

PENINGKATAN EFISIENSI PUPUK NITROGEN DENGAN MODIFIKASI UREA-ASAM HUMAT-BIOCHAR (UAB) SERTA PENGARUHNYA TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN JAGUNG

INCREASING NITROGEN EFFICIENCY WITH MODIFIED UREA-HUMIC ACID-BIOCHAR (UAB) AND THEIR EFFECTS ON THE GROWTH OF CORN

Eka Rahmi^{1*}, Mariana², dan Muliana³

¹Program studi Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Almuslim, Bireuen, Indonesia

²Program studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Almuslim, Bireuen, Indonesia

³Program studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Malikulsaleh, Bireuen, Indonesia

*Corresponding Author. E-mail address: ekarahmiatt@gmail.com

ARTICLE DEVELOPMENT:

Received: 30 September 2024
Revised: 14 November 2024
Approved: 28 Februari 2025

KEYWORDS:

Biochar, efficiency, humic acid, modification, urea.

KATA KUNCI:

Asam humat, biochar, efisiensi, modifikasi, urea.

ABSTRACT

Nitrogen is the element most needed by plants but has a low utilization efficiency by plants. The problem of low fertilizer efficiency can be overcome by controlling the solubility of the fertilizer, so that nutrients can be released slowly. The purpose of this research is to modify the physical mixture of urea fertilizer by using biochar and humic acid (UAB) so as to reduce the solubility of Nitrogen. Then study the nitrogen release pattern (ammonium and nitrate) from the UAB fertilizer that has been made. Another objective is to determine the effect of UAB fertilizer on the growth of corn plants. This research consists of several stages, namely the modification stage of the urea mixture with biochar and humic acid. Incubation of soil for 7 weeks, then application of UAB fertilizer on corn plants. The results of the research showed that UAB fertilizer was able to maintain the presence of nitrate up to week 7 by more than 50% compared to urea which was only 38% of the fertilizer given. The concentration of nitrate ($N-NO_3^-$) increased gradually from 14% to 56% in the 7th week of incubation. The U3 and U4 treatments using Polyvinyl Alcohol (PVA) coating were able to reduce the release of nitrogen in the form of N-ammonium ($N-NH_4^+$) by up to 72% and released it more slowly until it was still available until the end of the incubation period compared to the urea fertilizer control. The higher the level of humate added to the fertilizer, the faster the rate of ammonium formation. The combination treatment of UAB U2 fertilizer (Humate 5% without filler/coating) is the best formulation in stimulating growth in plant height, leaf width and number of leaves in corn plants.

ABSTRAK

Nitrogen merupakan unsur yang paling dibutuhkan tanaman tetapi memiliki tingkat efisiensi pemanfaatan yang rendah oleh tanaman. Masalah rendahnya efisiensi pupuk dapat diatasi dengan mengendalikan kelarutan pupuk tersebut, sehingga unsur hara dapat dilepas secara perlahan. Tujuan penelitian ini adalah memodifikasi campuran fisik pupuk urea dengan menggunakan asam humat dan biochar (UAB) sehingga dapat mengurangi kelarutan pupuk Nitrogen. Mempelajari pola pelepasan nitrogen (amonium dan nitrat) pupuk UAB. Tujuan lainnya adalah mengetahui pengaruh pupuk UAB terhadap pertumbuhan tanaman jagung. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu tahapan modifikasi campuran urea dengan biochar dan asam humat. Inkubasi tanah selama 7 minggu, kemudian aplikasi pupuk UAB pada tanaman jagung. Hasil penelitian menunjukkan pupuk UAB mampu mempertahankan keberadaan nitrat hingga minggu ke 7 lebih dari 50% dibandingkan dengan urea yang hanya 38% dari pupuk yang diberikan. Konsentrasi nitrat ($N-NO_3^-$) mengalami peningkatan bertahap dari 14% sampai 56% pada minggu ke-7 waktu inkubasi. Perlakuan U3 dan U4 yang menggunakan *coating* Polivinil Alkohol (PVA) mampu menurunkan pelepasan jumlah nitrogen dalam bentuk N-amonium ($N-NH_4^+$) hingga 72% dan melepaskannya lebih lambat hingga menjadi masih tersedia sampai akhir masa inkubasi dibandingkan dengan kontrol pupuk urea. Semakin tinggi kadar humat yang diberikan ke dalam pupuk mengakibatkan laju pembentukan amonium semakin cepat. Perlakuan kombinasi pupuk UAB U2 (Humat 5% tanpa *filler/coating*) merupakan formulasi paling baik dalam menstimulasi pertumbuhan tinggi tanaman, lebar daun dan jumlah daun tanaman jagung.

1. PENDAHULUAN

Permasalahan pengembangan produksi pertanian di Indonesia diantaranya adalah rendahnya kadar bahan organik tanah dan ketidakefisienan penggunaan pupuk nitrogen. Pada saat ini, ketidakseimbangan penggunaan pupuk N sering terjadi karena penggunaannya secara berlebih yang menyebabkan N tercuci ke lapisan bawah sehingga mengakibatkan pencemaran NO_3^- pada air tanah dan perairan (Brady & Weil 2002; Erickson *et al.*, 2000; Ahmed *et al.*, 2009). Permasalahan lain yang muncul adalah penurunan kadar bahan organik karena petani cenderung menggunakan pupuk kimia secara terus-menerus tanpa penambahan bahan organik ke dalam tanah (Walida *et al.*, 2020). Akibatnya, tanah menjadi semakin masam dan keras karena kerusakan struktur tanah.

