

Enkapsulasi dan Karakterisasi Urea dengan Penyalut Biokomposit Zeolit Alam-Alginat-Biochar sebagai Pupuk Lepas Lambat

Ida Ayu Suci*, Hamdani, dan Agusalim Masulili

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian Sains dan Teknologi,
Universitas Panca Bhakti

Jl. Kom Yos Sudarso No.1, Sungai Beliang, Kota Pontianak, 78244

*Alamat korespondensi: idaayusuci@upb.ac.id

INFO ARTIKEL

ABSTRACT/ABSTRAK

Diterima: 02-06-2025

Direvisi: 20-07-2025

Dipublikasi: 14-08-2025

Encapsulation and characterization of urea with natural zeolite-alginate-biochar biocomposite coating as slow-release fertilizer

Keywords:

FTIR, Gelling agent,
Ionotropic gelation,
SEM, UV-Vis

Urea fertilizer is one of the sources of nitrogen for plant growth due to its high nitrogen content (46%). However, the efficiency of urea fertilizer use is very low, with nitrogen losses reaching 40-70% through ammonia volatilization, denitrification, and nitrate leaching. The development of slow-release fertilizer technology is an important strategy in improving fertilizer efficiency and the sustainability of agricultural systems. Natural zeolite is a porous mineral with high cation exchange capacity and supports gradual nutrient release. Alginate acts as a gelling agent, forming a strong and flexible three-dimensional network to entangle urea molecules. Biochar can increase the adsorption and retention capacity of water and nitrogen nutrients from urea. This study aims to synthesize and characterize the natural zeolite-alginate-biochar biocomposite and test its effectiveness as an encapsulation matrix for slow-release urea fertilizer. This research was conducted at the Faculty of Agriculture, Science, and Technology Laboratory of Panca Bhakti University from December 2023 to May 2024. The research method used was encapsulation through ionotropic gelation technique. The characteristics of the biocomposite were analyzed using FTIR, SEM, and UV-Vis on nitrogen release pattern. The results showed that the encapsulated urea fertilizer structure was more spherical. The FTIR spectra showed the characteristic absorption bands of the natural zeolite-alginate-biochar biocomposite. The SEM images showed the surface morphology of urea has been coated by biocomposites. The Nitrogen release test showed that the biocomposite ratio of 1:1:1 was the best in retaining nitrogen release from urea fertilizer.

Kata Kunci:

FTIR, Ionotropic
gelation, Matrik
pengikat, SEM, UV-Vis

Pupuk urea menjadi salah satu sumber nitrogen bagi pertumbuhan tanaman karena kandungan nitrogen yang tinggi (46%). Namun, efisiensi penggunaan pupuk urea sangat rendah, dengan tingkat kehilangan nitrogen mencapai 40-70% melalui proses volatilisasi amonia, denitrifikasi, dan pencucian nitrat. Pengembangan teknologi pupuk lepas lambat menjadi strategi penting dalam meningkatkan efisiensi pemupukan dan keberlanjutan sistem pertanian. Zeolit alam adalah mineral berpori dengan kemampuan tukar kation tinggi, efektif menahan ion ammonium, dan mendukung pelepasan hara bertahap. Alginat berperan sebagai matriks pengikat dan agen pembentuk gel, membentuk jaringan tiga dimensi yang kuat dan fleksibel untuk menjerat molekul urea. Biochar dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dan retensi air serta hara nitrogen dari urea, sekaligus mendukung pelepasan hara secara bertahap.

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi biokomposit zeolit alam-alginat-biochar serta menguji efektivitasnya sebagai matriks enkapsulasi pupuk urea lepas lambat. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Pertanian, Sains, dan Teknologi Universitas Panca Bhakti pada bulan Desember 2023 hingga Mei 2024. Metode penelitian yang digunakan yaitu enkapsulasi melalui teknik ionotropic gelation. Karakteristik biokomposit dilakukan analisis menggunakan FTIR, SEM, dan UV-Vis pada pola pelepasan nitrogen. Hasil menunjukkan struktur pupuk urea terenkapsulasi lebih berbentuk bulat. Hasil spektrum FTIR menunjukkan karakteristik pita serapan dari biokomposit zeolit alam-alginat-biochar. Foto SEM menunjukkan morfologi permukaan urea telah dilapisi oleh biokomposit. Uji pelepasan nitrogen menunjukkan perbandingan biokomposit 1:1:1 merupakan yang paling baik dalam menahan rilis nitrogen dari pupuk urea.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk global dan meningkatnya kebutuhan pangan telah mendorong peningkatan penggunaan pupuk nitrogen, khususnya urea, dalam sistem pertanian intensif. Urea merupakan salah satu sumber nitrogen yang paling umum digunakan karena kandungan nitrogen yang tinggi (46%) dan biaya produksinya yang relatif rendah (Pradana *et al.*, 2021). Namun, efisiensi penggunaan nitrogen dari pupuk urea sangat rendah, dengan tingkat kehilangan nitrogen yang dapat mencapai 40-70% melalui proses volatilisasi amonia, denitrifikasi, dan pencucian (*leaching*) nitrat (Beig *et al.*, 2020). Kehilangan ini tidak hanya menyebabkan pemborosan sumber daya, tetapi juga menimbulkan efek merugikan terhadap lingkungan, termasuk pencemaran air tanah, eutrofikasi perairan, serta pelepasan gas rumah kaca ke atmosfer. Upaya meningkatkan efisiensi pemupukan dan mewujudkan pertanian berkelanjutan dapat dilakukan melalui pengembangan teknologi pupuk lepas lambat (*slow-release fertilizer* /SRF) (Banik *et al.*, 2023; Neethu & Vardhanan, 2023).

