KAJIAN KARAKTERISTIK FISIK PUPUK GRANUL UREA-BIOCHAR BAMBU BERSELAPUT ASAM AKRILAT

PHYSICAL CHARACTERISTICS STUDY OF ACRYLIC ACID COATED BAMBOO UREA-BIOCHAR GRANULE FERTILIZER

Ni Nyoman Ari Putri Murtiyah*, Ni Ketut Karina Sari, I Wayan Dirgayana dan Dewa Ayu Ari Febriyanti

Agrotechnology Study Program, Faculty of Agriculture and Business
Dwijendra University
Jl. Kamboja No. 17, Dangin Puri Kangin, Kota Denpasar (80233), Telp. 081236763157

**Corresponding author, tel/fax :081236763157, email: ariputri20@gmail.com*

Abstrak. *Efisiensi penggunaan nitrogen pada pupuk urea konvensional masih tergolong rendah akibat kehilangan hara melalui pencucian dan volatilisasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pupuk urea lepas lambat (slow release fertilizer) berbasis matriks biochar bambu dengan penyalut polimer asam akrilat. Pupuk dibuat dalam bentuk granul menggunakan metode salut dan metode matriks dengan variasi proporsi urea sebesar 25%, 30%, dan 35%. Karakterisasi dilakukan terhadap sifat fisik granul serta morfologi permukaan dan komposisi unsur menggunakan Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pupuk granul yang dihasilkan didominasi oleh ukuran 2–5 mm dengan persentase berkisar antara 80,17% hingga 92,50%, yang telah memenuhi standar Permentan No. 01 Tahun 2019. Analisis SEM mengonfirmasi bahwa asam akrilat berhasil menyelimuti pori-pori biochar dan urea, membentuk struktur physical barrier yang berfungsi memperpanjang jalur difusi hara. Spektrum EDS membuktikan keberhasilan penjerapan urea ke dalam matriks dengan retensi Nitrogen (N) sebesar 41,15% pada metode salut dan 27,97% pada metode matriks. Kehadiran struktur mikropori biochar bambu dan lapisan polimer ini sesuai dengan prinsip pupuk lepas lambat yang mampu meningkatkan efisiensi agronomi serta meminimalisir dampak lingkungan.*

Kata kunci**: **pupuk lepas lambat, biochar, asan akrilat, urea

Abstract. *Nitrogen use efficiency in conventional urea fertilizers remains low due to nutrient loss through leaching and volatilization. This study aims to develop and characterize a slow-release fertilizer (SRF) based on a bamboo biochar matrix coated with acrylic acid polymer. The fertilizers were formulated into granules using coating and matrix methods with urea proportions of 25%, 30%, and 35%. Characterization included physical properties, surface morphology, and elemental composition using Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS). The results showed that the produced granules were dominated by sizes of 2–5 mm, ranging from 80.17% to 92.50%, complying with the Ministry of Agriculture Regulation (Permentan) No. 01 of 2019. SEM analysis confirmed that acrylic acid successfully encapsulated the pores of the bamboo biochar and urea, forming a physical barrier structure that extends the nutrient diffusion path. EDS spectra verified the successful impregnation of urea into the matrix, with Nitrogen (N) retention of 41.15% for the coating method and 27.97% for the matrix method. The presence of bamboo biochar micropores and the polymer layer aligns with slow-release principles, enhancing agronomic efficiency while minimizing environmental impacts.*

Key words: slow release fertilizer, biochar, acrylic acid, urea

© 2026 Unesa Journal of Chemistry (UJC). This work is licensed under CC 4.0

PENDAHULUAN

Efisiensi pupuk N tergolong rendah (30-50%) karena N pupuk dapat hilang dari dalam tanah melalui penguapan amonia (volatilisasi), pencucian nitrat *(leaching*), serta denitrifikasi yang dipicu oleh pelepasan hara yang tidak terkendali segera setelah diaplikasikan ke tanah [1]; [2]. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi rendahnya efisiensi N pada urea adalah dengan memodifikasi pupuk sehingga terbentuk pupuk lepas lambat, yang dirancang untuk mensinkronkan pelepasan nutrisi dengan kebutuhan tanaman selama masa pertumbuhan [3].