Dalam rangka meningkatkan efisiensi pupuk nitrogen. Saat ini telah dikembangkan pupuk yang memiliki sifat pelepasan unsur hara lambat (*slow-release fertilizer*/SRF) (Vo, P. T., Nguyen *et al.*, 2021; Kaavessinan *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021). Namun, bahan pelapis yang banyak digunakan untuk membuat SRF adalah polimer sintetis (Beig *et al.*, 2024; A El-Aziz *et al.*, 2022; Tomaszewska *et al.*, 2002) yang sulit terurai di alam sehingga mengontaminasi tanah dan menjadi isu pencemaran lingkungan. Bahkan residu polimer yang ditinggalkan tersebut diperkirakan mencapai 50 kg/ha per tahun (Trenkel, 2021). Akibat dampak lingkungan yang ditimbulkan harus ada bahan alternatif lain yang ramah lingkungan dan mudah dalam penyediaanya dilapangan seperti biochar dan asam humat.

Biochar merupakan bahan padatan yang terbentuk melalui proses pembakaran bahan organik tanpa oksigen (pyrolysis). Bahan baku biochar tergolong murah dan mudah diperoleh yaitu berupa limbah pertanian terutama yang sulit terdekomposisi seperti sekam padi, tempurung kelapa, kulit buah kakao, serta kayu-kayu yang berasal dari tanaman hutan industri (Glaser 2002). Biochar memiliki ruang pori dapat berfungsi sebagai pengikat dan penyimpanan unsur hara yang dibutuhkan tanaman sehingga tidak mudah tercuci (Solaiman & Anawar 2015). Beberapa hasil penelitian menyebutkan bahwa biochar memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan memiliki kandungan gugus fungsi bermuatan negatif yang dapat meningkatkan kapasitas menahan air tanah, nitrifikasi, serta adsorpsi nitrogen (seperti N-NH_4^+ dan N-NO_3^-), yang dapat mengurangi kehilangan nitrogen (Major *et al.*, 2012; Alkharabsheh *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2001; Schreiter *et al.*, 2020).

Di lain sisi untuk mengatasi permasalahan rendahnya kandungan bahan organik dapat diatasi dengan pemberian biochar, yang memiliki nilai karbon tinggi (Pariyar *et al.*, 2020). Selain itu penambahan asam humat yang diekstrak dari bahan organik diharapkan dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah pula, karena penyusun utama asam humat adalah karbon berkisar 56-62% (Alimin *et al.*, 2005). Menurut (Ndzelu *et al.*, 2021; Ukalska *et al.*, 2021) asam humat memiliki gugus fungsional seperti $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ fenolat maupun $-\text{OH}$ alkoholat sehingga asam humat dapat membentuk kompleks dengan ion logam. Asam humat diharapkan dapat membentuk kompleks dengan ion yang dilepaskan oleh pupuk nitrogen, sehingga pola pelepasan dari *slow release fertilizer* UAB menjadi lebih stabil.

Urgensi dari penelitian ini adalah menghasilkan rekayasa pupuk Urea-Biochar-Asam Humat yang dapat meningkatkan efisiensi pemupukan sekaligus meningkatkan kandungan bahan organik tanah serta mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan akibat pencucian, penguapan, dan emisi N_2O dari lahan pertanian yang dipupuk. Kombinasi asam humat dan biochar diharapkan dapat mempertahankan keberadaan nitrogen dalam tanah sehingga jumlah pupuk yang diberikan lebih kecil dibandingkan metode konvensional sehingga menghemat input biaya pemupukan. Tujuan penelitian ini adalah memodifikasi campuran fisik pupuk urea dengan menggunakan asam humat dan biochar (UAB) sehingga dapat mengurangi kelarutan pupuk Nitrogen. Mempelajari pola pelepasan nitrogen (amonium dan nitrat) pupuk UAB. Tujuan lainnya adalah mengetahui pengaruh pemberian pupuk UAB terhadap respon pertumbuhan tanaman jagung.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Formulasi Pupuk Urea-Asam Humat-Biochar (UAB)

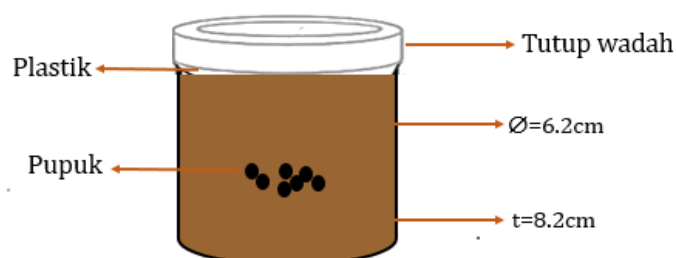
formulasi dibuat biochar dan asam humat di karakteristik terlebih dahulu sifat fisiknya menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengetahui potensi sumber bahan sebagai kombinasi campuran dengan urea. Pertama dengan cara melapisi pupuk campuran urea-biochar dengan asam humat. Perbandingan yang digunakan adalah 70:30. Biochar yang digunakan berasal dari limbah batok kelapa. Jumlah asam humat yang ditambahkan adalah 2%, dan, 5% konsentrasi asam humat. Asam humat yang digunakan diektrak dari *lignite*. Masing-masing bahan urea dan biochar ditimbang sesuai perbandingan dicampur dengan 50 ml humat pekat diaduk sedikit demi sedikit hingga bahan tercampur rata. Setelah tercampur merata, urea-biochar-asam humat yang telah dilapisi dengan Polivinil Alkohol (PVA). Hasil blending ini berupa pasta yang selanjutnya digranulasikan dengan mesin granulator skala laboratorium (Gambar 1) dan dikeringkan dengan dryer dan dioven pada suhu $\leq 60^{\circ}\text{C}$ dengan kisaran waktu 15-30 menit. Kemudian diukur kadar air pupuk berkisar 5.02% hingga 8.20 %.