Teknologi SRF dikembangkan agar unsur hara dilepaskan secara perlahan dan sesuai dengan kebutuhan tanaman, sehingga mampu meningkatkan efisiensi pemupukan dan memperpanjang keberadaan nitrogen di area perakaran. Pada pengembangannya, material penyalut atau matriks pengontrol pelepasan menjadi komponen kunci untuk keberhasilan SRF. Bahan-bahan alami seperti zeolit alam, alginat, dan biochar dewasa ini menjadi perhatian khusus sebagai kandidat matriks karena ketersediaannya yang melimpah, sifatnya yang ramah lingkungan, serta kemampuannya dalam mengontrol pelepasan nutrisi. Penggunaan biokomposit berbasis

bahan alami dan limbah biomassa menjadi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Suci & Astar, 2022).

Zeolit alam, alginat, dan biochar merupakan tiga jenis material yang memiliki karakteristik unik dan saling melengkapi untuk dikembangkan sebagai matriks enkapsulasi. Zeolit alam merupakan mineral aluminosilikat berpori dengan struktur kisi tiga dimensi dan kemampuan tukar kation yang tinggi, sehingga efektif menyerap dan menahan ion amonium (NH_4^+) hasil hidrolisis urea (Jakkula & Wani, 2018; Cataldo *et al.*, 2021). Zeolit berperan penting dalam mengurangi kehilangan nitrogen melalui pencucian serta mendukung pelepasan hara secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman. Selain itu, struktur pori zeolit mendukung pelepasan hara secara perlahan karena ion yang terserap dapat dilepas kembali secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman (Mondal *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2022). Zeolit juga memiliki kestabilan kimia dan termal yang tinggi akan mampu berinteraksi dengan baik dalam berbagai aplikasi (Dongoran dkk., 2021).

Alginat, polisakarida yang diperoleh dari rumput laut, berperan penting sebagai matriks pengikat dan agen pembentuk gel melalui mekanisme gelasi ionotropik dengan ion kalsium (Ca^{2+}), membentuk jaringan tiga dimensi yang kuat dan fleksibel untuk menjerat molekul urea (Paoletti & Donati, 2022). Pemanfaatan alginat dalam formulasi pelapis pupuk urea dapat memperlambat proses pelepasan suspensi ke air, sehingga mendukung pelepasan nutrisi yang lebih terkendali (Sathisaran & Balasubramanian, 2020; Boberski *et al.*, 2022). Sifat adhesifnya memungkinkan interaksi sinergis dengan zeolit dan biochar, sehingga meningkatkan homogenitas dan stabilitas fisik biokomposit. Struktur kapsul yang terbentuk bersifat kokoh

namun tetap permeabel, memungkinkan retensi air di zona akar dan memperpanjang ketersediaan nitrogen bagi tanaman.

Biochar yang dihasilkan dari pirolisis biomassa memiliki sejumlah keunggulan, antara lain kemampuannya dalam memperbaiki sifat kesuburan tanah, meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air, serta struktur berpori yang memungkinkan penyerapan dan penyimpanan unsur hara penting seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), yang selanjutnya dapat dilepaskan secara perlahan ke dalam tanah. Penggunaan alginat secara bersamaan dengan biochar tidak hanya membantu mempertahankan stabilitas biochar di dalam tanah, tetapi juga berperan dalam meningkatkan kemampuan biochar dalam menyimpan unsur hara (Herlina *et al.*, 2025). Biochar berperan sebagai carrier yang meningkatkan kapasitas adsorpsi dan retensi air serta hara, termasuk nitrogen dari urea, sekaligus mendukung pelepasan hara secara bertahap dan mengurangi emisi N_2O (Zhang *et al.* 2021; Banu *et al.* 2023). Sifat permukaannya yang reaktif memungkinkan interaksi kuat dengan alginat dan zeolit, memperkuat struktur dan kestabilan biokomposit. Selain itu, biochar juga berfungsi sebagai amelioran tanah, sehingga menjadikannya komponen penting dalam formulasi pupuk urea lepas lambat yang efisien dan ramah lingkungan (Banu *et al.* 2023). Masing-masing bahan ini memiliki keunggulan tersendiri, dan penggabungan ketiganya dalam bentuk biokomposit diharapkan dapat menciptakan sistem enkapsulasi pupuk urea yang lebih stabil dan efisien.

Penelitian mengenai kombinasi formulasi biokomposit berbasis zeolit alam, alginat, dan biochar untuk aplikasi pupuk urea lepas lambat masih terbatas, terutama dalam kondisi agroklimat tropis seperti di Indonesia. Beberapa studi sebelumnya hanya memfokuskan pada penggunaan satu atau dua jenis material yang belum sepenuhnya mampu mengoptimalkan kontrol pelepasan nitrogen secara efisien. Selain itu, masih diperlukan kajian mendalam terhadap karakterisasi biokomposit dan mekanisme pelepasan nitrogen. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji sintesis dan karakterisasi biokomposit dari zeolit alam-alginat-biochar serta menguji efektivitasnya dalam mengontrol pelepasan pupuk urea secara bertahap.