Pupuk lepas lambat (*slow release fertilizer/SRF*) merupakan pupuk yang dapat mengontrol pelepasan unsur-unsur hara yang mudah hilang akibat pelarutan dan penguapan secara lambat dan bertahap [4], selain itu juga dapat mengurangi jumlah kebutuhan pupuk karena metode SRF meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen (*Nitrogen Use Efficiency*/ NUE) secara signifikan, dengan tingkat penyerapan oleh tanaman yang mencapai 60% hingga 80% dibandingkan pupuk konvensional yang seringkali berada di bawah 50% [1]; [2].

Modifikasi pupuk urea lepas lambat dapat dibuat dengan cara menambahkan bahan alami lain sebagai perekat maupun pembawa diantaranya adalah arang (*biochar*) bambu sebagai penjerap dan asam akrilat sebagai pengemulsi dan perekat [5]. Aplikasi *biochar* dapat menurunkan tingkat kehilangan nitrogen karena kemampuannya menahan air dan hara dalam tanah guna mencegah aliran permukaan (*run off*) dan pencucian (*leaching*) [6], sekaligus memperbaiki sifat tanah seperti pH tanah dan KTK tanah [7]. Penambahan *biochar* pada urea menyebabkan pelepasan N menjadi terkontrol sehingga asupan nutrisi tanaman tercukupi hingga masa panen [8].

Kombinasi biochar dengan bahan organik maupun anorganik sangat efektif dalam memperbaiki tanah terdegradasi dan meningkatkan efisiensi pemupukan. Namun demikian, pemanfaatan biochar bambu yang dikombinasikan secara spesifik dengan asam akrilat sebagai bahan penyalut (*coating*) dan matriks pada pupuk urea granul masih terbatas formulasinya [9].

Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada pengaruh *biochar* terhadap pertumbuhan tanaman secara langsung, sementara kajian mendalam mengenai sinkronisasi antara struktur morfologi permukaan dengan pola distribusi unsur pada pupuk hasil modifikasi ini belum banyak dilakukan.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat dan menguji pupuk granul urea-*biochar* dengan metode matriks dan penyalutan dengan asam akrilat. Penggunaan asam akrilat bertujuan untuk meminimalisir hidrasi akibat sifat higroskopis urea dan daya serap air *biochar* yang tinggi. Formulasi berbagai proporsi komponen dilakukan untuk memastikan produk akhir memenuhi standar Permentan No. 43 Tahun 2011 [10] dan kriteria pupuk lepas lambat menurut Kloth [11]. Diharapkan, modifikasi ini mampu menghasilkan efisiensi agronomi yang lebih unggul daripada urea konvensional (prill).

Pengamatan permukaan mikroskopis pupuk dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). SEM adalah salah satu jenis mikroskop electron yang menggunakan berkas electron untuk menginterpretasi morfologi permukaan suatu benda, namun untuk menentukan komposisi unsur yang terkandung dalam benda tersebut diperlukan analisis lebih lanjut menggunakan SEM-EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Komposisi unsur dapat diketahui ketika sinar X ditembakkan pada posisi yang ingin diketahui komposisinya.

Analisis SEM-EDS dalam penelitian ini menjadi krusial untuk membuktikan sejauh mana asam akrilat dan *biochar* bambu berhasil membentuk lapisan pelindung atau matriks yang homogen pada granul urea. Sampel yang dianalisis berupa pupuk granul yang telah dibuat dengan metode salut dan matriks berukuran 2-5 mm.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *biochar* bambu, pupuk urea, tepung tapioka, asam akrilat, aquadest, dan serangkaian bahan kimia untuk analisis amonium dan nitrat.

Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah pan granulator, sprayer, ayakan (ukuran 20 mesh, 2 mm dan 5 mm), serangkaian alat gelas di laboratorium untuk analisis amonium dan nitrat, spektrofotometer, *Scanning Electron Microscope* (SEM) *Brand/Type Jeol JSM-IT200*, dan alat makro kjeldahl

Prosedur Penelitian

Pembuatan *Biochar* Bambu

Pembuatan *biochar* dilakukan dengan metode pirolisis pada suhu 500°C selama 2 jam dalam reaktor pirolisis di Laboratorium *New Renewable and Conservation Energy* (NRCE) di Fakultas Teknik Mesin Universitas Udayana. Produk pirolisis yang digunakan di dalam penelitian ini adalah arang sebagai bahan pupuk granul. Arang tersebut diaktivasi terlebih dahulu sebelum digunakan. Aktivasi *biochar* adalah perlakuan fisika atau kimia yang bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan *biochar* sehingga memiliki daya serap yang semakin tinggi. *Biochar* yang telah diaktivasi kemudian disiapkan untuk campuran pembuatan pupuk granul.

Pembuatan Pupuk Granul

Pupuk granul urea-biochar bambu dibuat dengan dua cara yaitu salut tunggal dan matriks. Penyalutan tunggal urea dilakukan dengan menyelubungi kelompok butiran urea menggunakan campuran serbuk biochar dan asam akrilat. Pada sistem matriks, urea dihaluskan terlebih dahulu kemudian dicampur merata dengan bubuk biochar dan direkatkan dengan asam akrilat. Pelapisan pupuk urea-biochar dengan asam akrilat menggunakan metode Haq. Sejumlah amilum (0-2% b/b), akrilat (16-20% b/b), 1 gram PEG dan 30 ml air dicampur dengan pengadukan pada suhu kamar. Larutan ini disemprotkan terhadap pupuk di atas yang ditempatkan di dalam pan granulator berputar.

Urea granul dibuat dalam beberapa formulasi untuk mencapai kadar N-total dari urea sebesar 35%, 30%, dan 25 % baik untuk pupuk granul bersalut maupun pupuk matriks. Alat yang digunakan dalam pembuatan granul adalah mesin pan granulator. Penelitian selanjutnya akan menggunakan pupuk granul dengan rentang ukuran 2-5 mm. Hal ini merujuk pada standar mutu fisik yang ditetapkan dalam Permentan No. 01 Tahun 2019, yang bertujuan untuk menjamin keseragaman penyebaran hara dan efisiensi aplikasi di lahan pertanian [12]. Pupuk granul yang diperoleh kemudian dianalisis dengan alat SEM-EDS.

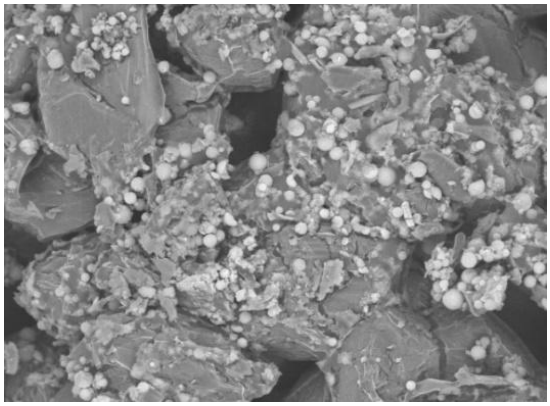
Pengujian SEM-EDS

Karakterisasi morfologi permukaan dan komposisi unsur dilakukan menggunakan SEM-EDS dengan tegangan akselerasi sebesar 15.0 kV. Penggunaan tegangan di kisaran 10-20 kV adalah standar untuk karakterisasi pupuk lepas lambat agar mendapatkan detail pori yang optimal tanpa merusak polimer organic [13]. Pengamatan morfologi dilakukan pada perbesaran 500x untuk mengidentifikasi keberadaan lapisan penyalut. Analisis komposisi unsur (EDS) dilakukan menggunakan metode pemetaan (*mapping*) untuk menentukan persentase massa Nitrogen, Karbon, dan Oksigen guna memastikan efektivitas penjerapan hara dalam matriks *biochar*-asam akrilat.

