

KARAKTERISTIK FISIK *CARBON DOTS* DAN APLIKASINYA DENGAN PEMUPUKAN UNTUK MENINGKATKAN PRODUKSI DAN MUTU BENIH PADI

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF CARBON DOTS AND ITS APPLICATION WITH FERTILIZER TO INCREASE RICE SEED PRODUCTION AND QUALITY

Aida Fitri Viva Yuningsih^{1,2}, Nafisah², Akhiruddin Maddu³, Mohamad Rahmad Suhartanto^{1*}

¹Progam Studi Ilmu dan Teknologi Benih, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor

²Balai Besar Perakitan dan Modernisasi Tanaman Padi, Badan Perakitan dan Modernisasi
Pertanian, Kementerian Pertanian

³Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor

*Korespondensi: m.r.suhartanto@apps.ipb.ac.id

Diterima: 16 Juni 2025/ Direvisi: 13 Juli 2025 / Disetujui: 18 Juli 2025

ABSTRAK

Carbon dots (CDs) adalah partikel karbon berukuran nano yang telah terbukti mampu meningkatkan perkecambahan benih, pertumbuhan, dan hasil tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi CDs dalam sistem pemupukan terintegrasi dengan pupuk hara makro (NPK) dan bahan organik. Penelitian dilaksanakan pada Musim Kemarau 2023 di lahan sawah irigasi Kebun Percobaan Sukamandi BBRMP Padi dengan Rancangan Petak-petak Terbagi. Kombinasi pupuk NPK (petak utama; tanpa NPK, +PK, +NP, +NK, +NPK), bahan organik (anak petak; pupuk kandang, kompos jerami, tanpa BO), dan aplikasi *foliar* CDs (800 mg L⁻¹) (anak-anak petak; tanpa CDs, +CDs). Hasil percobaan menunjukkan CDs berbasis ampas kopi dari limbah *coffee shop* memiliki sifat larut air, berwarna coklat terang, dan puncak absorpsi pada 300 nm. Pengkayaan nitrogen dengan urea meningkatkan kandungan N dari 2,44% menjadi 16,12%. Kombinasi N dan P sangat mempengaruhi pertumbuhan vegetatif, hasil gabah, dan mutu fisiologis benih. Kombinasi N dan K efektif dalam mempertahankan klorofil pada fase reproduktif. Bahan organik terbukti meningkatkan efisiensi pupuk NPK dan ketersediaan hara, dimana pupuk kandang lebih efektif dibandingkan kompos jerami. Aplikasi CDs meningkatkan efektivitas bahan organik dalam meningkatkan luas daun. Kombinasi pupuk NPK, bahan organik, dan CDs berpotensi menjadi strategi pemupukan efisien dan berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas dan mutu benih padi.

Kata kunci: bahan organik, hasil, luas daun, pupuk NPK, sinergi pupuk

ABSTRACT

Carbon dots (CDs) are nano-sized carbon particles proven to enhance seed germination, plant growth, and yield. This study evaluated CDs in an integrated fertilization system combining macronutrient fertilizers (NPK) and organic matter (OM). The experiment was conducted during the 2023 dry season at the Sukamandi Experimental Station of BBRMP Padi using a Split-split Plot Design. The treatments included NPK combinations (main plot; without NPK, +PK, +NP, +NK, +NPK), OM (sub-plots; manure, straw compost, without OM), and foliar-applied CDs (800 mg L⁻¹)

ISSN : [2407-7933](https://doi.org/10.15575/j.agro.46880)

120

Cite this as: Yuningsih, A.F. V., Nafisah., Maddu, A. & Suhartanto, M. R. (2025). Karakteristik fisik carbon dots dan aplikasinya dengan pemupukan untuk meningkatkan Produksi dan mutu benih padi. *Jurnal Agro*, 12(1), 120-137. <https://doi.org/10.15575/j.agro.46880>

(sub-sub-plots; +CDs, without CDs). The results showed that coffee ground-based CDs from coffee shops were water-soluble, light brown, and had an absorption peak at 300 nm. Nitrogen doping with urea increased the N content from 2,44% to 16,12%. The N and P significantly improved vegetative growth, grain yield, and seed quality, while N and K maintained chlorophyll in the reproductive stage. OM increased NPK efficiency and nutrient availability, with manure more effective than straw compost. CDs enhanced OM in increasing leaf area. The combination of NPK, OM, and CDs shows potential as an efficient and sustainable fertilization strategy to increase rice productivity and seed quality.

Keywords: Fertilizer synergy, leaf area, macronutrient fertilizer, organic matter, yield

PENDAHULUAN

Intensifikasi pertanian adalah suatu strategi dalam budidaya pertanian untuk menjawab tantangan kebutuhan pangan di tengah keterbatasan lahan dengan cara mengoptimalkan input produksi. Penggunaan pupuk NPK anorganik telah mendorong peningkatan hasil panen, namun hasil studi jangka panjang menunjukkan penurunan produktivitas padi akibat penurunan kesuburan tanah (Naher *et al.*, 2019). Praktik pemupukan yang intensif dan tidak berimbang berdampak negatif, seperti serangan hama, degradasi tanah, dan kerusakan sifat fisik kimia dan mikrobiologi tanah (Serrano *et al.*, 2017). Oleh karena itu, pemupukan berimbang dengan kombinasi bahan organik lebih dianjurkan karena dapat memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, serta meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk (Huang *et al.*, 2020; Papadopoulos *et al.*, 2014).

Lingkungan tumbuh tanaman induk tidak hanya memengaruhi produktivitas tanaman tetapi juga mutu benih. Mutu benih ditentukan oleh lingkungan induk selama perkembangan dan pematangan benih (Hampton *et al.*, 2013). Benih merupakan sarana untuk menyalurkan teknologi yang terdapat pada suatu varietas, untuk itu benih harus otentik, hidup (*viable*), dan memiliki vigor yang

tinggi (Nugraha, 2004). Penggunaan benih bermutu berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas lahan dan berpengaruh langsung terhadap efisiensi input.

Perkembangan teknologi nano membuktikan bahwa *carbon dots* (CDs), yaitu material karbon nano berukuran <10 nm dapat berfungsi sebagai *bio-enhancer* dalam sistem pemupukan (Li *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2019). Keunggulan CDs antara lain sintesis yang mudah, toksisitas yang rendah, kelarutan air tinggi, biokompatibilitas, dan biodegradasi, serta bahan baku yang melimpah dan biaya produksi rendah (Li *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020). CDs dapat disintesis dari limbah biomassa termasuk ampas kopi yang ketersediaanya melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal (Crista *et al.*, 2020; Janissen & Huynh, 2018).

Beberapa studi menunjukkan pengaruh CDs terhadap proses fisiologi tanaman. Hasil studi Li *et al.* (2018) menunjukkan perlakuan CDs pada tanaman padi secara signifikan meningkatkan pertumbuhan, hasil panen (sebesar $\pm 14,5$ – $14,8\%$), dan ketahanan tanaman padi terhadap penyakit. CDs mampu menembus hingga inti sel tanaman, melonggarkan struktur DNA, dan meningkatkan ekspresi gen thionin (Os06g32600) yang berperan dalam ketahanan penyakit. CDs juga terdegradasi menjadi analog hormon dan CO₂ yang

mendukung pertumbuhan dan fotosintesis, serta meningkatkan aktivitas enzim RuBisCO hingga 42%. Hasil penelitian Wang *et al.* (2018) pada tanaman kacang hijau yang diberi larutan tanam CDs diperkaya nitrogen ($0,2 \text{ mg mL}^{-1}$) meningkatkan panjang tunas dan akar 1,5 kali lipat dibanding kontrol (air murni), meningkatkan biomassa basah meningkat 17,5% dibanding kontrol, dan efisiensi pertumbuhan lebih tinggi daripada urea, meskipun kandungan N dalam urea (46%) lebih tinggi dibandingkan CDs (20%).