Penelitian ini diharapkan mampu berkontribusi terhadap inovasi pupuk lepas lambat berbahan dasar alami yang tidak hanya memberikan hasil agronomis yang optimal, tetapi juga ramah

lingkungan dan berkelanjutan. Oleh karena itu, sintesis biokomposit zeolit alam-alginat-biochar dapat memberikan pendekatan inovatif dan memiliki keterbauran baik dari sisi komposisi material, efisiensi enkapsulasi, maupun mekanisme pelepasan nutrisi yang lebih terkontrol. Hasil penelitian ini juga berpotensi mendukung program efisiensi pemupukan nasional dan mendukung pertanian cerdas iklim (*climate-smart agriculture*), khususnya dalam pengelolaan hara nitrogen secara lebih efisien di lahan-lahan suboptimal.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Pertanian, Sains, dan Teknologi Universitas Panca Bhakti pada bulan Desember 2023 hingga Mei 2024. Analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan di Laboratorium Forensik Mabes Polri, analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) di Laboratorium Universitas Negeri Padang, dan uji pelepasan nitrogen di Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Tanjungpura.

Preparasi Zeolit Alam dan Aktivasi

Zeolit alam komersial dipersiapkan dengan cara digerus hingga halus, kemudian disaring menggunakan ayakan berukuran 100 mesh. Setelah itu, serbuk zeolit dicuci menggunakan akuades sambil diaduk, dan proses pencucian ini diulang sebanyak tiga kali. Zeolit yang telah dicuci kemudian dikeringkan dan dikalsinasi dalam tanur pada suhu 250 °C selama 3 jam (Haditya dkk., 2020). Zeolit alam diaktivasi dengan mereaksikan serbuk zeolit hasil preparasi ke dalam larutan HCl 3 M, lalu dilakukan pengadukan selama 3 jam menggunakan *magnetic stirrer*. Setelah itu, zeolit dicuci berkali-kali dengan akuades sampai pH larutan mencapai netral (pH 7), kemudian disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 3 jam.

Preparasi Biochar

Biochar komersial dihancurkan hingga menjadi serbuk halus dan disaring menggunakan ayakan berukuran 100 mesh. Perlakuan ini berfungsi untuk memudahkan proses pembentukan komposit dengan material lain.

Sintesis Biokomposit Zeolit Alam-Alginat-Biochar dan Enkapsulasi Urea menggunakan Matriks Biokomposit

Metode sintesis yang digunakan yaitu enkapsulasi melalui teknik *ionotropic gelation*. Sintesis biokomposit zeolit alam-alginat-biochar dilakukan dengan mencampurkan zeolit alam teraktivasi, natrium alginat, dan biochar dengan perbandingan 1:1:1 ke dalam 50 mL akuades. Campuran ini kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 4 jam. Setelah itu, pupuk urea komersial sebanyak 20% b/b ditambahkan ke dalam suspensi tersebut dan diaduk perlahan hingga tercampur merata. Campuran tersebut lalu diekstrusi menggunakan *syringe* ke dalam larutan CaCl_2 1%, sambil tetap diaduk perlahan dengan pengaduk magnetik. Pengadukan dilanjutkan selama 30 menit setelah terbentuknya butiran (*beads*) untuk memaksimalkan proses *crosslinking*.

Biokomposit yang telah terbentuk kemudian disaring dari larutan CaCl_2 1% dan dicuci menggunakan akuades. Proses pengeringan *beads* dilakukan dengan menggunakan oven pada suhu 40 °C selama 24 jam. Prosedur yang sama dilakukan pada campuran dengan variasi perbandingan zeolit alam-alginat-biochar sebesar 2:1:1 dan 3:1:1. Produk yang dihasilkan selanjutnya dianalisis menggunakan FTIR merk Bruker Tensor 3 untuk mengidentifikasi gugus fungsional, serta SEM merk Carl-Zeiss Bruker EVO MA10 untuk mengamati morfologi permukaannya (Faishol *et al.*, 2019).

Analisis Laju Pelepasan Nitrogen dari Pupuk SRF

Metode statis digunakan untuk menguji pelepasan urea, dengan menimbang sekitar 0,5 g pupuk lepas lambat dari masing-masing sampel dan merendamnya dalam 50 mL akuades. Waktu pelepasan dihitung dari 0–72 jam dengan memipet 2,0 mL larutan dan diukur konsentrasi urea yang dilepaskan menggunakan spektrofotometer *UV-Vis* merk Shimadzu (Lestari dkk., 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivasi zeolit menjadi langkah penting dalam pengembangan matriks enkapsulasi pupuk urea lepas lambat karena proses ini dapat meningkatkan sifat fisik dan kimia zeolit, seperti luas permukaan, kapasitas tukar kation (KTK), dan daya adsorpsi terhadap molekul urea. Zeolit alam yang belum diaktivasi umumnya mengandung pengotor dan memiliki struktur pori yang kurang optimal untuk