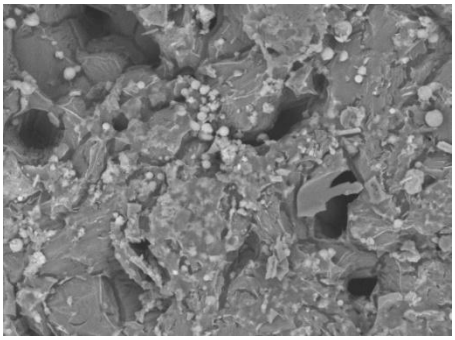
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pupuk granul biochar-urea berselaput asam akrilat berhasil dibuat dengan metode salut maupun matriks menggunakan proporsi urea sebesar 25, 30, dan 35%. Penampilan pupuk granul yang terbentuk memiliki karakteristik fisika yang umumnya berbeda. Karakteristik fisik dari pupuk granul biochar-urea yang dihasilkan adalah berwarna hitam berbentuk bulat tidak seragam dan tidak beraturan.

Pupuk granul yang dihasilkan kemudian digolongkan ke dalam pupuk lepas lambat dengan mengikuti prinsip Trenkel [11]. Berdasarkan hasil analisis, sidik ragam, proporsi urea tidak berpengaruh terhadap nilai persentase granul urea-*biochar* yang berukuran 2-5 mm. Granul pupuk yang dihasilkan didominasi oleh granul berukuran 2-5 mm dengan kisaran 80,17 – 92,5 % (Tabel 1), hal ini sesuai dengan standar yang ditentukan Permentan No. 01 Tahun 2019.



Gambar 1. Hasil uji SEM pupuk granul dengan metode matriks pembesaran 500x



Gambar 2. Hasil uji SEM pupuk granul dengan metode salut pembesaran 500x

Tabel 1. Hasil persentase ukuran granul

Perlakuan	Ukuran Granul 2-5mm (%)
S_{35}	89,67 a
S_{30}	81,83 b
S_{25}	84,80 a
M_{35}	80,17 c
M_{30}	92,50 a
M_{25}	87,83 a
Duncan 5%	D_1 = 0,089 D_2 = 0,083 D_3 = 0,088

Nilai persentase ukuran granul tertinggi terdapat pada perlakuan M30 yaitu 92,50% dan terrendah pada M35 yaitu 80,17%. Perubahan ukuran granular yang dihasilkan dipengaruhi oleh suplai air yang diberikan, berat dan kadar air bahan yang digunakan.

Semakin banyak air yang disemprotkan ke bahan pada saat proses granulasi maka granul yang terbentuk cenderung akan semakin besar ukurannya. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Happel [15] bahwa tetesan air yang di semprotkan diatas permukaan bahan baku, secara kontinu mempengaruhi kelembapan lokal, yang merupakan pemicu utama pertumbuhan granul dari skala mikro ke makro.

Perbedaan komposisi pupuk urea dalam penelitian ini tidak disertai dengan perbedaan volume air yang digunakan dalam proses granulasi. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor meliputi kecepatan putaran granulator, jumlah air yang digunakan, serta keefektifan proses pengadukan [16]. Ukuran granul juga dapat dipengaruhi oleh durasi proses granulasi karena semakin lama waktu granulasi, maka granul cenderung tumbuh lebih besar akibat mekanisme penggabungan (*coalescence*) yang berkelanjutan [17].

Granul berukuran kecil (kisaran 2-5 mm) memberikan implikasi positif terhadap distribusi hara, karena memiliki kemampuan untuk masuk lebih dalam ke celah-celah agregat tanah dibandingkan granul besar yang cenderung tertahan di permukaan. Hal ini membuat pupuk lebih stabil dan tidak mudah terbawa oleh aliran air permukaan (*run off*) saat terjadi hujan [18].

Pengamatan pupuk granul dengan alat SEM menghasilkan gambar yang memperkuat sebaran material pupuk granul serta penampakan pori-pori di permukaan pupuk granul. Hasil analisis SEM pada Gambar 1 dan Gambar 2 terlihat bahwa permukaan pupuk tidak lagi memiliki tekstur halus seperti urea prill konvensional. Terbentuknya lapisan material pada permukaan granul menunjukkan bahwa asam akrilat telah berhasil menyelimuti pori-pori *biochar* bambu dan urea, membentuk sistem matriks yang kompleks. Struktur ini berfungsi sebagai penghalang fisik *(physical barrier)* yang memperpanjang jalur difusi air, sehingga mencegah urea larut secara instan dan meminimalisir proses hidrasi akibat sifat higroskopis urea [3]. Keberadaan partikel bulat kecil di permukaan mengindikasikan distribusi bahan penyalut yang memberikan proteksi tambahan terhadap pelepasan nitrogen [18].