2.2 Inkubasi Tanah

Pengukuran laju pelepasan pupuk dilakukan menggunakan metode inkubasi pada ruang terbuka (Gambar 6). Tanah aluvial yang telah dikeringudarkan kemudian ditimbang sebanyak 124.47 g atau setara 100 g bobot kering mutlak (BKM) dengan penyesuaian kadar air tanah 24.47%. Tanah kemudian dimasukkan ke dalam wadah plastik berbentuk tabung silinder dengan diameter 6.2 cm dan tinggi 8.2 cm. Perlakuan terdiri dari 4 jenis pupuk yaitu, U1: pupuk UAB Humat 2% U2: pupuk UAB Humat 5%, U3:pupuk UAB Humat 2%+ Filler, U4: pupuk UAB Humat 5%+ Filler yang masing masing terdiri dari 2 dosis yaitu 0.31 g/100 g tanah dan 0.62 g/100 g tanah. Sehingga terdapat 50 satuan percobaan. Setiap perlakuan kemudian ditambahkan ke dalam tanah pada botol inkubasi dan ditambahkan air sebanyak 31 ml agar mencapai kadar air kapasitas lapang (61.66%). Tanah dan pupuk dalam botol inkubasi ditutup dengan plastik polietilen. Inkubasi dilakukan di ruangan terbuka selama 7 minggu pada suhu ruangan.



Gambar 1. Proses granulasi urea skala laboratorium



Gambar 2. Ilustrasi percobaan inkubasi tanah

Tabel 1. Analisis Sifat Kimia Pupuk Selama 7 Minggu Waktu Inkubasi

Parameter	Satuan	Metode
Nitrat (N-NH_4^+)	g/ml	Kjeldal
Amonium (N-NO_3^-)	% larutan	Kjeldal

2.3 Analisis Kimia Tanah Hasil Inkubasi Tanah

Selama periode inkubasi untuk mengetahui pola pelepasan hara pupuk dilakukan analisis nitrogen amonium (N-NH_4^+), dan nitrogen nitrat (N-NO_3^-), (Tabel 1).

2.4 Aplikasi Pupuk UAB pada Tanaman Jagung

Percobaan penanaman tanaman jagung dengan penambahan pupuk UAB dilakukan di kebun percobaan menggunakan media bahan tanah aluvial. Benih jagung yang digunakan adalah pertiwi. Rancangan yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri atas 5 perlakuan yaitu, U₀: perlakuan memakai Urea, U₁: pupuk UAB Humat 2% U₂: pupuk UAB Humat 5%, U₃:pupuk UAB Humat 2%+ Filler, U₄: pupuk UAB Humat 5%+ Filler. Masing-masing perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga secara keseluruhan terdapat 15 satuan percobaan. Parameter pertumbuhan tanaman jagung yang diamati adalah parameter vegetatif yaitu tinggi tanaman, jumlah daun dan lebar daun. Pengukuran dilakukan setiap seminggu sekali selama enam minggu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pembuatan Formulasi Pupuk Urea-Asam Humat-Biocahr (UAB)

Formulasi Pupuk lambat tersedia dalam penelitian ini dibuat melalui pencampuran 3 kombinasi urea, asam humat, dan biochar yang dinotasikan sebagai U₁, U₂, U₃, dan U₄ Hasil pupuk lambat tersedia tersebut dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan bahwa formulasi dihasilkan pupuk padat berbentuk granul halus dan sedang dengan ukuran butir 1-2.3 mm. Pupuk yang dihasilkan semuanya berwarna hitam. Warna hitam dari masing-masing bahan ini berasal dari warna senyawa humat dan biochar yang secara homogen tercampur dengan pupuk urea. Untuk perlakuan U₄ yang menggunakan filler PVA granul yang terbentuk ukurannya lebih besar dibandingkan dengan perlakuan tanpa penambahan filler atau perekat. Kadar air pupuk berkisar 5.02% hingga 8.20 %.

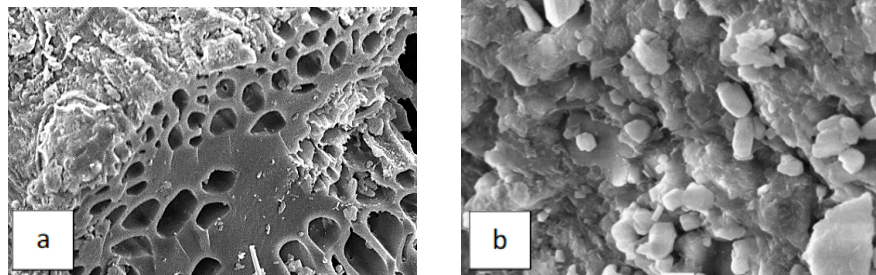
Penyalutan urea dengan biochar dan asam humat diharapkan membantu perlambatan pelepasan nitrogen dari pupuk lambat tersedia yang dibuat tersebut. Guo *et al.*, (2022) menyatakan bahwa formulasi CRF (*Control Release Fertilizer*) dapat memperlambat perubahan ammonium menjadi nitrat, sekitar dua minggu dan bervariasi tergantung kadar senyawa humatnya. Zhao *et al.*, (2023) menyebutkan bahwa adanya penyalutan dengan bahan hidrokoloid (PVA) dapat memperlambat pelepasan urea, makin tinggi kadar penyalut, makin memperlambat pelepasan urea. Pada penelitian tersebut disebutkan bahwa terjadi penurunan leaching nitrat dari 34.19% menjadi 15.42% apabila penyalutan biochar meningkat dari 10% menjadi 30%.

