiap tahapan kegiatan.



D. STATUS LUARAN: Tuliskan jenis, identitas, dan status ketercapaian luaran yang dijanjikan. Informasi tentang luaran perlu diberikan dengan lengkap. Uraian status luaran harus didukung dengan bukti kemajuan ketercapaian luaran sesuai dengan luaran yang dijanjikan.

Jenis luaran adalah **paten sederhana sudah terdaftar** dengan **nomor registrasi S00202511099**. Judul invensi **FORMULA PUPUK GRANUL NPK 10-5-5 SLOW RELEASE BERBASIS BIOCHAR**, telah telah diumumkan **permohonan paten pada tanggal 18 November 2025 dengan nomor publikasi: 2025/S/04017**. Invensi ini berhubungan dengan suatu produk lebih khusus lagi komposisi pupuk slowrelease dalam bentuk granul berbahan dasar biochar tongkol jagung sebagai matriks pupuk dengan sumber hara kimia terdiri Nitrogen (urea), Fosfat (TSP), Kalium (KCl) serta bahan pengikat (CMC, Zeolit). Invensi ini mengungkap komposisi pupuk granul NPK 10-5-5 Slow Release Berbasis Biochar dengan formulasi Biochar 30% sebagai matriks pupuk dan sumber karbon, unsur hara makro terdiri dari (urea) sebagai sumber Nitrogen (N) 21%, TSP sebagai sumber Fosfor 11% dan KCl sebagai sumber kalium 8%, zeolit 18% dan

Arromang cair 12%. Karakteristik Produk meliputi fraksi air 22,92%, abu 34,04%, volatil 40,59 dan karbon tetap 2,46%. Pupuk granul NPK 10-5-5 mengandung karbon yang sangat stabil dan persisten didalam tanah teridentifikasi dari rasio H/C 0,3% (16,26%:41,67%) dan O/C 0,7% (32,83%:41,67%) dimana nilai ini < dari 6% yang menunjukkan waktu paruh>1000 tahun. Sehingga pupuk granul NPK 10-5 5 bukan hanya sebagai pupuk NPK Slowrelease akan tetapi dapat berfungsi sebagai stok karbon tanah dalam bentuk offset karbon

E. KENDALA PELAKSANAAN PENELITIAN: Tuliskan kesulitan atau hambatan yang dihadapi selama melakukan penelitian dengan lengkap dan mencapai luaran yang dijanjikan, termasuk kendala-kendala yang dihadapi di dalam tim dan mitra. Bagian ini juga termasuk penjelasan jika pelaksanaan penelitian dan luaran tidak sesuai dengan yang direncanakan atau dijanjikan.

Kesulitan yang dihadapi dalam kegiatan ini adalah:1) adanya keterlambatan penyaluran anggaran tahap I terhitung 30 Oktober 2025 dan Tahap II 29 Desember 2025).2)Pemesanan alat produksi yang terlambat akibat lambatnya pencairan anggaran menyebabkan durasi waktu yang singkat untuk mencapai target formula yang konsisten. Hal ini disebabkan pengujian laboratorium antar batch membutuhkan waktu, sementara pengujian dilakukan secara berjenjang antar batch banyak waktu libur yang menyebabkan pelayanan terhenti. 2) Masih dibutuhkan kesesuaian peralatan yang digunakan dengan mutu produk dalam jumlah besar Seperti mesin granula masih perlu disesuaikan kemampuan agitasi untuk mendapatkan butiran yang stabil dalam produksi skala pilot. 3) Adanya kebijakan untuk kandungan hara pupuk NPK>30% menyebabkan formula harus menyesuaikan dengan aturan sehingga perubahani formula asal 10:5:5 (20%) menjadi minimal 30% sebagai syarat pengajuan SNI dan ijin edar. 4) Hasil produksi jagung untuk uji skala lapang belum dapat dilaporkan, karena saat ini umur jagung baru memasuki tahap generatif (45 hari). Akan tetapi dari hasil analisis pertumbuhan dan fisiologi tanaman sudah dapat ditarik kesimpulan terkait pelepasan hara dan kemampuan pupuk mendukung pertumbuhan pada fase vegetatif. Dari sekian parameter yang diuji semua melampaui karakteristik benih hibrida yang digunakan. Hanya saja pupuk yang digunakan masih formula NPK 10:5:5. 5)Kendala utama yang dihadapi adalah terkait pendaftaran ijin edar di PT Majjama belum dapat diteruskan ke tahap uji mutu karena harus melalui SNI. Luaran utama berupa paten belum mendapatkan granted, namun telah memasuki fase pengumuman permohonan paten.

F. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA: Tuliskan dengan detail dan lengkap rencana selanjutnya, termasuk tahun selanjutnya sesuai dengan yang sudah dituliskan di proposal. Penyesuaian aktivitas dan metode untuk hasil dan luaran yang lebih bagus diperkenalkan. Aktivitas dan rencana detail harus menggambarkan dalam mendukung pencapaian tujuan dan luaran penelitian. Gambar, diagram, atau tabel dapat digunakan jika diperlukan.

Rencana kegiatan tahun 2026 disajikan pada Tabel berikut;

Tahapan	Uraian Kegiatan	Out Put	Durasi Waktu
---------	-----------------	---------	--------------

Uji Multilokasi	Uji slowrelease skala lapang pada komoditi bawang merah (Enrekang), Jagung di Soppeng dan Padi Di Pinrang Kentang di Kabupaten Gowa ▪ Kegiatan : sosialisasi demo farm untuk menentukan titik 3 lokasi masing wilayah) ▪ evaluasi dan monitoring demo farm ▪ field day setelah panen di salah satu kegiatan demo farm	✓ Data Komparatif Hasil Uji Antar Lokasi ✓ Rekomendasi Formula dan Dosis Spesifik Lokasi ✓ Peningkatan pemahaman petani terhadap pupuk slowrelase dari kebiasaan pupuk konvensional ✓ Jurnal internasional	4 bulan
Optimasi Hara produk NPK Slow release sesuai SNI	▪ Produksi pupuk 3 kali 300 batch ▪ Uji Mutu produk ▪ Finalisasi berdasarkan SNI	▪ Produk pupuk NPK SRF dengan kandungan hara NPK>30% siap SNI ▪ Paten formula baru	1-2 bulan
Lanjutan Pengajuan Ijin Edar	Pengajuan SNI Uji Lapang	SPPT-SNI dan ijin edar	4 bulan

....

G. DAFTAR PUSTAKA: Penyusunan Daftar Pustaka berdasarkan sistem nomor sesuai dengan urutan pengutipan. Hanya pustaka yang disitasi pada laporan kemajuan yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka.

- [1] European Biochar Certificate (EBC). Guidelines for a sustainable production of biochar. 2022.
- [2] Joseph S, Lehmann J. Biochar for environmental management : science, technology and implementation [Internet]. Second Edi. Joseph JL and S, editor. New york: Routledge; 2015. Available from: <https://biochar-international.org/wp->

content/uploads/2018/11/prelim_ch1_2015biocharforenvironmentalmanagement_text.pdf

- [3] Zimmerman AR. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). *Environ Sci Technol*. 2010;44(4):1295–301.
- [4] Wang C, Luo D, Zhang X, Huang R, Cao Y, Liu G, et al. Environmental Science and Ecotechnology Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture : A mini review. *Environ Sci Ecotechnology* [Internet]. 2022;10:100167. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.es.2022.100167>
- [5] Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management, Science, Technology and Implementation. 2015.
- [6] Azeem B, Kushaari K, Man ZB, Basit A, Thanh TH. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. 2025;181(May 2014):1–8.
- [7] Hessel V, Govil S, Long NVD. Industrial Crops & Products Controlled-release fertiliser : Recent developments and perspectives. 2024;219(June).
- [8] Legese W, Taddesse AM, Kibret K, Wogi L. Heliyon Effects of natural and modified zeolite based composite fertilizers on slow release and nutrient use efficiency. *Heliyon* [Internet]. 2024;10(3):e25524. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25524>
- [9] Rafique MI, Al-wabel MI, Al-farraj ASF, Ahmad M, Aouak T, Al-swadi HA, et al. Incorporation of biochar and semi- interpenetrating biopolymer to synthesize new slow release fertilizers and their impact on soil moisture and nutrients availability. 2025;1–15.
- [10] Guo T, Hu P, Li L, Wang Z, Guo L. Perspective Amorphous materials emerging as prospective electrodes for electrochemical energy storage and conversion. *CHEMPR* [Internet]. 2023;9(5):1080–93. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2023.03.032>