Meskipun potensi CDs telah banyak diteliti di negara lain, aplikasinya dalam sistem produksi benih padi di Indonesia masih sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi penggunaan CDs berbasis ampas kopi terhadap produksi dan mutu benih padi yang diaplikasikan dengan berbagai kombinasi pupuk hara makro (NPK) dan bahan organik.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus-Desember 2023 di Kebun Percobaan (KP) Sukamandi, Laboratorium Pemuliaan, dan Laboratorium Mutu Benih Balai Besar Perakitan dan Modernisasi Pertanian Tanaman Padi (BRMP Padi) di Subang. Lahan percobaan di KP Sukamandi merupakan sawah irigasi untuk penelitian jangka panjang pemupukan dengan metode minus satu unsur hara, dengan tujuan (1) untuk menilai peran spesifik tiap unsur hara (N, P, dan K) secara terpisah, (2) mengidentifikasi unsur pembatas utama, (3) mengevaluasi apakah CDs atau BO dapat menggantikan sebagian fungsi hara makro, (4) menguji efisiensi kombinasi input, dan

(5) menyusun strategi reduksi pupuk anorganik.

Sintesis *carbon dots* dari ampas kopi

Tahap awal penelitian adalah pengujian bahan baku CDs, antara lain, (A) kopi campur gula (kopi kemasan); (B) ampas kopi campur gula; (C) kopi tanpa gula (kopi kemasan); (D) ampas kopi tanpa gula; dan (E) ampas kopi dari *coffee shop* yang telah dikumpulkan tanpa memisahkan jenis kopinya. Sintesis CDs dilakukan dengan metode *microwave* (Triwardiati & Ermawati, 2018) yang dimodifikasi oleh Tim PKM-RE PMFCs IPB.

Tahapan sintesis CDs sebagai berikut, (i) preparasi bahan; (ii) pembuatan suspensi dengan perbandingan bahan kopi (2 g) dan urea (1 g) dilarutkan dalam aquades 300 ml; (iii) pemanasan dengan *microwave* (800 watt) selama 30 menit; (iv) pengeringan dengan oven pada 60°C selama 30 menit; dan (v) karakterisasi sifat fisik CDs dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang 190-800 nm, pengenceran CDs dibuat dengan perbandingan 1 g CDs ampas kopi dalam 400 mL aquades.

Percobaan di lapangan

Benih padi yang digunakan adalah varietas BK Situbondo 01 Agritan yang memiliki karakter umur sangat genjah 100 hari setelah semai (HSS). Benih diperoleh dari Unit Pengelola Benih Sumber (UPBS) BRMP Padi.

Percobaan lapangan ini dirancang dengan Rancangan Petak-petak Terbagi (*Split-split Plot Design*). Pupuk NPK anorganik sebagai petak utama dengan 5 taraf, yaitu tanpa NPK, +PK, +NP, +NK, dan +NPK. Bahan organik (BO) sebagai anak petak dengan 3 taraf, yaitu pupuk kandang, kompos jerami, dan tanpa BO. CDs sebagai

anak-anak petak dengan 2 taraf, yaitu +CDs, dan tanpa CDs. Sebanyak 30 kombinasi perlakuan diulang 3 kali, sehingga terdapat 90 satuan percobaan.

Pertanaman menggunakan sistem tanam pindah dengan umur bibit 21 HSS, dengan 2-3 bibit per lubang. Ukuran jarak tanam 25 x 25 cm, dengan ukuran plot 6,5 x 7 m per satuan percobaan. Penyulaman dilakukan terhadap bibit yang rusak atau mati pada maksimal 10 hari setelah tanam (HST). Pengendalian hama dan penyakit mengikuti rekomendasi pengelolaan hama terpadu (PHT).

Pupuk kandang berupa kotoran hewan sapi dengan dosis aplikasi 9,1 kg per petak. Kompos jerami dibuat dari jerami segar yang difermentasi menggunakan *decomposer* dengan dosis aplikasi 11,7 kg per petak. Bahan organik diaplikasikan setelah pengolahan lahan pertama. Pupuk NPK yang digunakan adalah pupuk tunggal, meliputi; pupuk N sebanyak 140 kg ha⁻¹ (471,84 g urea per petak), P sebanyak 15 kg ha⁻¹ (434,53 g SP36 per petak), dan K sebanyak 50 kg ha⁻¹ (228,41 g KCl per petak), dosis pupuk NPK merujuk Jamil *et al.* (2014). Pemupukan dilakukan pada tiga fase pertumbuhan: pembentukan anakan (31 HSS), anakan maksimum (44 HSS), dan primordia bunga (57 HSS). Pupuk urea diaplikasikan pada ketiga fase, SP36 pada fase awal, dan KCl pada fase awal dan primordia bunga. Aplikasi CDs secara penyemprotan daun dengan konsentrasi 800 mg L⁻¹ (Li *et al.*, 2018) atau setara dosis 134 g ha⁻¹ sehingga diperoleh volume aplikasi sebesar 378 mL per petak, dilakukan sebanyak tiga kali, yaitu pada 32, 45, dan 58 HSS.

Pengukuran kandungan klorofil total daun dilakukan pada 50, 63, dan 90 HSS. Pengukuran luas daun dengan alat ukur Li-

3100 pada 44, 64, dan 85 HSS. Parameter komponen hasil dan hasil yang diamati meliputi jumlah gabah per malai (JGM), bobot gabah total per rumpun (BGR) dan gabah kering giling (GKG). Pengamatan dilakukan pada delapan tanaman sampel per petak percobaan. Penentuan GKG dilakukan melalui panen ubinan berukuran 2.5 m x 3 m pada kadar air $\pm 14\%$ kemudian dikonversi ke satuan ton per hektar.

Ekstraksi dan analisa klorofil daun padi

Analisis kandungan klorofil dilakukan secara destruktif berdasarkan metode Porra *et al.* (1989). Sampel daun diambil pada 50, 63, dan 90 HSS. Dua potongan daun berbentuk cakram (diameter 7 mm; 77 mm²) dimaserasi dan diekstraksi menggunakan methanol 100%. Suspensi klorofil (1,6 mL) dalam *microtube* 2 mL dihomogenkan dengan vortex mixer, kemudian disentrifugasi pada kecepatan 4000 rpm selama 6 menit. Filtrat sebanyak 0,4 mL dicampur dengan 1,6 mL metanol. Selanjutnya, ekstrak dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-Vis 1800) pada panjang gelombang 665 nm dan 652 nm untuk menentukan kadar klorofil daun ($\mu\text{g mL}^{-1}$). Penghitungan konsentrasi klorofil total mengacu pada rumus (Porra *et al.*, 1989).

$$[\text{Chl total}] = 22.12 A_{652} + 2.71 A_{665}$$

Evaluasi mutu benih

Sampel yang digunakan untuk evaluasi mutu fisik dan fisiologis benih telah melalui proses pengeringan benih dengan kadar air benih mencapai $\pm 11\%$. Tetapi untuk uji intensitas dormansi, sampel benih yang digunakan adalah benih yang baru panen.

Pengamatan mutu fisik meliputi nisbah kariopsis/sekam (Nisbah K/S) dan bobot 1000 butir (B1000). Nisbah kariopsis/sekam

dihitung dari perbandingan bobot kariopsis dan sekam pada 100 butir gabah utuh. Bobot 1000 butir ditentukan dengan menimbang 100 butir, lalu dikalikan 10. Seluruh pengujian dilakukan sebanyak empat ulangan.

Mutu fisiologis benih yang dievaluasi meliputi intensitas dormansi (ID), persentase kecambah normal atau daya berkecambah tanpa pematangan dormansi (KN), daya berkecambah (dengan pematangan dormansi) (DB), indeks vigor (IV), dan kecepatan tumbuh (K_{CT}). Intensitas dormansi merupakan karakter dormansi benih yang menunjukkan persentase benih dorman (segar keras) saat panen. Menurut ISTA (2018), jika diduga benih masih dorman dan hasil uji daya berkecambah masih menunjukkan persentase benih dorman >5%, maka pengujian harus diulang dengan perlakuan pematangan dormansi. Daya berkecambah dengan pematangan dormansi dengan perendaman KNO_3 3% selama 24 jam. Indeks vigor adalah persentase kecambah normal pada hitungan pertama. Kecepatan tumbuh dihitung berdasarkan akumulasi kecambah normal per hari selama masa perkecambahan dalam kondisi optimum (Sadjad, 1993).