3.2 Karakteristik Fisik Asam Humat dan Biochar

Hasil analisis terhadap karakteristik biochar berdasarkan Gambar 4 terlihat adanya ruang-ruang pori yang nampak dari permukaan biochar, hal ini mengindikasikan potensi biochar sebagai absorben sangat baik. Hal ini sesuai dengan pendapat Schnee *et al.*, (2016) dan Leng *et al.*, (2021) semakin banyaknya ketersediaan ruang pori, maka akan berpengaruh terhadap potensinya sebagai carrier suatu senyawa. Ruang pori yang ada pada biochar dapat menyerap urea, sehingga nantinya akan dilepaskan secara perlahan ke dalam tanah.



Gambar 3. Hasil formulasi urea dengan asam humat dan biochar.



Gambar 4. Hasil SEM dari berbagai sumber bahan; (a) biochar, (b) senyawa humat.

Bentuk morfologi asam humat dari lignite berbentuk bongkahan yang lebih amorf tidak beraturan. Asam humat yang dihasilkan memiliki pH yang alkali sebesar 9.2 yang nanti akan memiliki pengaruh terhadap ekspansi dan dispersi molekul senyawa humat. Bentuk bongkahan dan permukaannya kasar seperti ini karena senyawa humat masih diselubungi oleh senyawa humin (Lu *et al.*, 2020). Adanya gugus $-COOH$ yang mengandung oksigen tinggi dapat membentuk kompleks yang stabil dengan ion-ion logam yang dapat berfungsi sebagai ligan dalam pembentukan kompleks khelat pada asam humat.

3.3 Pola Pelepasan Nitrogen dari Pupuk UAB

Pelepasan unsur hara nitrogen dari pupuk dianalisis berdasarkan jumlah nitrogen dalam bentuk N-amonium ($N-NH_4^+$) dan N-nitrat ($N-NO_3^-$). Perbandingan laju pelepasan NH_4^+ dari pupuk UAB selama 7 minggu waktu inkubasi dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 5. Pelepasan ion amonium menurun dengan bertambahnya waktu inkubasi dan pelepasan amonium pada 7 minggu inkubasi mencapai hingga 28% dari total N yang diberikan ke dalam tanah.

Pada minggu pertama pupuk urea (U0) melepaskan nitrogen dalam bentuk amonium lebih banyak bila dibandingkan dengan formulasi pupuk UAB (U1, U2, U3, U4). Konsentrasi amonium yang terekstrak dari pupuk urea masih tinggi sampai minggu ke-3 dan mulai mengalami penurunan pada minggu ke 5 dan minggu ke 7. Namun, berbeda dengan pupuk UAB yang masih menghasilkan amonium rata-rata sampai minggu ke-7. Pada minggu ke-5 sampai minggu ke-7 pupuk UAB melepaskan amonium dalam jumlah yang berbeda-beda karena dipengaruhi oleh kadar humat dari masing-masing pupuk. Semakin tinggi kadar humat yang diberikan ke dalam pupuk mengakibatkan laju pembentukan amonium semakin cepat. Hal ini dapat dilihat dari perlakuan U1 dan U3 yang memiliki kadar humat 2% memiliki jumlah hara amonium yang lebih sedikit apabila dibandingkan dengan perlakuan U2 dan U4 yang memiliki kadar humat 5%. Hal tersebut dapat terjadi karena sifat dari asam humat yang memiliki gugus fungsional aktif hidroksil, fenol, karboksilat, dan aromatik menyebabkan terjadinya ikatan hidrogen dan ikatan kovalen pada urea, sehingga pada awal masa inkubasi urea dari pupuk dengan pelapis asam humat lebih cepat berubah menjadi amonium (Yi *et al* 2022; Suntari *et al.*, 2013).



Gambar 5. Perlakuan Inkubasi Tanah selama 7 Minggu Masa Inkubasi.

Tabel 2. Pelepasan Nitrogen dalam Bentuk NH_4^+ (%) dari Pupuk UAB selama 7 Minggu Masa Inkubasi.

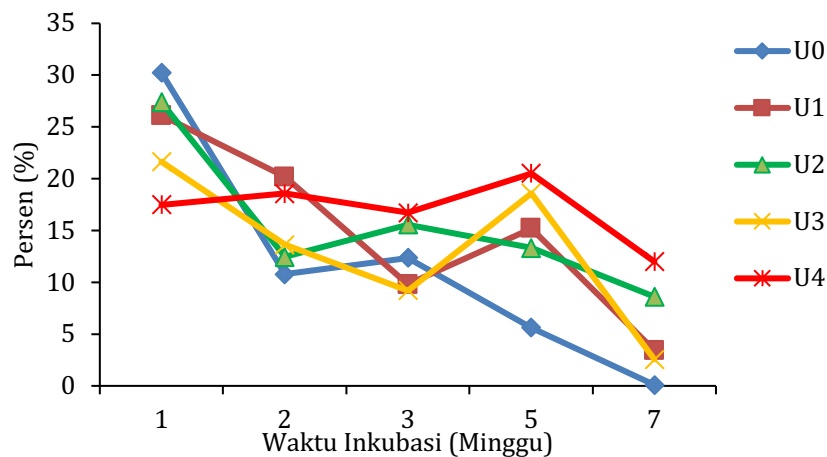
Perlakuan	Minggu ke-				
	1	2	3	5	7
U0	30.24	10.77	12.37	5.63	0.01
U1	26.12	20.17	9.79	15.22	3.43
U2	27.38	12.45	17.58	13.32	8.61
U3	21.64	13.63	9.21	18.61	2.56
U4	17.50	18.56	16.72	20.53	1.04

Perlakuan U3 dan U4 melepaskan amonium lebih lambat dibandingkan dengan perlakuan yang lainnya (Gambar 6), diduga dipengaruhi oleh adanya pelapisan PVA pada pupuk. Polivinil Alkohol (PVA) merupakan polimer semi-kristal biodegradable hidrofilik memiliki sifatnya biokompatibilitas dan tidak beracun, sulit terhidrolisis walaupun larut dalam air. PVA adalah bahan yang berfungsi sebagai agen pembentuk pori untuk meningkatkan keteraturan bentuk pori-pori pada membran perekat dan pelapis komponen dari film atau membran yang fleksibel (Inayah *et al.*, 2024). Penelitian (Vo *et al.*, 2021; Nooeid *et al.*, 2021). menunjukkan bahwa PVA dapat digunakan sebagai bahan campuran yang baik untuk membuat lapisan film yang dapat menghambat pelepasan hara dari pupuk urea.