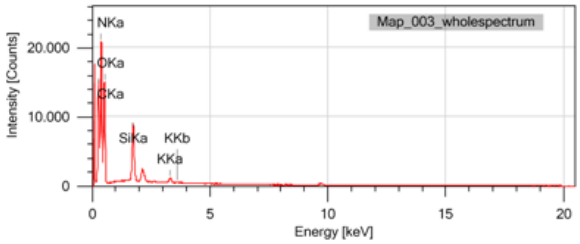
Struktur pori pada *biochar* berperan penting dalam memperbaiki sistem aerasi dan drainase tanah, sekaligus meningkatkan kapasitas retensi air dan ion [19]. Secara spesifik, biochar bambu menonjol karena struktur mikroporinya yang sangat berkembang, yang memberikan efisiensi adsorpsi hingga 10 kali lebih tinggi dibandingkan biochar kayu tradisional [20].

Biochar memliki kandungan karbon yang tinggi pada permukaannya yang berperan sebagai agen pelepas lambat pupuk, dan struktur karbon berpori yang dimilikinya dapat meningkatkan kemampuan retensi hara tanah. Adanya asam akrilat menunjukkan potensi pengikatan *biochar* untuk mudah di granulasi dalam proses granulasi menggunakan air. Kehadiran oksigen semakin meningkatkan kemampuan pengikatan *biochar* [21].

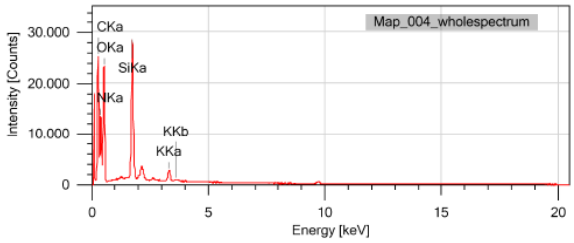
Alat SEM umumnya dilengkapi dengan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS). EDS dihasilkan dari sinar X karakteristik, yaitu dengan menembakkan sinar X pada posisi yang ingin diketahui komposisinya. Pengujian *EDS*

dilakukan untuk menganalisis secara kuantitatif dari persentase masing-masing elemen pada karbon aktif yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil pengujian EDS, kedua sampel menunjukkan keberhasilan proses impregnasi urea ke dalam matriks biochar bambu yang disalut dengan asam akrilat. Spektrum EDS mengonfirmasi keberadaan unsur utama penyusun pupuk, yaitu Karbon (C), Nitrogen (N), dan Oksigen (O). Keberadaan Nitrogen (N) yang signifikan pada pupuk yang dhasilkan membuktikan bahwa urea telah terperangkap secara fisik maupun kimiawi dalam struktur granul. Selain itu, munculnya unsur Silikon (Si) dan Kalium (K) merupakan karakteristik alami dari biochar bambu yang kaya akan mineral.



Gambar 3. Hasil uji EDS pada pupuk granul metode salut



Gambar 4. Hasil uji EDS pada pupuk granul metode matriks

Berdasarkan formulasi proporsi pupuk yang digunakan mnenunjukkan adanya perbedan komposisi antara Gambar 3 (pupuk granul metode salut) dan Gambar 4 (pupuk granul metode matriks), diantaranya pada pupuk metode salut memiliki persentase Nitrogen yang jauh lebih tinggi (41,15%) dibandingkan pupuk metode matriks (27,97%). Hal ini menunjukkan bahwa pada titik pengamatan pupuk metode salut, konsentrasi urea lebih dominan atau lapisan penyalut asam akrilat berhasil memerangkap lebih banyak hara N.