Analisa persentase kecambah normal dilakukan dengan metode kertas dilipat (*folded-paper*) dengan modifikasi kertas CD (kertas buram), pengecambahan dilakukan

dalam *germinator*. Pengamatan hitungan pertama dilakukan pada hari ke-5, dan pengamatan hitungan kedua dilakukan pada hari ke-14. Setiap pengujian diulang sebanyak empat kali dengan jumlah sampel per ulangan adalah 100 butir (ISTA, 2018).

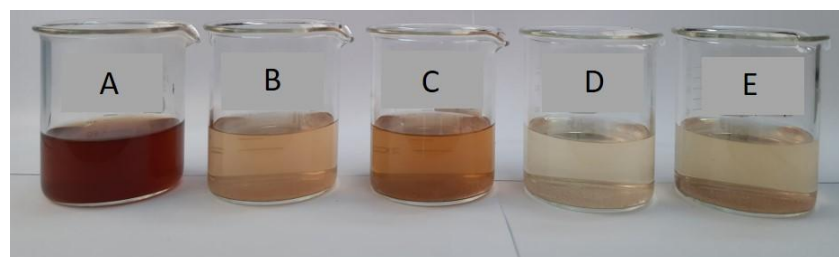
Analisis statistik

Analisis ragam (uji F) data yang diperoleh menggunakan program RStudio pada selang kepercayaan 95%. Apabila diperoleh hasil berbeda nyata maka dilakukan uji lanjut DMRT (*Duncan Multiple Range Test*) pada taraf 5% untuk melihat perbedaan antar perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

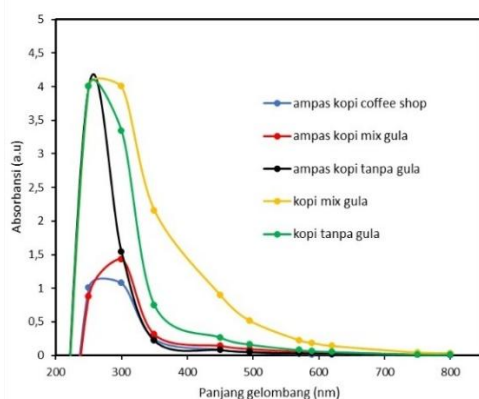
Karakteristik *carbon dots* ampas kopi

Berdasarkan pengamatan visual (Gambar 1), larutan CDs dari ampas kopi (B, D, E) cenderung lebih terang dibandingkan larutan CDs serbuk kopi (A, C), mengindikasikan perbedaan struktur dan gugus fungsi permukaan antar sampel (Isnaeni *et al.*, 2023). Hal ini diduga akibat hilangnya sebagian senyawa aktif selama penyeduhan dan adanya reaksi oksidasi yang selama ekstraksi kopi (Sunogrot *et al.*, 2021). Larutan CDs dari ampas kopi dengan campuran gula (B) menunjukkan warna lebih gelap dibandingkan tanpa gula (D, E), kemungkinan ini akibat reaksi karamelisasi saat pemanasan (>80°C) (Salsabila *et al.*, 2024).



Gambar 1. Larutan CDs dari bahan baku: (A) kopi campur gula; (B) ampas kopi campur gula; (C) kopi tanpa gula; (D) ampas kopi tanpa gula; dan (E) ampas kopi dari *coffee-shop*

Uji spektrofotometri UV-Vis (Gambar 2) menunjukkan semua sampel memiliki puncak absorbansi utama sekitar 230-300 nm, yang mengindikasikan transisi $\pi-\pi^*$ dari struktur aromatik (Kang *et al.*, 2020; Pratiwi & Nandiyanto, 2022). CDs kopi campur gula memiliki puncak absorbansi tertinggi, diikuti oleh CDs kopi tanpa gula, CDs ampas kopi tanpa gula, CDs ampas kopi campur gula, dan ampas kopi *coffee shop*. Absorbansi tinggi mencerminkan tingginya kandungan senyawa penyerap UV, yang kemungkinan berasal dari kombinasi senyawa kopi dan gula. Meski dapat meningkatkan aktivitas optik, kompleksitas senyawa kopi dan gula dapat mengganggu kestabilan sintesis CDs (Fawaz *et al.*, 2023). Sebaliknya, CDs dari ampas kopi menunjukkan absorbansi lebih rendah menandakan sebagian besar senyawa aktif telah terdegradasi dan masih menunjukkan puncak absorbansi pada 270-300 nm, yang menandakan keberadaan prekursor penting untuk pembentukan CDs.

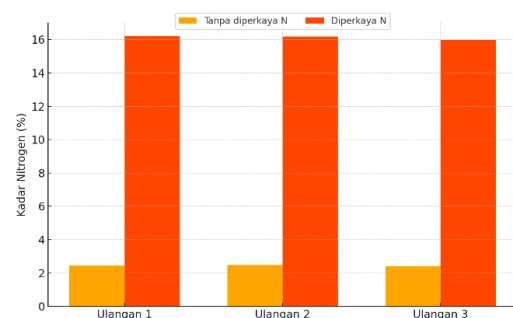


Gambar 2. Absorbansi CDs hasil sintesis dari: kopi campur gula (A); ampas kopi campur gula (B); kopi tanpa gula (C); ampas kopi tanpa gula (D); ampas kopi dari *coffee shop* (E)

Ampas kopi *coffee shop* dipilih sebagai bahan baku sintesis CDs karena berasal dari biji murni (arabika/robusta), minim

kontaminan (krimer, pemanis), serta tergolong limbah organik yang sudah terdegradasi sebagian dan tersedia dalam jumlah besar (Cai *et al.*, 2025). Ketersediaan ampas kopi *coffee shop* mendukung kualitas dan keberlanjutan produksi CDs.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa pengkayaan atau doping dengan urea meningkatkan kadar N dari rata-rata 2,4% menjadi 16%, ini tidak saja mengindikasikan keberhasilan proses doping yang presisi, juga konsistensi dan kestabilan secara replikasi. CDs diperkaya N ini berfungsi ganda sebagai bahan nano aktif yang berpotensi meningkatkan efisiensi serapan hara dan metabolisme tanaman, dan juga sebagai pembawa nitrogen, yang berkontribusi terhadap pembentukan klorofil.



Gambar 3. Perbandingan kadar nitrogen (%) pada CDs ampas kopi tanpa dan dengan pengayaan nitrogen (urea)

Kandungan klorofil total dan luas daun

Klorofil merupakan pigmen fotosintesis utama pada tumbuhan tingkat tinggi yang berperan dalam penyerapan, transmisi, dan konversi energi cahaya selama fotosintesis (Ma *et al.*, 2021). Kandungan klorofil mencerminkan kapasitas fotosintesis daun dan sering digunakan sebagai indikator pertumbuhan tanaman (Zhang & Zhou, 2019).

Analisis ragam ($\alpha=5\%$) menunjukkan perlakuan NPK berpengaruh sangat nyata

terhadap kandungan klorofil total daun pada 50 HSS ($F = 18,34$; $p < 0,001$), 63 HSS ($F = 65,49$; $p < 0,001$), dan 90 HSS ($F = 11,2$; $p < 0,01$). Bahan organik (BO) memberikan pengaruh nyata hanya pada fase akhir pertumbuhan atau 90 HSS ($F = 4,58$; $p < 0,05$).

Tanaman yang diberi pupuk mengandung N (+NK, +NP, dan +NPK) secara konsisten menunjukkan kandungan

klorofil total daun lebih tinggi dibandingkan pemupukan minus N (+PK, tanpa NPK) (Tabel 1). Hal ini menegaskan bahwa N adalah unsur hara kunci dalam pembentukan dan pemeliharaan klorofil daun. Ini konsisten dengan fungsi N sebagai komponen utama klorofil (Mu & Chen, 2021), dan defisiensi terhadap N dapat mempercepat penurunan klorofil (Peng *et al.*, 2021).