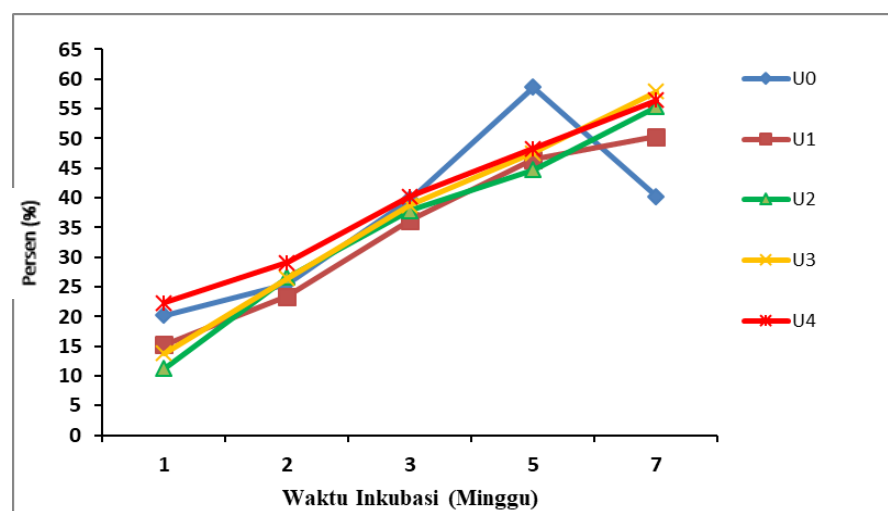
Pupuk yang diberikan ke dalam tanah awalnya berubah menjadi N-NH_4^+ melalui proses amonifikasi. Ion amonium yang dihasilkan dari proses amonifikasi akan berubah menjadi ion nitrat melalui proses nitrifikasi. Proses nitrifikasi hanya dapat berlangsung pada kondisi aerob. An *et al.*, (2022) menyatakan bahwa tahap pertama reaksi nitrifikasi melibatkan bakteri autotrof obligat yang dikenal dengan nama nitrosomonas yang menghasilkan ion nitrit, lalu ion nitrit tersebut diubah menjadi ion nitrat oleh bakteri nitrobacter. Aktivitas nitrosomonas dan nitrobacter meningkatkan jumlah nitrat dalam tanah yang dibentuk melalui proses nitrifikasi, sehingga ion nitrat mengalami kenaikan sejalan dengan waktu inkubasi (Gambar 7).

Pola pelepasan nitrat (NO_3^-) pada minggu pertama terjadi kenaikan secara bertahap dari 14 % sampai 56% pada minggu ke-7 waktu inkubasi (Gambar 7). Dari Gambar 7 dapat dilihat juga pupuk UAB mampu mempertahankan keberadaan nitrat hingga minggu ke-7 lebih dari 50% dibandingkan dengan urea yang hanya 40%. Pupuk urea yang telah menghasilkan nitrat pada minggu ke-5 lebih dari 50% telah mengalami kehilangan 30% nitrogen. Kehilangan ini mungkin disebabkan oleh penguapan ataupun terjadi pengikatan oleh KTK tanah maupun asam humat.

Pada minggu pertama jumlah nitrat lebih tinggi jika dibandingkan dengan pupuk UAB, hal ini dipengaruhi oleh jumlah amonium yang dihasilkan pada minggu pertama. Jumlah nitrat dari pupuk urea U0 bertambah pada minggu ke-2 (Gambar 7) karena terjadi perubahan bentuk dari amonium yang dihasilkan pada minggu pertama (Gambar 6).



Gambar 6. Pola pelepasan amonium (NH_4^+) (%) selama 7 minggu waktu inkubasi.



Gambar 7. Pola pelepasan nitrat (NO_3^-) (%) selama 7 minggu waktu inkubasi.

Pada minggu ke-7 nitrat yang dihasilkan oleh UAB (U3 dan U4) lebih tinggi jika dibandingkan dengan perlakuan U1 dan U2. Hal ini juga dipengaruhi oleh produksi amonium sampai minggu ke-7 dari perlakuan U3 dan U4 seperti terlihat pada (Gambar 6) yang mampu mempertahankan jumlah nitrat sampai minggu ke-7 (Gambar 7). Berdasarkan data dari Gambar 6 dan Gambar 7, terdapat kecenderungan bahwa jumlah amonium dan nitrat belum mencapai 100% sampai minggu ke-7, hal ini karena nitrogen masih diikat dalam bentuk amonium di dalam rongga biochar untuk sementara waktu dan kemudian akan dilepas pada saat jumlah amonium dalam tanah berkurang.