Pada pupuk granul metode matriks memiliki kadar Karbon (27,79%) dan Silikon (6,21%) yang lebih tinggi daripada pupuk granul metode salut. Hal ini mengindikasikan bahwa permukaan pada pupuk granul metode matriks lebih banyak merepresentasikan karakteristik asli *biochar* bambu sebagai material pembawa (*carrier*). Perbedaan ini menunjukkan bahwa distribusi hara pada pupuk granul urea-*biochar*-asam akrilat dipengaruhi oleh efektivitas pencampuran metode matriks dan konsistensi ketebalan lapisan salut (*coating*).

Karakteristik SEM-EDS memiliki peran penting dalam menentukan mekanisme pelepasan hara diantaranya berperan sebagai mekanisme *barrier* (penghalang) dimana konsentrasi Nitrogen yang tinggi namun terdeteksi bersamaan dengan Karbon dan Oksigen (dari asam akrilat) menunjukkan bahwa hara N tidak berada di permukaan secara bebas, melainkan terselimuti oleh polimer [3]. Asam akrilat berfungsi sebagai pelindung yang meningkatkan ketahanan pupuk terhadap hidrasi (penyerapan air), sehingga memperlambat laju pelarutan [22]. Peran yang kedua yakni sebagai pori *biochar*, dimana data EDS yang menunjukkan kehadiran mineral di tengah matriks N mengonfirmasi peran *biochar* sebagai penyangga hara [18]. *Biochar* bambu menyediakan ruang mikropori yang menahan urea, sementara asam akrilat menutup pori tersebut untuk menciptakan jalur difusi yang panjang dan berliku (*tortuous path*), hal ini sesuai dengan kriteria pupuk lepas lambat menurut Kloth [11]. Peran yang ketiga dalam efisiensi agronomi, dimana perbedaan kandungan N pada hasil EDS ini memprediksi bahwa sampel dengan retensi N yang lebih baik (seperti Gambar 3) akan memiliki efisiensi agronomi yang lebih tinggi karena mampu melepaskan hara secara bertahap sesuai dengan kebutuhan tanaman, sekaligus meminimalisir kehilangan nitrogen akibat leaching atau volatilisasi [22].

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah karakteristik fisik pupuk granul biochar-urea yang dihasilkan didominasi oleh granul berukuran 2-5 mm, berwarna hitam berbentuk bulat tidak seragam dan tidak beraturan, serta dari hasil uji SEM-EDS menunjukkan bahwa asam akrilat berhasil menyelimuti pori-pori biochar bambu dan urea, membentuk mekanisme *physical barrier* (penghalang fisik). Struktur ini menciptakan jalur difusi yang panjang dan berliku (*tortuous path*), yang sesuai dengan prinsip pupuk lepas lambat

(SRF). Komposisi unsur pupuk granul dari metode salut maupun matriks memiliki kandungan yang sama terdiri dari nitrogen (N), karbon (C), Oksigen (O), Silika (Si) dan kalium (K). Pupuk granul metode salut menunjukkan retensi Nitrogen yang lebih tinggi (41,15%) dibandingkan metode matriks (27,97%). Sebaliknya, metode matriks lebih menonjolkan karakteristik asli biochar sebagai pembawa (carrier) dengan kadar karbon dan silikon yang lebih tinggi. Kombinasi granul urea *biochar* asam akrilat ini mampu meningkatkan efisiensi agronomi dengan meminimalisir kehilangan nitrogen akibat pencucian (*leaching*) dan penguapan (*volatilization*).

DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. Li *et al.*, "Enhancing Nitrogen Use Efficiency for Sustainable Agriculture: A Global Meta-Analysis," *J. Clean. Prod.*, vol. 410, 2024.

[2] P. Omara *et al.*, "Nitrogen Use Efficiency in Global Agriculture: Trends and Future Challenges," *Agron. J.*, 2025.

[3] Y. P. Timilsena *et al.*, "Advanced technologies for controlling nitrogen release from urea: A review," *J. Control. Release*, vol. 354, pp. 560-575, 2023.