Tabel 1. Kandungan klorofil total pada daun ($\mu\text{g mL}^{-1}$) terhadap pemberian pupuk NPK

Perlakuan NPK	50 HSS	63 HSS	90 HSS
Tanpa NPK	3,53 b	2,25 b	1,61 c
+PK	3,38 b	2,37 b	1,46 c
+NP	4,45 a	3,68 a	2 b
+NK	4,29 a	3,59 a	2,69 a
+NPK	4,38 a	3,63 a	2,25 b

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata pada taraf nyata 5% berdasarkan uji DMRT

Konsentrasi klorofil total daun tertinggi dicapai oleh pemupukan +NK ($2,69 \mu\text{g mL}^{-1}$) bahkan lebih tinggi dari +NPK pada akhir pengamatan (Tabel 1). Hal ini menunjukkan kombinasi N dan K sangat efektif dalam mempertahankan kadar klorofil pada fase reproduktif aktif (*stay green*). Nitrogen secara mutlak diperlukan untuk pembentukan klorofil dan menjaga aktivitas fotosintesis daun. Kalium memperkuat efek nitrogen dalam mempertahankan klorofil pada fase akhir pertumbuhan. Formulasi pupuk yang tepat pada fase ini sebaiknya tetap mengandung N dan ditambah K untuk

mempertahankan efisiensi fotosintesis dan hasil gabah yang optimal.

Tabel 2 menunjukkan bahwa penambahan bahan organik tidak berpengaruh nyata terhadap kandungan klorofil total daun pada 50 dan 63 HSS. Kandungan klorofil tanaman yang diberi kompos jerami ($2,1 \mu\text{g mL}^{-1}$) pada 90 HSS setara dengan tanpa BO ($2,11 \mu\text{g mL}^{-1}$), menunjukkan kompos jerami tidak menekan atau merusak aktivitas fotosintesis, tapi juga tidak meningkatkan. Diduga karena kompos jerami bersifat *slow-release*, perlu waktu untuk terurai menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman.

Tabel 2. Kandungan klorofil total daun ($\mu\text{g mL}^{-1}$) terhadap pemberian bahan organik

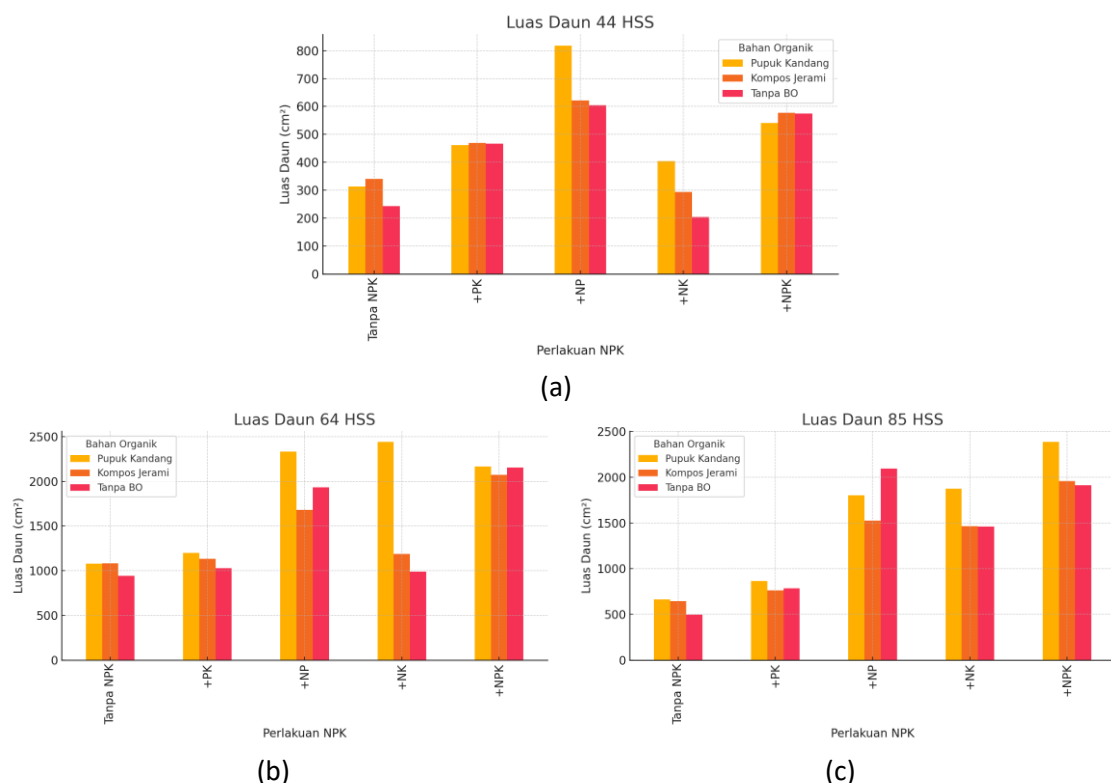
Perlakuan BO	50 HSS	63 HSS	90 HSS
Pupuk Kandang	3,91	3,13	1,79 b
Kompos Jerami	4,16	3,14	2,1 a
Tanpa BO	3,95	3,05	2,11 a

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata pada taraf nyata 5% berdasarkan uji DMRT

Sebaliknya, pupuk kandang menurunkan kadar klorofil, diduga akibat pasokan N habis sebelum fase generatif. Hal ini mengindikasikan bahwa pelepasan hara dari pupuk kandang tidak selaras dengan kebutuhan N tanaman. Ketika tanaman memasuki fase pembentukan malai dan pengisian biji, kebutuhan nitrogen meningkat untuk mempertahankan aktivitas fotosintesis, kekurangan N pada fase ini dapat memicu degradasi klorofil secara dini, yang ditandai dengan penurunan kehijauan daun dan menguningnya daun bagian atas. Tanpa pemupukan lanjutan nutrisi yang tersedia dari pupuk kandang terserap sepenuhnya pada fase vegetatif. Oleh karena itu, aplikasi pupuk kandang perlu dikelola secara tepat, baik melalui kombinasi dengan pupuk

anorganik maupun pemberian ulang, agar ketersediaan hara tetap terjaga pada saat tanaman membutuhkannya (Havlin *et al.*, 2017; Weil & Brady, 2016).

Hasil analisis ragam ($\alpha=5\%$) menunjukkan bahwa interaksi NPK x BO memberikan pengaruh nyata pada semua waktu pengamatan 44 HSS ($F=3,4$; $p<0,05$), 64 HSS ($F = 5,35$; $p<0,01$), dan 85 HSS ($F = 2,97$; $p<0,05$), hal ini menunjukkan kombinasi perlakuan NPK dan BO memberikan efek sinergis terhadap pertumbuhan daun. Interaksi bahan organik dan carbon dots (BO x CDs) juga nyata terhadap luas daun pada 44 HSS ($F = 8,69$; $p<0,01$), ini mengindikasikan bahwa pengaruh CDs terhadap efektivitas bahan organik lebih kuat pada fase awal pertumbuhan.



Gambar 4. Pengaruh pemberian NPK dan bahan organik terhadap luas daun tanaman padi pada 44 HSS (a), 64 HSS (b), dan 85 HSS (c)

Pemupukan +NP baik dengan dan tanpa BO menghasilkan luas daun lebih tinggi

pada fase awal pertumbuhan (44 HSS), bahkan lebih tinggi dibandingkan dengan

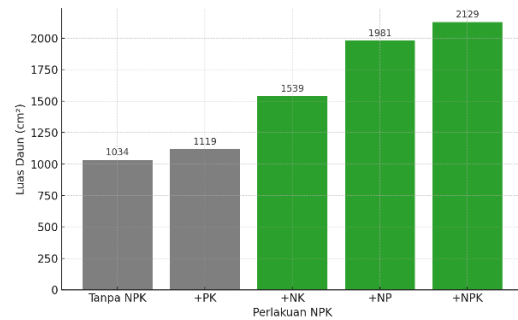
+NPK (Gambar 4a). Tanaman tanpa NPK dan +NK memperlihatkan pertumbuhan luas daun yang lebih rendah. Hal ini mengindikasikan peran N dan P sebagai pembatas utama perkembangan vegetatif awal. Ketersediaan P sangat penting pada fase awal pertumbuhan, karena mendukung pembelahan sel, perkembangan akar, dan efisiensi metabolisme energi (Ahmad *et al.*, 2017).