aplikasi pelepasan terkendali, sehingga aktivasi baik secara fisik (pemanasan) maupun kimia (menggunakan larutan asam) diperlukan untuk membuka pori, menghilangkan senyawa pengganggu, dan meningkatkan afinitas terhadap nitrogen. Aktivasi juga berperan dalam memperbaiki interaksi antara zeolit dengan polimer alginat dan biochar, sehingga menghasilkan biokomposit yang lebih homogen dan stabil secara struktural. Selain itu, zeolit teraktivasi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan ion amonium (NH_4^+) hasil hidrolisis urea, yang sangat penting untuk mengurangi kehilangan nitrogen melalui pencucian dan volatilisasi. Ahmad *et al.* (2021) melaporkan kehilangan amonia (NH_3) akibat volatilisasi berkurang sebesar 47% pada tanah spodosol dan 32% pada tanah alfisol dengan penggunaan zeolit-urea (1:1) dibandingkan dengan pupuk urea konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa formulasi pupuk zeolit-urea (1:1) efektif dalam mengurangi kehilangan nitrogen, terutama pada tanah alfisol, dibandingkan dengan pupuk urea konvensional.

Analisis visual pupuk urea terenkapsulasi biokomposit zeolit alam-alginat-biochar menunjukkan struktur lebih berbentuk sferis (Gambar 1). Mayori dkk. (2018) melaporkan bahwa penggunaan alginat dalam sintesis biokomposit berkontribusi terhadap terbentuknya struktur morfologi yang lebih sferis. Hwang *et al.* (2022) menemukan bahwa *spherical* meningkat dari 0,78 menjadi 0,92 seiring dengan peningkatan konsentrasi Na-Alginat (3,0–7,0 wt%) pada konsentrasi CaCl_2 yang tinggi. Peningkatan ini berkaitan dengan kemampuan khelasi Na-Alginat yang tinggi akibat viskositasnya yang besar.

Alginat tidak secara alami mengandung ion kalsium, namun dapat membentuk gel melalui gelasi ionik ketika bereaksi dengan kation divalen seperti Ca^{2+} dari larutan CaCl_2 . Gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) pada rantai alginat berikatan dengan Ca^{2+} membentuk ikatan silang yang menghasilkan jaringan tiga dimensi stabil. Struktur ini dinamakan model 'egg-box', di mana ion Ca^{2+} berperan sebagai jembatan ionik yang menghubungkan gugus karboksilat dari dua rantai polimer alginat (Hwang *et al.*, 2022; Makarova *et al.*, 2023). Proses ini menghasilkan partikel biokomposit dengan morfologi sferis yang lebih seragam dan stabil, sehingga mendukung efektivitas pelepasan pupuk urea secara bertahap.



Gambar 1. *Beads* hasil sintesis zeolit alam : alginat : biochar dengan perbandingan (A) 1:1:1, (B) 2:1:1, dan (C) 3:1:1.

Hasil Karakterisasi FTIR

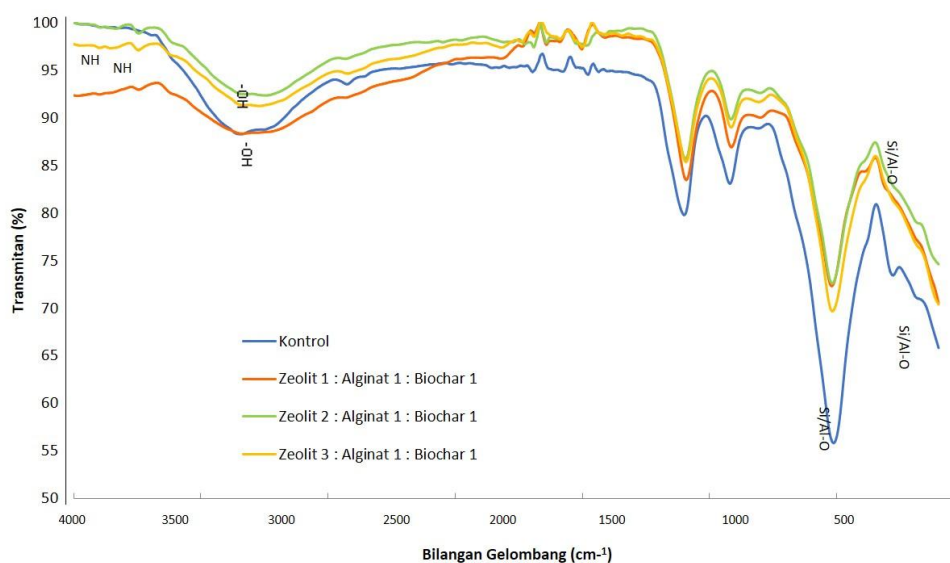
Hasil biokomposit pupuk urea lepas lambat dari zeolit alam-alginat-biochar kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer inframerah. Hal ini dilakukan untuk memastikan keberhasilan proses biokomposit. Hasil FTIR menunjukkan urea telah terkomposit. Pada Gambar 2 ditampilkan hasil spektrum FTIR dari *beads* yang telah disintesis.