Gambar 7 menunjukkan konsentrasi nitrat mengalami peningkatan sejalan dengan waktu inkubasi. Dari grafik tersebut dapat dilihat peran dari biochar dan asam humat dalam memperlambat laju pembentukan amonium (NH_4^+) yang secara langsung mempengaruhi laju perubahan amonium menjadi nitrat (NO_3^-). Berdasarkan grafik tersebut juga menunjukkan peran dari biochar dan asam humat dalam memperlambat perubahan bentuk amonium menjadi nitrat yang dapat dilihat dari peningkatan konsentrasi nitrat yang terjadi secara lambat (*slow release*) di dalam tanah. Biochar dan asam humat berperan dalam memperlambat proses pembentukan amonium yang diharapkan dapat memperlambat laju pembentukan nitrat. Amonium merupakan bahan baku untuk proses nitrifikasi maka syarat utama ialah harus tersedia amonium (Wendeborn, 2020).

3.4 Respon Pemberian Pupuk UAB terhadap Pertumbuhan Tanaman Jagung

Respon pemberian pupuk UAB terhadap tinggi tanaman jagung pada minggu pertama sampai minggu ke lima setelah tanam (MST) dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa pemberian pupuk UAB berbeda nyata dibandingkan dengan kontrol, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan yang diberi pupuk UAB.

Pertumbuhan tinggi tanaman jagung akibat aplikasi pupuk UAB memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tinggi tanaman mulai dari perlakuan sampai U1 sampai U4. Pertumbuhan tertinggi ditunjukkan oleh perlakuan pupuk UAB U2 (Humat 5% tanpa filler). Dilihat dari pola pertumbuhan tinggi tanaman pada minggu ke lima, perlakuan U3, U4 dan U5 pada minggu ke lima menunjukkan pertumbuhan tinggi tanaman 90.1-90.8 cm dan U5 hanya mendapatkan tinggi tanaman 89.6 cm, artinya aplikasi pupuk yang menggunakan filler baik dosis humat 2% atau 5% memberikan hasil yang lebih rendah, dibandingkan dengan perlakuan pupuk tanpa filler. Perbedaan *tren* yang terlihat pada tinggi tanaman selama fase vegetatif yang diberi pupuk UAB karena perbedaan dari pola pelepasan kedua kelompok pupuk tersebut. Pupuk U3 dan U4 merupakan formulasi campuran pupuk yang menggunakan pelapisan (*coating*) PVA, sehingga pola pelepasannya menjadi lebih stabil karena pengaruh dari penguapan dan pencucian bisa dikatakan lebih kecil. Pupuk yang terserap oleh tanaman lebih optimal dan pola pelepasan pupuk tersebut menjadi lebih stabil.

Tanaman jagung merupakan tanaman yang memerlukan banyak nutrisi pada awal masa pertumbuhannya yang cepat. Menurut (Congreves *et al.*, 2021; Mahmud *et al.*, 2020) selama fase vegetatif, hara N berperan sangat besar dalam mengendalikan pertumbuhan pada tanaman. Berdasarkan data pertumbuhan tinggi tanaman menunjukkan bahwa pupuk yang bersifat lepas-lambat kurang sesuai dengan pola pertumbuhan tanaman jagung. Hal ini disebabkan oleh jumlah N yang dilepaskan oleh pupuk tidak sesuai dengan jumlah N yang dibutuhkan tanaman jagung pada masa pertumbuhannya. Hasil penelitian (Agustina *et al.*, 2024) juga menunjukkan bahwa tanaman jagung yang dipupuk dengan pupuk N slow release memiliki pertumbuhan yang lebih rendah dibandingkan tanaman jagung yang dipupuk urea biasa.

Tabel 3. Rata-Rata Pertumbuhan Tinggi Tanaman Jagung Selama lima Minggu Setelah Tanam

NO	Label	Tinggi Tanaman (cm)				
		1 MST	2 MST	3 MST	4 MST	5 MST
1	Kontrol	17.7 a	37.2 a	54.2 a	60.8 a	81.3 a
2	U0	22.4 b	46.6 b	66.6 b	82.1 b	94.6 b
3	U1	24.5 b	43.0 b	64.0 b	84.8 b	96.3 b
4	U2	23.3 b	42.9 b	65.9 b	89.2 b	98.7 b
5	U3	20.5 b	38.1 b	56.8 b	73.7 ab	90.8 b
6	U4	19.8 ab	35.7 b	53.4 ab	78.3 b	90.1 b
7	U5	20.7 b	34.3 ab	54.3 b	78.7 b	89.6 ab

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

Tabel 4. Rata-Rata Jumlah Daun Mingguan Selama Lima Minggu Setelah Tanam

NO	Label	Jumlah Daun (helai)				
		1 MST	2 MST	3 MST	4 MST	5 MST
1	Kontrol	2	3	5	6	6
2	U0	3	4	5	7	8
3	U1	3	4	5	7	8
4	U2	3	4	5	7	8
5	U3	3	4	5	7	7
6	U4	3	4	5	6	7
7	U5	3	4	5	6	7

Tabel 5. Rata-Rata Lebar Daun Mingguan Selama Lima Minggu Setelah Tanam

NO	Label	Lebar Daun (cm)				
		1 MST	2 MST	3 MST	4 MST	5 MST
1	Kontrol	1.1	1.6	1.8	2.1	2.3
2	U0	1.4	1.8	2.2	2.5	3.7
3	U1	1.4	1.7	2.3	2.7	3.6
4	U2	1.5	1.9	2.5	2.9	3.9
5	U3	1.2	1.7	1.9	2.5	2.8
6	U4	1.3	1.6	2.0	2.5	2.8
7	U5	1.3	1.5	1.9	2.5	2.7