Tren serupa masih terlihat pada 64 HSS, pemupukan +NPK dan +NP menghasilkan luas daun lebih tinggi, baik dengan dan tanpa BO (Gambar 4b). Penambahan pupuk kandang mampu meningkatkan luas daun terutama pada pemupukan +NK dan +NP.

Pada 85 HSS, pemupukan mengandung N (+NP, +NK, +NPK) baik dengan dan tanpa BO menunjukkan luas daun yang lebih tinggi (Gambar 4c), ini menunjukkan pentingnya nitrogen sepanjang fase pertumbuhan tanaman. Tanaman yang diberi +NPK dengan pupuk kandang menghasilkan luas daun tertinggi. Pupuk kandang dapat mempertahankan luas daun sampai dengan akhir pengamatan.

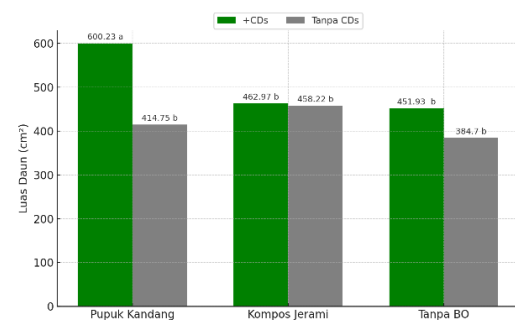
Pemberian N sangat meningkatkan luas daun, tanpa N (abu-abu) luas daun rendah sekitar 1034-1119 cm², sedangkan dengan N (hijau) luas daun meningkat drastis mencapai hingga 2129 cm² (Gambar 5). Hal ini menegaskan pentingnya nitrogen dalam metabolisme tanaman, selain berperan dalam pembentukan protein dan klorofil, nitrogen juga merupakan komponen senyawa transfer energi seperti adenosin difosfat (ADP) dan adenosin trifosfat (ATP) yang penting dalam metabolisme sel, pasokan nitrogen yang cukup meningkatkan fotosintesis, pertumbuhan vegetatif, dan kehijauan daun (Taiz & Zeiger, 2002). Nitrogen mendorong pertumbuhan cepat (tinggi tanaman dan jumlah anakan), dan

peningkatan ukuran daun. Konsentrasi nitrogen dalam daun berkorelasi erat dengan laju fotosintesis daun dan produksi biomassa tanaman (Dobermann & Fairhurst, 2000).



Gambar 5. Pengaruh pemberian N terhadap luas daun padi pada 64 HSS

Berdasarkan Gambar 6, pada 44 HSS kombinasi CDs dan pupuk kandang secara nyata menghasilkan luas daun tertinggi (600,23 cm²), sementara tanpa BO dan tanpa CDs menunjukkan luas daun terendah (384,7 cm²). Pupuk kandang lebih efektif daripada kompos jerami karena kandungan N yang lebih tersedia.



Gambar 6. Pengaruh interaksi BO dan CDs terhadap luas daun tanaman padi pada 44 HSS. Angka yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf nyata 5% berdasarkan uji DMRT.

Kompos jerami memiliki rasio C/N tinggi, artinya kaya karbon tapi miskin N, menyebabkan imobilisasi N oleh mikroba selama dekomposisi, sehingga daun kekurangan N untuk pertumbuhan. Selain

itu, jerami mengandung tinggi lignin dan selulosa, sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk terurai (Weil & Brady, 2016). CDs meningkatkan efektivitas pupuk kandang, terutama dengan meningkatkan ketersediaan N (Pan et al., 2024), namun tidak sepenuhnya menggantikan fungsi bahan organik. Hubungan CDs dan BO bersifat komplementer dan memperkuat efek positif BO terhadap pertumbuhan.

Komponen hasil dan hasil

Hasil analisis ragam ($\alpha=5\%$) menunjukkan bahwa interaksi perlakuan NPK $\times$ BO memberikan pengaruh nyata terhadap seluruh parameter komponen hasil dan hasil yang diamati, jumlah gabah per malai ($F = 4,38$; $p<0,01$), bobot gabah

per rumpun ($F = 5,48$; $p<0,001$), dan gabah kering giling ($F = 6,9$; $p<0,001$). Sedangkan interaksi BO $\times$ CDs hanya berpengaruh nyata terhadap jumlah gabah per malai ($F = 3,89$; $p<0,05$). Tidak ditemukan pengaruh nyata baik dari interaksi NPK $\times$ CDs maupun ketiga perlakuan.

Tabel 3 menunjukkan pemupukan +NPK dan +NP baik dengan dan tanpa BO menghasilkan jumlah gabah per malai, bobot gabah total per rumpun, dan gabah kering giling (GKG) yang lebih tinggi dibandingkan dengan pemupukan lainnya. Hal ini menunjukkan pentingnya peran unsur hara makro, terutama P dalam mendukung pembentukan dan pengisian gabah (Ahmad *et al.*, 2017).

Tabel 3. Pengaruh interaksi perlakuan NPK dan bahan organik terhadap komponen hasil dan hasil tanaman padi

Perlakuan	Tanpa NPK	+PK	+NP	+NK	+NPK
Jumlah Gabah per Malai (butir)					
Pupuk Kandang	91,74 d-f	99,07 cd	113,13 a	115,94 a	116,57 a
Kompos Jerami	82,63 f	95,83 de	109,47 a-c	100,01 b-d	118,24 a
Tanpa BO	86,51 ef	92,27 d-f	112,57 a	85,13 ef	109,88 ab
Bobot Gabah Total per Rumpun (g)					
Pupuk Kandang	23,15 c	25 c	39,78 a	43,28 a	42,56 a
Kompos Jerami	20,05 c	24,7 c	40,16 a	31,95 b	44,9 a
Tanpa BO	22,69 c	22,09 c	39,5 a	24,48 c	42,33 a
Gabah Kering Giling ($t\ ha^{-1}$)					
Pupuk Kandang	4,4 d	5,33 b-d	7,63 a	7,15 ab	7,4 a
Kompos Jerami	4,26 d	5,15 cd	7,26 ab	5,31 b-d	7,51 a
Tanpa BO	3,42 d	4,77 d	6,94 a-c	3,42 d	7,76 a

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf nyata 5% berdasarkan uji DMRT

Penambahan BO, terutama pupuk kandang meningkatkan komponen hasil dan hasil secara nyata pada tanaman +NK. Hal ini menunjukkan peran BO sebagai sumber P tambahan pada fase reproduktif. Namun, penambahan BO tidak efektif meningkatkan hasil pada pemupukan minus N (+PK, tanpa NPK), jumlah gabah per malai (<99 butir),

bobot gabah total per rumpun (<26 g), dan GKG ($<5,4\ t\ ha^{-1}$). Hal ini menegaskan ketergantungan hasil pada hara makro N (Kalaji *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2017). Kombinasi sebagian hara makro (+NP, +NK) dengan BO dapat menjadi strategi efisien, karena BO meningkatkan efektivitas pupuk anorganik melalui peningkatan retensi hara

dan perbaikan kesuburan tanah (Weil & Brady, 2016).

Tabel 4 menunjukkan pengaruh CDs terhadap jumlah gabah per malai bergantung pada jenis BO yang digunakan, dan pemberian CDs tidak dapat menggantikan peran BO. Penambahan CDs pada tanaman yang diberi BO, baik pupuk kandang (104,21 ab) dan kompos jerami (103,3 b) menghasilkan jumlah gabah per malai yang tidak beda nyata dengan tanpa penambahan CDs (110,37 a; 99,17 bc).

Pemberian CDs tanpa BO menghasilkan jumlah gabah per malai yang lebih rendah (94,82 butir) dan tidak berbeda nyata dengan tanpa CDs dan tanpa BO (99,73 butir). Hal ini menunjukkan bahwa pemberian CDs dengan dosis 800 mg L⁻¹ pada

percobaan ini tidak memberikan pengaruh positif terhadap jumlah gabah per malai. Oleh karena, efektivitas penggunaan CDs dalam meningkatkan komponen hasil perlu dikaji lebih lanjut melalui optimasi dosis dan waktu aplikasi CDs.