Ciri khas dari vibrasi NH_2 *stretching* asimetrik dan simetrik yang berasal dari adanya urea ditunjukkan dari data spektrum pita serapan pada panjang gelombang 3339 cm^{-1} dan 3338 cm^{-1} . Spektra FTIR urea memperlihatkan puncak serapan pada panjang gelombang 3442 dan 3346 cm^{-1} berhubungan dengan vibrasi regangan asimetris dan simetris dari gugus NH_2 (Wen *et al.*, 2016). Selain itu, serapan khas O-H *stretching* dari H_2O terdeteksi pada rentang panjang gelombang $3400\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$.

Puncak serapan pada panjang gelombang 3450 cm^{-1} , 1611 cm^{-1} , 1440 cm^{-1} , dan 1043 cm^{-1} mengindikasikan keberadaan gugus fungsi khas dari

alginat. Hal ini sejalan dengan temuan Suci dan Astar (2022) yang menyatakan bahwa bilangan gelombang $1611,34\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan regangan asimetris gugus karboksilat (COO^-), sedangkan $1440,23\text{ cm}^{-1}$ merepresentasikan regangan simetris COO^- . Pita pada $1043,52\text{ cm}^{-1}$ berkaitan dengan vibrasi --C--O dari gugus eter, dan puncak serapan pada $3450,40\text{ cm}^{-1}$ menandakan vibrasi ikatan O-H. Spektrum FTIR biochar menunjukkan pita lebar pada 3340 cm^{-1} (O-H *stretching*), pita C-H alifatik pada 2919 cm^{-1} , pita karbonil pada 1718 cm^{-1} , pita aromatik C=C pada 1637 cm^{-1} , pita C-O (fenolik/eter) pada 1269 cm^{-1} .

Adanya serapan tajam pada panjang gelombang 3678 cm^{-1} dan 3361 cm^{-1} pada biokomposit zeolit-alginat-biochar menunjukkan bahwa urea telah berhasil terenkapsulasi dalam struktur komposit. Temuan serupa juga disampaikan oleh Faishol *et al.* (2019), yang melaporkan bahwa pita serapan pada bilangan gelombang tersebut mengindikasikan keberadaan komposit Alg/Saponit/Urea.



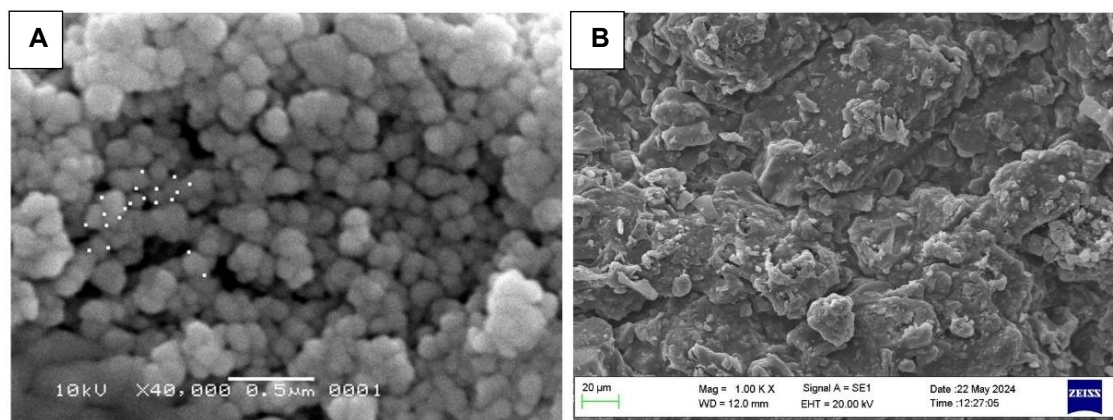
Gambar 2. Spektrum gugus fungsi pupuk urea terenkapsulasi biokomposit zeolit alam-alginat-biochar.

Morfologi Permukaan Pupuk Urea Granul Terlapis

Morfologi permukaan urea granul yang belum dilapisi dan setelah dilapisi dengan biokomposit zeolit alam-alginat-biochar diamati menggunakan Mikroskop Pemancar Elektron (SEM). Hasil SEM dapat dilihat pada Gambar 3.

Menurut Febrianti dkk. (2024), pupuk urea granul yang belum dilapisi memiliki morfologi permukaan yang polos, karena belum terdapat material pelapis. Hal ini sesuai dengan pengamatan pada Gambar 3A, yang menunjukkan bentuk agregat polos. Sebaliknya, Gambar 3B memperlihatkan pupuk urea yang telah dilapisi dengan biokomposit zeolit alam-alginat-biochar, yang ditandai dengan

permukaan yang lebih kasar serta berbentuk agregat yang membungkus bagian luar urea. Hasil SEM juga mengindikasikan bahwa bagian dalam atau pusatnya adalah urea, sementara bagian luarnya terselubung oleh material biokomposit zeolit alam-alginat-biochar. Lestari dkk. (2020) melaporkan bahwa mikrokapsul urea yang terbentuk memiliki tekstur permukaan yang tidak rata dan cenderung agregat. Lapisan luar zeolit berperan dalam memperlambat proses transfer massa, sehingga menghambat penetrasi air ke dalam inti dan memperlambat pelepasan nitrogen dari dalam pupuk (Muslim *et al.*, 2015).



Gambar 3. Hasil SEM (A) urea granul perbesaran 40.000X, (B) biokomposit zeolit alam-alginat-biochar perbesaran 1000X.