[4] Idaryani and A. Wahid, "Efektivitas Pupuk Majemuk Srf Npk 20-6-10 Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Jagung," *J. Agrisistem*, vol. 15, no. 2, 2019.

[5] R. Tareq, N. Akter, and M. S. Azam, "Biochars and Biochar Composites: Low-cost Adsorbents for Environmental Remediation," in *Biochar from Biomass and Waste*, Oxford, UK: Elsevier Inc., 2019, pp. 169-209.

[6] N. E. Ratna, "Pengaruh Dosis Pupuk Organonitrofos Plus, Pupuk Anorganik dan Biochar Terhadap Pertumbuhan dan Serapan Hara N, P, K Tanaman Jagung Manis (Zea mays saccharata L.) Pada Tanah Ultisols Taman Bogo," Skripsi, Univ. Lampung, Bandar Lampung, 2016.

[7] Widowati, W. H. Utomo, L. A. Soehono, and B. Guritno, "Effect of Biochar on The Release and Loss of Nitrogen from Urea Fertilization," *J. Agric. Food Technol.*, vol. 1, pp. 127–132, 2011.

[8] S. S. D. Airlangga, M. Munir, and Poniman, "Pengaruh Pemberian Biochar Terhadap Beberapa Sifat Biokimia Tanah dan Pertumbuhan Tanaman Bawang Merah pada Lahan Tercemar Residu Pestisida," *J. Tanah dan Sumberdaya Lahan*, vol. 8, no. 1, pp. 27–34, 2021.

[9] Y. P. Situmeang, A. Abdullah, Gafar, Nandiyanto, and B. D. Asep, "Soil Quality in Corn Cultivation Using Bamboo Biochar, Compost, and Phonska," *MATEC Web Conf.*, vol. 197, pp. 1–5, 2018.

[10] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Pertanian No. 43 Tahun 2011 Tentang Syarat Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenah Tanah*, Jakarta, 2011.

[11] M. E. Trenkel, *Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture*, Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2020.

[12] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Pertanian Nomor 01 Tahun 2019 tentang Pendaftaran Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenah Tanah*, Jakarta, 2019.

[13] S. Zhu, L. Liu, L. Wu, and J. Liao, "Optimizing Scanning Electron Microscopy parameters for the characterization of polymer-coated controlled-release fertilizers," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 71, no. 12, pp. 4850-4862, 2023.

[14] T. Gluba and A. Obraniak, "Nucleation and Granule Formation During Disc Granulation Process," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 48, no. 1, pp. 113–120, 2011.

[15] J. Happel *et al.*, "Effect of nozzle parameters on the granule size distribution in drum granulation," *Adv. Powder Technol.*, vol. 33, no. 4, pp. 103-118, 2022.

[16] N. W. A. Utari, Tamrin, and S. Triyono, "Kajian Karakteristik fisik pupuk Organik Granul dengan Dua Jenis Bahan Perekat," *J. Tek. Pertan. Lampung*, vol. 3, no. 3, pp. 267–274, 2015.

[17] Y. Wang *et al.*, "Evolution of granule size distribution and morphology in continuous drum granulation," *Adv. Powder Technol.*, 2024.

[18] P. Vejan *et al.*, "Biochar-based controlled release fertilizers: A review on their production and influence on plant growth," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 33, p. 103118, 2024.

[19] A. Obia *et al.*, "Biochar porosity and its effect on soil hydrology and aeration," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1-12, 2020.
[20] Y. Wang *et al.*, "Superior adsorption performance of bamboo biochar: Comparative study with wood and agricultural residue biochars," *J. Hazard. Mater.*, vol. 465, p. 133145, 2024.
[21] W. Suliman *et al.*, "The Role of Biochar Porosity and Surface Functionality in Augmenting Hydrologic Properties of a Sandy Soil," *Sci. Total Environ.*, vol. 574, pp. 139–147, 2017.
[22] M. A. Nur *et al.*, "Sintesis dan Karakterisasi Hidrogel Berbasis Asam Akrilat sebagai Agen Penyalut Pupuk Urea Lepas Lambat," Skripsi, Departemen Kimia, IPB University, Bogor, 2023.