Tanpa BO dan tanpa CDs, tanaman masih dapat menghasilkan jumlah gabah per malai yang tidak beda nyata dengan tanpa BO tanpa CDs dan kompos jerami dengan CDs, hal ini diduga karena tanaman tidak kekurangan unsur hara penting pada saat fase kritis pembentukan malai. Komponen hasil sangat ditentukan oleh ketersediaan hara saat fase primordia bunga dan pembentukan malai (Dobermann & Fairhurst, 2000; Havlin *et al.*, 2017).

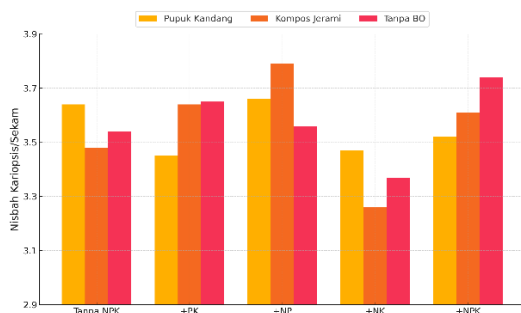
Tabel 4. Pengaruh interaksi BO dan CDs terhadap jumlah gabah per malai tanaman padi

Perlakuan	+CDs	Tanpa CDs
Pupuk Kandang	104,21 ab	110,37 a
Kompos Jerami	103,3 b	99,17 bc
Tanpa BO	94,82 c	99,73 bc

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf nyata 5% berdasarkan uji DMRT

Mutu fisik dan fisiologis benih

Berdasarkan analisis ragam ($\alpha=5\%$) diketahui interaksi NPK x BO memberikan pengaruh yang nyata terhadap mutu fisik benih yang diuji, nisbah kariopsis/sekam ($F = 2,59$; $p<0,05$) dan bobot 1000 butir ($F = 2,81$; $p<0,05$).



Gambar 7. Pengaruh perlakuan NPK dan bahan organik terhadap nisbah kariopsis/sekam benih padi

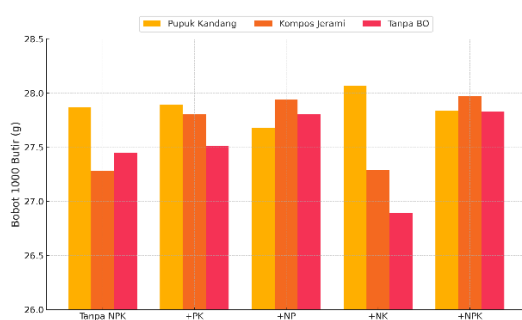
Nisbah kariopsis/sekam mencerminkan tingkat pengisian gabah, dimana nilai yang tinggi mengindikasikan rendemen benih lebih baik. Pada tanaman yang diberi +NPK tanpa BO menghasilkan nisbah K/S yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang diberi BO, mengindikasikan nutrisi dari pupuk anorganik lengkap cukup untuk mendukung pengisian biji, bahkan tanpa BO (Gambar 7).

Pemberian BO pada +NP meningkatkan nisbah K/S, dengan penambahan kompos jerami menghasilkan nisbah yang tertinggi. Penambahan BO pada +PK, tidak mampu

meningkatkan nisbah K/S, menandakan tanpa N pengisian biji kurang optimal. Sebaliknya, penambahan pupuk kandang pada tanaman tanpa NPK mampu memberikan nisbah K/S lebih tinggi, mengindikasikan tanpa NPK, pupuk kandang dapat mendukung pengisian biji.

Tanaman yang diberi +NK menunjukkan nisbah K/S lebih rendah, ini mengindikasikan kekurangan P membatasi pembentukan dan pengisian gabah. Unsur hara P penting dalam sintesis energi (ATP) dan transfer asimilat (Ahmad et al., 2017; Dobermann & Fairhurst, 2000).

Bobot 1000 butir mencerminkan efisiensi pengisian biji. Pemupukan +NPK baik dengan dan tanpa BO memberikan bobot 1000 butir yang relatif lebih tinggi, mengindikasikan bahwa ketersediaan NPK lengkap sudah mampu mengoptimalkan pengisian gabah (Gambar 8). Pada pemupukan +NP, penambahan kompos jerami menghasilkan bobot 1000 butir yang lebih tinggi, ini menunjukkan bahwa unsur hara K yang terbatas masih dapat diimbangi dengan ketersediaan N dan P, terutama ketika disertai dengan kompos jerami.



Gambar 8. Pengaruh perlakuan NPK dan bahan organik terhadap bobot 1000 butir benih padi

Penambahan BO pada pemupukan +NK dan +PK meningkatkan bobot 1000 butir, bahkan pupuk kandang memberikan bobot yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pupuk kandang berkontribusi

menyediakan N dan P organik yang berperan dalam pembentukan hasil. Tren yang serupa ditunjukkan pada tanaman tanpa NPK, hal ini menunjukkan bahwa pupuk kandang mampu menyediakan unsur hara makro yang berperan penting dalam pengisian gabah meskipun tanpa pupuk anorganik.

Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi sebagian hara makro (+NP, +NK) dengan BO, efektif dalam meningkatkan pengisian gabah dan mutu fisik benih, bahkan ketika kondisi hara tidak lengkap. Sebaliknya, peran BO menjadi kurang kuat, ketika NPK lengkap tersedia. Pengelolaan pemberian bahan organik sebaiknya disesuaikan dengan kondisi hara tanah dan kebutuhan fisiologis tanaman untuk mendukung pembentukan gabah yang optimal.

Analisis ragam ($\alpha=5\%$) menunjukkan perlakuan NPK berpengaruh nyata terhadap seluruh variabel mutu fisiologis benih yang diamati, intensitas dormansi ($F = 3,98$; $p<0,05$), persentase kecambah normal (DB) tanpa pematangan dormansi ($F = 8,43$; $p<0,01$), daya berkecambah ($F = 5,54$; $p<0,01$), indeks vigor ($F = 31,62$; $p<0,001$), dan kecepatan tumbuh ($F = 14,42$; $p<0,001$).

Berdasarkan Tabel 5 diketahui bahwa seluruh benih yang diuji menunjukkan intensitas dormansi tinggi ($>95\%$), mengindikasikan bahwa benih varietas BK Situbondo 01 Agritan masih dorman saat panen. Dormansi benih masih berlanjut setelah proses pengolahan benih, ditunjukkan dengan daya berkecambah tanpa pematangan dormansi yang rendah (4,6-17,06%).

Namun demikian, benih menunjukkan daya berkecambah yang tinggi ($>80\%$), dengan nilai tertinggi pada perlakuan pupuk +NPK (90,9%), tidak beda nyata dengan +NP (90,75%) dan +PK (90,31%). Hal ini menegaskan bahwa pemupukan hara

makro, khususnya fosfor (P), berperan penting terhadap viabilitas benih, melalui keterlibatannya dalam metabolisme energi (Ahmad *et al.*, 2017).

Indeks vigor dan kecepatan tumbuh (K_{CT}) merupakan variabel mutu fisiologis benih yang berhubungan dengan parameter kekuatan tumbuh, karena benih yang cepat tumbuh lebih mampu menghadapi kondisi lingkungan yang tidak optimum (Kolasinska *et al.* 2000). Indeks vigor berkisar antara 77,5–85,96%, dengan nilai tertinggi diperoleh dari pemupukan +NPK (85,96%) dan +NP (85,67%) (Tabel 5). Hal ini memperkuat dugaan bahwa P berkontribusi besar dalam pembentukan vigor benih.

Kecepatan tumbuh berada dalam kisaran sempit (12,83–14,43%/etmal) (Tabel 5). Nilai

tertinggi tercatat pada pemupukan +NP (14,43%/etmal), artinya hanya butuh $\pm 6,93$ hari untuk mencapai 100% perkecambahan. Sebaliknya, perlakuan +NK (minus P) menunjukkan K_{CT} terendah (12,83%/etmal), ini semakin menegaskan kontribusi P dalam pembentukan vigor benih melalui dukungannya terhadap proses energi dan pertumbuhan embrio. Nitrogen dan fosfor dalam benih telah terbukti menjadi faktor kunci dalam perkecambahan benih tanaman dengan mengatur aktivitas enzim, reaksi metabolisme dan pasokan energi selama perkecambahan benih. Vigor benih telah terbukti berkorelasi erat dengan cadangan nutrisi benih (Ahmad *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2025).