Pelepasan Nitrogen pada Pupuk Urea Terlapis Biokomposit Zeolit Alam-Alginat-Biochar

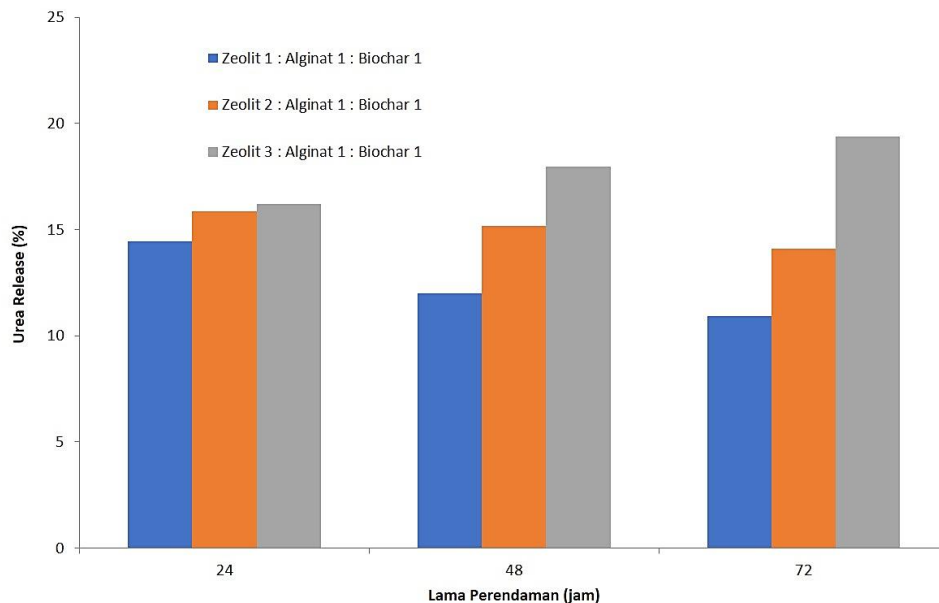
Produk pupuk urea lepas lambat yang telah disintesis kemudian diuji untuk menentukan laju pelepasan nitrogennya. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi jumlah nitrogen dalam bentuk amonia (N-NH_3) yang terlarut dalam akuades, sebagai indikator pelarutan urea menggunakan metode spektrofotometri. Uji pelepasan nitrogen dilakukan pada sampel dengan variasi rasio biokomposit zeolit alam-alginat-biochar, yaitu 1:1:1, 2:1:1, dan 3:1:1. Masing-masing sampel seberat kurang lebih 0,5 g direndam dalam 50 mL akuades, kemudian kadar nitrogen yang terlarut diamati pada interval waktu perendaman 24, 48, dan 72 jam. Jumlah nitrogen yang dilepaskan bervariasi, dipengaruhi oleh tingkat kelarutan urea serta karakteristik fisik biokomposit. Efektivitas biokomposit dalam melepaskan urea yang terenkapsulasi ditampilkan pada Gambar 4.

Rasio pelepasan urea tertinggi ditunjukkan pada formulasi biokomposit zeolit alam-alginat-biochar dengan perbandingan 3:1:1 yaitu sebesar

19,39% setelah 72 jam perendaman. Pelepasan terendah terjadi pada perbandingan 1:1:1 dengan persentase sebesar 10,93% dalam durasi waktu 72 jam (Gambar 4). Adanya biochar, diketahui memiliki kemampuan sebagai bahan pengisi untuk meningkatkan porositas dan stabilitas termal biokomposit (Mosa & Tolba, 2020) dan bahan utama untuk memenuhi kebutuhan unsur yang diperlukan oleh tanaman. Biochar membentuk bagian integral dari biokomposit zeolit alam-alginat-biochar, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap formulasi pupuk urea lepas lambat yang efektif dan berkelanjutan. Sebagaimana dilaporkan oleh Masulili dkk. (2024) aplikasi biochar dari sekam padi, baik secara tunggal maupun dikombinasikan dengan bahan organik lain, menunjukkan dampak jangka panjang yang bervariasi terhadap pertumbuhan tanaman padi pada tanah sulfat masam. Hasil penelitian Masulili dkk. (2024) menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi amandemen *Chromolaena odorata* sebanyak 10 ton/ha dengan biochar sekam padi 5 ton/ha memberikan pengaruh residu paling

positif terhadap pertumbuhan padi dibandingkan perlakuan lainnya. Selain itu, penelitian oleh Herlina *et al.* (2025) menunjukkan bahwa penambahan alginat sebesar 2% mampu membentuk struktur yang lebih homogen dan stabil, yang berkontribusi pada peningkatan ketahanan pupuk lepas lambat. Putri dkk. (2023) menyatakan bahwa penerapan pupuk lepas lambat terbukti lebih unggul dalam mendukung

pertumbuhan serta hasil panen tanaman cabai jika dibandingkan dengan pemupukan menggunakan pupuk tunggal atau NPK konvensional. Pupuk jenis ini lebih efisien dalam menyuplai unsur hara secara berkelanjutan selama fase pertumbuhan tanaman, karena kemampuannya menyesuaikan pelepasan nutrisi sesuai dengan kebutuhan tanaman di setiap tahap perkembangannya.