Tabel 4 dan Tabel 5 menunjukkan secara keseluruhan bahwa pemberian pupuk UAB baik pada minggu pertama maupun minggu kelima memberikan pengaruh terhadap lebar daun dan jumlah daun, dimana pada minggu pertama pemberian pupuk UAB Humat 5% (U2) mampu meningkatkan pertumbuhan lebar daun tanaman jagung dengan lebar daun 3.9 cm dibandingkan dengan perlakuan lainnya dan kontrol. Hasil penelitian (Haque 2020; Khajavi *et al.*, 2023) bahwa pupuk nitrogen slow release berpengaruh terhadap jumlah daun tanaman jagung. Peningkatan tersebut diperkirakan karena didalam pupuk tersebut mengandung nitrogen yang berperan besar dalam pertumbuhan vegetatif tanaman, begitu juga humat dan biochar yang merupakan bahan organik yang dapat memperbaiki sifat tanah baik sifat fisika, sifat kimia maupun sifat biologi sehingga dengan kombinasi pupuk slow release demikian akan mendukung untuk pertumbuhan tanaman (lebar daun) lebih baik. Hal ini diperkuat oleh penelitian (Dely *et al.*, 2024) bahwa perlakuan pupuk slow release dapat meningkatkan ukuran lebar daun tanaman jagung.

Pertumbuhan jumlah daun akibat perlakuan Pupuk UAB tidak terdapat perbedaan jumlah daun, yang signifikan antar perlakuan pada minggu pertama sampai minggu ketiga, Namun pada minggu ke lima jumlah daun mulai menunjukkan perbedaan antar perlakuan. Rata-rata pengamatan jumlah daun pada minggu pertama yang terbanyak terdapat pada perlakuan U1 dan U2 (perlakuan pupuk tanpa coating) dengan jumlah daun sebanyak 8 helai, sedangkan yang terendah terdapat pada perlakuan kontrol dengan jumlah daun sebanyak 6 helai.

4. KESIMPULAN

Pola pelepasan ion amonium pada pupuk UAB menurun dengan bertambahnya waktu inkubasi dan penurunannya mencapai 28% pada minggu ke tujuh inkubasi sedangkan N-nitrat meningkat selama periode inkubasi. Perlakuan U3 dan U4 yang menggunakan *coating* Polivinil Alkohol (PVA) mampu menurunkan pelepasan jumlah nitrogen dalam bentuk N-amonium ($N-NH_4^+$) dan N-nitrat ($N-NO_3^-$) dan melepaskannya lebih lambat hingga menjadi masih tersedia sampai akhir masa inkubasi dibandingkan dengan kontrol pupuk urea. Peran dari biochar dan asam humat dalam memperlambat perubahan bentuk amonium menjadi nitrat yang dapat dilihat dari peningkatan konsentrasi nitrat yang terjadi secara lambat (*slow release*) di dalam tanah. Aplikasi pupuk UAB tanpa pelapis (non coating) memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tinggi tanaman dan lebar daun tanaman jagung. Pertumbuhan tertinggi dan lebar daun terbaik ditunjukkan oleh perlakuan pupuk UAB U2 (Humat 5% tanpa *filer/coating*). Formulasi Pupuk UAB yang menggunakan coating PVA kurang cocok dengan kebutuhan N tanaman jagung karena jumlah N yang dilepaskan oleh pupuk tidak sesuai dengan jumlah N yang dibutuhkan tanaman jagung pada masa pertumbuhannya.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan Terima Kasih sebesar-besarnya kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemdikbukristek) yang telah memberikan dana hibah DRTPM untuk membiayai secara penuh penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada semua pihak yang berkontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- A El-Aziz, M.E., D.M. Salama, S.M. Morsi, A.M. Youssef, & M. El-Sakhawy. 2022. Development of polymer composites and encapsulation technology for slow-release fertilizers. *Reviews in Chemical Engineering*. 38(5):603-616.
- Agustina, D.U., F.A. Rahman, S. Supriyadi, & C. Wasonowati. 2024. Evaluasi pupuk nitrogen lepas lambat pada tanaman jagung (*Zea mays L.*). *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 11(1):95-102.
- Ahmed, O.H. H. C. H. Braine Yap and A.M. Nik Muhamad. 2009. Enhancing the urea-n use efficiency in maize (*Zea mays*) cultivation on acid soils amended with zeolite and TSP. *American Journal of Applied Sciences*. 6(5):829-833.
- Alkharabsheh, H.M., M.F. Seleiman, M.L. Battaglia, A. Shami, R.S. Jalal, B.A. Alhammad, & A.M. Al-Saif. 2021. Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: a review. *Agronomy*. 11(5):993.
- Alimin, Narsito, S.J. Santosa, dan S. Noegrohati. 2005. Fraksinasi Asam Humat Dan Pengaruhnya Pada Kelarutan Ion Logam Seng (II) Dan Kadmium (II) (Humic Acid Fractionation And Its Effects On The Solubilities Of Metal Ions Zinc (II) And Cadmium (II)). *ILMU DASAR 6*: 1-6.
- Allard, B. 2006. A comparative study on the chemical composition of humic acids from forest soil, agricultural soil and lignite deposit: bound lipid, carbohydrate and amino acid distributions. *Geoderma*. 130(1-2):77-96.
- An, T., F. Wang, L. Ren, S. Ma, S. Li, L. Liu, & J. Wang. 2022. Ratio of nitrate to ammonium mainly drives soil bacterial dynamics involved in nitrate reduction processes. *Applied Soil Ecology*. 169: 104164.
- Bashir, O., T. Ali, Z.A. Baba, G.H. Rather, S.A. Bangroo, S.D. Mukhtar, & R.A. Bhat. 2021. *Soil Organic Matter and Its Impact On Soil Properties and Nutrient Status*. Microbiota and Biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs. pp. 129-159.
- Beig, B., M.B.K. Niazi, B. Ullah, A.N. Gondal, Z. Jahan, M. Zia, & N. Ahmad. 2024. Effect of zinc oxide and zinc oxide nanoparticles coating on urea diffusion and its release kinetics for design and development of slow-release fertilizer: an experimental and numerical investigation. *Journal of Coatings Technology and Research*. 21(1):199-213.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2002. *The Nature and Properties of Soils*. Thirteenth Edition. Pearson Education, Inc. Upper Saddle River. New Jersey.
- Cui, M., L. Zeng, W. Qin, & J. Feng. 2020. Measures for reducing nitrate leaching in orchards: A review. *Environmental Pollution*. 263:114553.
- Congreves, K.A., O. Otchere, D. Ferland, S. Farzadfar, S. Williams, & M.M. Arcand. 2021. Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. *Frontiers in Plant Science*. 12:637108.
- Dely, A., S. Sukmawati, M. Yamin, M.A. Akib, & S. Suherman. 2024. Karakterisasi morfologi jagung hibrida (*Zea mays L.*) pada berbagai pemberian pupuk slowrelease berbasis biochar pada tanah bertekstur liat. *Perbal: Jurnal Pertanian Berkelanjutan*. 12(1):104-113.
- Dimkpa, C.O., J. Fugice, U. Singh, & T.D. Lewis. 2020. Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency—Trends and perspectives. *Science of the Total Environment*. 731:139113.
- Erickson, A.J., R.S. Ramsewak, A.J. Smucker, and M.G. Nair. 2000. Nitrification inhibitors from the roots of *Leucaena leucocephala*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48(12):6174-6177.