Tabel 5. Pengaruh pupuk NPK terhadap intensitas dormansi (%), daya berkecambah tanpa pematangan dormansi (%), daya berkecambah benih (%), indeks vigor (%), dan kecepatan tumbuh (%/etmal) benih padi

Perlakuan	ID	KN	DB	IV	K_{CT}
Tanpa NPK	95,35 bc	17,06 a	87,98 bc	77,5 c	13,65 b
+PK	95,15 c	13,35 a	90,31 ab	77,5 c	13,72 b
+NP	96,38 ab	13,35 a	90,75 ab	85,67 a	14,43 a
+NK	96,25 a-c	5,67 b	86,25 c	83,15 b	12,83 c
+NPK	96,9 a	4,6 b	90,9 a	85,96 a	13,09 c

Keterangan: ID = intensitas dormansi, KN = daya berkecambah tanpa pematangan dormansi, DB = daya berkecambah, IV = indeks vigor, K_{CT} = kecepatan tumbuh benih. Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama berbeda nyata pada taraf nyata 5% berdasarkan uji DMRT

Carbon dots dari ampas kopi menunjukkan potensi sebagai stimulan pertumbuhan vegetatif, terutama ketika dikombinasikan dengan bahan organik. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa CDs dapat berperan sebagai stimulan pertumbuhan tanaman, khususnya pada fase vegetatif, melalui peningkatan fotosintesis dan luas daun (Guo *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018). Namun, pengaruhnya terhadap hasil dan mutu benih belum nyata, kemungkinan

karena perannya terbatas pada fase awal pertumbuhan serta sangat bergantung pada dosis, waktu aplikasi, dan dukungan faktor lain seperti ketersediaan hara makro dan bahan organik. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan pendekatan multi musim serta optimasi dosis dan waktu aplikasi perlu dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas jangka panjang CDs terhadap hasil dan mutu benih padi.

Aplikasi pupuk NPK dan bahan organik mampu mengoptimalkan pertumbuhan, meningkatkan produksi dan mutu benih padi

varietas BK Situbondo 01 Agritan. Nitrogen meningkatkan kandungan klorofil, ukuran daun, jumlah gabah per malai, bobot gabah total per rumpun, dan GKG. Dengan demikian, nitrogen memengaruhi seluruh parameter yang berkontribusi terhadap hasil panen (Dobermann & Fairhurst, 2000; Havlin *et al.*, 2017).

Kombinasi atau sinergi N dan P (+NP, +NPK) meningkatkan luas daun dan mutu benih, bersesuaian dengan penelitian sebelumnya bahwa penambahan N dan P meningkatkan luas daun, biomassa, dan pengisian biji melalui regulasi konduktansi stomata, meningkatkan kapasitas fotosintesis, dan efektivitas akar (melalui pemanjangan, luas, dan distribusi akar) dalam penyerapan hara (Sharifi *et al.*, 2024; Zangani *et al.*, 2021).

Sementara N dan K (+NK) efektif dalam mempertahankan kadar klorofil pada fase generatif. Hasil ini bersesuaian dengan studi Ahmad *et al.* (2017) bahwa kalium berkontribusi terhadap peningkatan kandungan klorofil daun *Calendula officinalis*, terutama saat diaplikasikan bersama nitrogen, kandungan klorofil total daun mencapai nilai tertinggi (19,1), dibandingkan dengan perlakuan K tunggal (13,6) atau kontrol (12,9), ini menunjukkan bahwa peran K terhadap klorofil bersifat mendukung, efeknya tidak sekuat nitrogen, yang merupakan unsur utama penyusun klorofil dan enzim fotosintetik.

Kombinasi +NP dan +NK dengan bahan organik, khususnya pupuk kandang mampu meningkatkan luas daun, komponen hasil dan hasil, serta mutu fisik dan fisiologis benih padi. Pupuk kandang lebih efektif dibandingkan kompos jerami, diduga karena kandungan hara esensial makro dan mikro lebih tinggi dan cepat tersedia (Moe *et al.*, 2019; Weil & Brady, 2016).

SIMPULAN

1. Penelitian ini menunjukkan bahwa *carbon dots* dari ampas kopi memiliki keunggulan sebagai nano aktif dan pembawa hara berpotensi bermanfaat sebagai stimulan pertumbuhan vegetatif (meningkatkan luas daun).
2. Kombinasi pupuk NPK (baik sebagian hara maupun lengkap) dengan bahan organik, khususnya pupuk kandang, merupakan strategi efisien untuk meningkatkan pertumbuhan, hasil, dan mutu benih padi varietas BK Situbondo 01 Agritan.
3. Nitrogen berperan utama dalam pertumbuhan vegetatif dan pembentukan malai, fosfor mendukung pengisian gabah, viabilitas, dan vigor benih, sementara kalium mempertahankan klorofil pada fase reproduktif.
4. Pupuk kandang lebih efektif dibanding kompos jerami karena kandungan hara makro (terutama N) yang lebih tersedia bagi tanaman.
5. Pemupukan terintegrasi pupuk NPK dengan bahan organik dan CDs berpotensi menjadi strategi pemupukan berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas dan mutu benih padi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kementerian Pertanian melalui Badan Perakitan dan Modernisasi Pertanian atas bantuan biaya penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, I., Jabeen, N., Ziaf, K., Dole, J. M., Khan, M. A. S., & Bakhtavar, M. A.

- (2017). Macronutrient application affects morphological, physiological, and seed yield attributes of calendula officinalis L. *Canadian Journal of Plant Science*, 97(5), 906–916. <https://doi.org/10.1139/cjps-2016-0301>
- Blair, N., Faulkner, R. D., Till, A. R., Korschens, M., & Schulz, E. (2006). Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility. Part II: Bad Lauchstadt static and extreme FYM experiments. *Soil and Tillage Research*, 91(1–2), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.001>
- Cai, D., Zhong, X., Xu, L., Xiong, Y., Deng, W., Zou, G., Hou, H., & Ji, X. (2025). Biomass-derived carbon dots: synthesis, modification and application in batteries. *Chemical Science*, 4937–4970. <https://doi.org/10.1039/d4sc08659g>
- Costa, A. I., Barata, P. D., Moraes, B., & Prata, J. V. (2022). Carbon dots from coffee grounds: synthesis, characterization and detection of noxious nitroanilines. *Chemosensors*, 10(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/chemosensor10030113>
- Crista, D. M. A., El Mragui, A., Algarra, M., Esteves da Silva, J. C. G., Luque, R., & da Silva, L. P. (2020). Turning spent coffee grounds into sustainable precursors for the fabrication of carbon dots. *Nanomaterials*, 10(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/nano10061209>
- Dobermann, A., & Fairhurst, T. (2000). Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management. In *International Rice Research Institute, of Canada Potash and Phosphate Institute* (Issue 3). Oxford Graphic Printers Pte Ltd.
- Fawaz, W., Hasian, J., & Alghoraibi, I. (2023). Synthesis and physicochemical characterization of carbon quantum dots produced from folic acid. *Scientific Reports*, 13(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46084-1>
- Hampton, J. G., Boelt, B., Rolston, M. P., & Chastain, T. G. (2013). Effects of elevated CO₂ and temperature on seed quality. *Journal of Agricultural Science*, 151(2), 154–162. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000263>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2017). Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. In *Rules of Thumb for Petroleum Engineers* (Eighth Edn). Pearson India Education Services Pvt. Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119403647.ch8>
- Huang, B., Yuan, Z., Li, D., Zheng, M., Nie, X., & Liao, Y. (2020). Effects of soil particle size on the adsorption, distribution, and migration behaviors of heavy metal(loid)s in soil: A review. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 22(8), 1596–1615. <https://doi.org/10.1039/d0em00189a>
- Isnaeni, I., Purwandari, V., Putro, P. A., & Adiwidya, H. M. (2023). Optical properties of sodium-doped carbon dots made of urea and trisodium citrate. *TIME in Physics*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.11594/timeinphys.2023.v1i1p1-9>
- ISTA. (2018). International Rules for Seed Testing 2018. In *International Rules for Seed Testing* (Issues i-19-8 (298)). International Seed Testing Association. <https://doi.org/10.15258/istarules.2018.f>