Gambar 4. Persentase analisis laju pelepasan nitrogen.

Berdasarkan data yang diperoleh, urea terenkapsulasi biokomposit zeolit alam-alginat-biochar dengan rasio 1:1:1 menunjukkan tingkat pelepasan urea yang paling rendah dibandingkan dengan rasio lainnya. Laju pelepasan yang paling lambat ini (1:1:1) mengindikasikan bahwa komposisi tersebut paling efektif dalam mengendalikan pelepasan urea dari matriks biokomposit. Pola pelepasan tersebut menunjukkan bahwa proses enkapsulasi urea dalam matriks biokomposit zeolit alam-alginat-biochar berpotensi dikembangkan sebagai sistem pupuk lepas lambat, melalui mekanisme hambatan fisik terhadap kontak langsung dengan air dan kemampuan pengikatan ion oleh material biokomposit.

SIMPULAN

Hasil analisis visual pupuk urea terenkapsulasi biokomposit zeolit alam-alginat-biochar menunjukkan struktur lebih berbentuk bulat. Hasil analisis spektrum FTIR menunjukkan adanya

karakteristik pita serapan dari biokomposit zeolit alam-alginat-biochar. Hasil analisis foto SEM menunjukkan morfologi permukaan urea telah dilapisi oleh biokomposit zeolit alam-alginat-biochar. Pada bagian luar menunjukkan pupuk urea telah terlapisi oleh zeolit alam-alginat-biochar, dan bagian dalamnya yaitu urea. Uji pelepasan nitrogen menunjukkan pupuk urea tersalut zeolit alam-alginat-biochar pada perbandingan 1:1:1 merupakan yang paling baik dalam menahan rilis nitrogen dari pupuk urea. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biokomposit zeolit alam-alginat-biochar berpotensi dikembangkan sebagai matriks enkapsulasi untuk pupuk urea lepas lambat yang tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen, tetapi juga mendukung praktik pemupukan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada

Masyarakat Universitas Panca Bhakti atas bantuan dana yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A, SS Ijaz, and Z He. 2021. Effects of zeolitic urea on nitrogen leaching ($\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$) and volatilization (NH_3) in spodosols and alfisols. *Water*. 13(14): 1921. DOI: 10.3390/w13141921.
- Banik, C, S Bakshi, DA Laird, RG Smith, and RC Brown. 2023. Impact of biochar-based slow-release n-fertilizers on maize growth and nitrogen recovery efficiency. *Journal of Environmental Quality*. 52(3): 630–40. DOI: 10.1002/jeq2.20468.
- Banu, MR, B Rani, SR Kavya, and PP Jabin. 2023. Biochar: a black carbon for sustainable agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*. 13(6): 418–32. DOI: 10.9734/IJECC/2023/v13i61840.
- Beig, B, MB Niazi, Z Jahan, A Hussain, MH Zia, and MT Mehran. 2020. Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review. *Journal of Plant Nutrition*. 43(6): 1–24. DOI: 10.1080/01904167.2020.1744647.
- Boberski, P, K Torchała, H Studnik, J Wójcik, M Głowska, and N Kuźnik. 2022. Biobased materials for the development of biodegradable slow-release fertilizers. *Coatings*. 12(8): 1215. DOI: 10.3390/coatings12081215.
- Cataldo, E, L Salvi, F Paoli, M Fucile, G Masciandaro, D Manzi, CM Masini, and GB Mattii. 2021. Application of zeolites in agriculture and other potential uses: a review. *Agronomy*. 11(8): 1547. DOI: 10.3390/agronomy11081547.
- Dongoran, J, P Sulistiawati, SY Simangunsong, PGR Paksi, dan MH Pasaribu. 2021. Perkembangan zeolit sebagai katalis alam potensial. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*. 3(2): 28–39. DOI: 10.36873/jjms.2021.v3.i2.604.
- Faishol, W, D Rubiyanto, L Chuenchom, and Is Fatimah. 2019. Alginate-modified saponite and study for ureaslow released fertilizer application. *Rasayan Journal of Chemistry*. 12(4):1792–1802. DOI: 10.31788/RJC.2019.1245386.
- Febrianti, N Arrozi, dan IN Fitria. 2024. Karakteristik pelapisan urea dengan metode slow release fertilizer. *Jurnal Ilmiah Respati*. 15(1): 3703. DOI: 10.52643/jir.v15i1.3703.
- Haditya, EB, Jumaeri, dan T Sulistyaningsih. 2020. Penggunaan zeolit A termodifikasi HDTMA sebagai slow release urea fertilizer. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 9(1): 31–36. DOI: 10.15294/ijcs.v9i1.28675.
- Herlina, N, SN Utami, M Nurudin, and E Hanudin. 2025. Synthesis and characterization of slow release fertilizer nitrogen and slow release fertilizer potassium based on biochar with nanotechnology and alginate. *Journal of Ecological Engineering*. 26(6): 378–390. DOI: 10.12911/22998993/202978.
- Hwang, DK, HY Cho, TV Thanh, H Kim, HJ Kim, H Jeon, DX Oh, J Park, and JM Ko. 2022. Fabrication and evaluation of biodegradable alginate bead controlled release fertilizer for the controlled release on nitrogen. *Research Square*. 1–15. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2226828/v1.
- Jakkula, VS, and SP Wani. 2018. Zeolites: potential soil amendments for improving nutrient and water use efficiency and agriculture productivity. *Scientific Reviews & Chemical Communication*. 8(1): 1–15.
- Lestari, RS, Jayanudin, D Irawanto, Rozak, Wardana, dan F Muhammad. 2020. Preparasi dan karakterisasi kitosan tertaut silang glutaraldehyde sebagai matrik pupuk urea. *Jurnal Integrasi Proses*. 9(2): 27–33. DOI: 10.36055/jip.v9i2.9221.
- Mahindru, V, P Sharma, and V Abrol. 2024. Efficiency of biochar with mineral fertilizers on soil properties and crop growth. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*. 8(3): 863–67. DOI: 10.33545/26174693.2024.v8.i3j.845.
- Makarova, AO, SV Derkach, T Khair, MA Kazantseva, YF Zuev, and OS Zueva. 2023. Ion-induced polysaccharide gelation: peculiarities of alginate egg-box association with different divalent cations. *Polymers*. 15(5): 1243. DOI: 10.3390/polym15051243.
- Masulili, A, AT Irianti, T Abdurrahman, dan U Suci. 2024. Pertumbuhan tanaman padi pada dua periode tanam di tanah sulfat masam dengan perlakuan biochar sekam padi dan beberapa amandemen organik. *Agrikultura*. 35(2): 377–86. DOI: 10.24198/agrikultura.v35i2.55752.
- Mayori, E, GN Faramitha, dan Sunardi. 2018. Karakterisasi biokomposit alginat-pati-kaolin sebagai kandidat *slow-release* pupuk urea.

- Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah. 3(1): 191–95.
- Mondal, M, B Biswas, S Garai, S Sarkar, H Banerjee, K Brahmachari, PK Bandyopadhyay, S Maitra, M Brestic, M Skalicky, P Ondrisik, and A Hossain. 2021. Zeolites enhance soil health, crop productivity and environmental safety. *Agronomy*. 11(3): 448. DOI: 10.3390/agronomy11030448.
- Mosa, A, AE Ghamry, and M Tolba. 2020. Biochar-supported natural zeolite composite for recovery and reuse of aqueous phosphate and humate: Batch sorption – desorption and bioassay investigations. *Environmental Technology & Innovation*. 19: 100807. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100807.
- Muslim, S, S Sulaiman, L Fitriani, N Suharti, E Zaini, F Febriyenti, Y Aldi, and A Djamaan. 2015. Use of bioblend polystyrene / starch for coating urea granules as slow release fertilizer. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 7 (11): 478–84.
- Neethu, CB, and YS Vardhanan. 2023. Development of slow-release fertilizer from animal origin wastes: sustainable organic agricultural perspective. *Current Agriculture Research Journal*. 11(1): 69–77. DOI: 10.12944/CARJ.11.1.06.
- Paoletti, S, and I Donati. 2022. Comparative insights into the fundamental steps underlying gelation of plant and algal ionic polysaccharides: pectate and alginate. *Gels*. 8(12): 784. DOI: 10.3390/gels8120784.
- Pradana, AR, A Royani, K Zulfikri, N Tuffahati, RZ Azzahra, TQ Amini, and BD Nandiyanto. 2021. Review: Synthesis of urea in several methods. *Mediterranean Journal of Chemistry*. 11(2): 146–61. DOI: 10.13171/mjc02103121554arp.
- Putri, AR, JS Hamdani, D Drikarsa, dan S Mubarak. 2023. Pengaruh pupuk controlled release fertilizer terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman cabai merah besar (*Capsicum annum* L.). *Jurnal Agrikultura*. 34 (3): 509–518. DOI: 10.24198/agrikultura.v34i3.46560.
- Sathisaran, I, and M Balasubramanian. 2020. Physical characterization of chitosan/gelatin-alginate composite beads for controlled release of urea. *Heliyon*. 6(11): e05495. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05495.
- Sharma, V, B Javed, H Byrne, J Curtin, and F Tian. 2022. Zeolites as carriers of nano-fertilizers: from structures and principles to prospects and challenges. *Applied Nano*. 3(3): 163–186. DOI: 10.3390/applnano3030013.
- Suci, IA, dan I Astar. 2022. Enkapsulasi urea menggunakan biokomposit zeolit alam alginat-pati sagu sebagai model pupuk lepas lambat (*slow release fertilizer*). *Al Kimia*. 10(1): 1–11. DOI: 10.24252/al-kimiav10i1.23739.
- Wen, P, Z Wu, Y He, Y Han, and Y Tong. 2016. Characterization of p(AA-Co-AM)/bent/urea and its swelling and slow release behavior in a simulative soil environment. 133(12): 43082. DOI: 10.1002/app.43082.
- Zhang, L, Y Jing, C Chen, Y Xiang, MR Rashti, Y Li, Q Deng, and R Zhang. 2021. Effects of biochar application on soil nitrogen transformation, microbial functional genes, enzyme activity, and plant nitrogen uptake: A meta-analysis of field studies. *Global Change Biology Bioenergy*. 13(12): 1859–1873. DOI: 10.1111/gcbb.12898.