- Jamil, A., Abdulrachman, S., & Syam, M. (2014). Dinamika anjuran dosis pemupukan N, P, dan K pada padi sawah. *IPTEK Tanaman Pangan*, 9(2), 63–77.
- Janissen, B., & Huynh, T. (2018). *Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review*. 128(July 2017), 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>
- Jeong, G., Park, C. H., Yi, D., & Yang, H. (2023). Green synthesis of carbon dots from spent coffee grounds via ball-milling: Application in fluorescent chemosensors. *Journal of Cleaner Production*, 392(15), 1–10.
- Kalaji, H. M., Oukarroum, A., Alexandrov, V., Kouzmanova, M., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Allakhverdiev, S. I., & Goltsev, V. (2014). Plant physiology and biochemistry identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by in vivo chlorophyll a fluorescence measurements. *Plant Physiology and Biochemistry*, 81, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029>
- Kang, C., Huang, Y., Yang, H., Yan, X. F., & Chen, Z. P. (2020). A review of carbon dots produced from biomass wastes. *Nanomaterials*, 10(11), 1–24. <https://doi.org/10.3390/nano10112316>
- Kolasinska, K., Szyrmer, J., & Dul, S. (2000). Relationship between laboratory seed quality tests and field emergence of common bean seed. *Crop Science*, 40(2), 470–475. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402470x>
- Li, H., Huang, J., Lu, F., Liu, Y., Song, Y., Sun, Y., Zhong, J., Huang, H., Wang, Y., Li, S., Lifshitz, Y., Lee, S. T., & Kang, Z. (2018). Impacts of carbon dots on rice plants: Boosting the growth and improving the disease resistance. *ACS Applied Bio Materials*, 1(3), 663–672. <https://doi.org/10.1021/acsabm.8b00345>
- Li, Y., Xu, X., Wu, Y., Zhuang, J., Zhang, X., Zhang, H., Lei, B., Hu, C., & Liu, Y. (2020). A review on the effects of carbon dots in plant systems. *Materials Chemistry Frontiers*, 4(2), 437–448. <https://doi.org/10.1039/c9qm00614a>
- Ma, P., Lan, Y., Lv, X., Fan, P., Yang, Z., Sun, Y., Zhang, R., & Ma, J. (2021). Reasonable nitrogen fertilizer management improves rice yield and quality under a rapeseed/wheat–rice rotation system. *Agriculture (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/agriculture11060490>
- Moe, K., Htwe, A. Z., Thu, T. T. P., Kajihara, Y., & Yamakawa, T. (2019). Effects on NPK status, growth, dry matter and yield of rice (*Oryza sativa*) by organic fertilizers applied in field condition. *Agriculture*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/agriculture9050109>
- Mu, X., & Chen, Y. (2021). The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158(November 2020), 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.019>
- Naher, U. A., Ahmed, M., Sarkar, M., Biswas, J., & Panhwar, Q. A. (2019). Fertilizer management strategies for sustainable rice production. In S. Chandran, M. Unni, & S. Thomas (Eds.), *Organic Farming: Global Perspectives and Methods* (pp. 251–267). Elsevier Inc.

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813272-2.00009-4>
- Nugraha, U. S. (2004). Legislasi, kebijakan, dan kelembagaan pembangunan perbenihan. *Perkembangan Teknologi Tro.*, 16(1), 61–75.
- Pan, Z., Zang, H., Li, Y., Wang, X., Xia, N., Liu, C., Li, Z., Han, Y., Tang, Z., & Sun, J. (2024). Foliar application of carbon dots enhances nitrogen uptake and assimilation through CEPD1-dependent signaling in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 217, 109229. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109229>
- Papadopoulos, A., Bird, N. R. A., Whitmore, A. P., & Mooney, S. J. (2014). Does organic management lead to enhanced soil physical quality? *Geoderma*, 213, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.033>
- Peng, J., Feng, Y., Wang, X., Li, J., Xu, G., Phonenasay, S., Luo, Q., Han, Z., & Lu, W. (2021). Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic pigment, leaf fluorescence characteristics, and yield of indica hybrid rice and their interrelations. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86858-z>
- Porra, R. J., Thompson, W. A., & Kriedemann, P. E. (1989). Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assay of chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta*, 975, 384–394.
- Pratiwi, R. A., & Nandiyanto, A. B. D. (2022). How to read and interpret UV-VIS spectrophotometric results in determining the structure of chemical compounds. *Indonesian Journal of Educational Research and Technology*, 2(1), 1–20. <https://doi.org/10.17509/ijert.v2i1.35171>
- Sadjaad, S. (1993). *Dari Benih Kepada Benih*. PT. Gramedia Widiasarana Indonesia.
- Salsabilla, U. S., Kusumawati, D. H., & Fitriana. (2024). Karakteristik carbon dots (C-dots) dari buah jeruk mandarin (*Citrus reticulata*) yang disintesis menggunakan metode hidrotermal. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 13, 60–73.
- Serrano, J., da Silva, J. M., Shahidian, S., Silva, L. L., Sousa, A., & Baptista, F. (2017). Differential vineyard fertilizer management based on nutrient's spatio-temporal variability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 46–61. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000004>
- Sharifi, S., Shi, S., Obaid, H., Dong, X., & He, X. (2024). Differential Effects of Nitrogen and Phosphorus Fertilization Rates and Fertilizer Placement Methods on P Accumulations in Maize. *Plants*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/plants13131778>
- Song, J., Yang, H., Yu, X., Chen, Y., Yang, C., He, Y., & Wang, H. (2025). Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on seed yield, seed quality and economic returns of *Elymus nutans* in alpine region. *BMC Plant Biology*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06126-4>
- Suman, A., Singh, K. P., Singh, P., & Yadav, R. L. (2009). Carbon input, loss and

- storage in sub-tropical Indian Inceptisol under multi-ratooning sugarcane. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.008>
- Sunoqrot, S., Al-Shalabi, E., Al-Bakri, A. G., Zalloum, H., Abu-Irmaileh, B., Ibrahim, L. H., & Zeno, H. (2021). Coffee bean polyphenols can form biocompatible template-free antioxidant nanoparticles with various sizes and distinct colors. *ACS Omega*, 6(4), 2767–2776. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05061>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). Plant Physiology. Third Edition. In *Science progress* (Vol. 34, Issue 136). Sinauer Associates. <https://doi.org/10.1017/9781108486392>
- Triwardiati, D., & Ermawati, I. R. (2018). Analisis bandgap karbon nanodots (C-Dots) kulit bawang merah menggunakan teknik microwave. *Prosiding Seminar Nasional Teknoka*, 3(2502), 25. <https://doi.org/10.22236/teknoka.v3i0.2810>
- Wang, H., Zhang, M., Song, Y., Li, H., Huang, H., Shao, M., Liu, Y., & Kang, Z. (2018). Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts. *Carbon*, 136, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.051>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). *The Nature and Properties of Soils* (15th Editi, Issue May). Pearson Education, Inc.
- Yan, F., Jang, Y., Sun, X., Wei, J., Chen, L., & Zhang, Y. (2019). Multicolor carbon dots with concentration-tunable fluorescence and solvent-affected aggregation states for white light-emitting diodes. *Nano Research*, 13, 52–60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12274-019-2569-3>
- Zangani, E., Afsahi, K., Shekari, F., Sweeney, E. Mac, & Mastinu, A. (2021). Nitrogen and phosphorus addition to soil improves seed yield, foliar stomatal conductance, and the photosynthetic response of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Agriculture (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/agriculture11060483>
- Zhang, F., & Zhou, G. (2019). Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: A comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize. *BMC Ecology*, 19(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0233-0>
- Zhao, L., Li, K., Wang, Q., Song, X., Su, H., & Xie, B. (2017). Nitrogen starvation impacts the photosynthetic performance of porphyridium cruentum as revealed by chlorophyll a fluorescence. *Scientific Reports*, 7, 8542. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08428-6>