- Flatian, A.N., A.R. Febrianda, & E. Suryadi. 2020. Efisiensi pemupukan N tanaman jagung manis akibat beberapa dosis dan waktu aplikasi urea menggunakan teknik isotop ^{15}N . *Jurnal Tanah dan Iklim*. 44(2):93-100.
- Funderburg, E. 2020. The role of organic matter in soil. *Stockfarm*. 10(9):31-33.
- Glaser, B., J. Lehmann, dan W. Zec. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal, a review. 35:219-230.
- Guo, J., J. Fan, F. Zhang, S. Yan, J. Zheng, Y. Wu, & Z. Li. 2021. Blending urea and slow-release nitrogen fertilizer increases dryland maize yield and nitrogen use efficiency while mitigating ammonia volatilization. *Science of the Total Environment*. 790:148058.
- Guo, Y., Z. Ma, B. Ren, B. Zhao, P. Liu, & J. Zhang. 2022. Effects of humic acid added to controlled-release fertilizer on summer maize yield, nitrogen use efficiency and greenhouse gas emission. *Agriculture*. 12(4):448.
- Hafiz, A., S.G. Sari, & C. Nisa. 2021. Efisiensi serapan nitrogen pada pertumbuhan kacang panjang (*Vigna sinensis* L.) setelah pemberian sludge industri karet remah. *Bioscientiae*. 17(1):1-14.
- Haque, A.D. 2020. Aplikasi lima formula pupuk nitrogen yang dilapis bahan lokal terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman jagung manis (*Zea mays* L. Sacaratha). *Jurnal Pertanian Indonesia*. 1(1):1-8.
- He, H., M. Peng, S. Ru, Z. Hou, & J. Li. 2022. A suitable organic fertilizer substitution ratio could improve maize yield and soil fertility with low pollution risk. *Frontiers in Plant Science*. 13, 988663.
- Ibrahim, M.M., Tong, C., Hu, K., Zhou, B., Xing, S., & Mao, Y. 2020. Biochar-fertilizer interaction modifies N-sorption, enzyme activities and microbial functional abundance regulating nitrogen retention in rhizosphere soil. *Science of the Total Environment*, 739, 140065.
- Ighalo, J. O., Conradie, J., Ohoro, C. R., Amaku, J. F., Oyedotun, K. O., Maxakato, N. W., & Adegoke, K. A. 2023. Biochar from coconut residues: an overview of production, properties, and applications. *Industrial Crops and Products*, 204, 117300.
- Inayah, N. N., Kusumaatmaja, A., & Murtafi'atin, R. 2024. Slow-release fertilizer behavior of polyvinyl alcohol (PVA)/urea/ TiO_2 nanofiber membrane. *Polymers for Advanced Technologies*, 35(7), e6472.
- Jakhar, A. M., Aziz, I., Kaleri, A. R., Hasnain, M., Haider, G., Ma, J., & Abideen, Z. 2022. Nano-fertilizers: A sustainable technology for improving crop nutrition and food security. *NanoImpact*, 27, 100411.
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., & Lehmann, J. 2021. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *Gcb Bioenergy*, 13(11):1731-1764.
- Kaavessina, M., Distantina, S., & Shohih, E. N. 2021. A slow-release fertilizer of urea prepared via melt blending with degradable poly (lactic acid): formulation and release mechanisms. *Polymers*, 13(11), 1856.
- Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi, M. 2023. Synthesis modified biochar-based slow-release nitrogen fertilizer increases nitrogen use efficiency and corn (*Zea mays* L.) growth. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 13(2):593-601.
- Li, H. F., An, S. D., Zhang, L., Peng, H., Ma, W., Meng, X., & Ye, H. M. 2021. Urea fertilizer with precisely regulable slow-release performance by complexing with random copolyester. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105120.
- Lu, J., Hu, T., Zhang, B., Wang, L., Yang, S., Fan, Zhang, F. 2021. Nitrogen fertilizer management effects on soil nitrate leaching, grain yield and economic benefit of summer maize in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 247, 106739.
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Huang, H. 2021. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the total Environment*, 763, 144204

- Lu, Y. Liang, Y. Liu, F. Wang, Z. Shi, Z. Nano Scale Visualization of Enhanced Adsorption and Distribution of Humic Acid on Hematite: Effect of Pb(II) Ions. *Chemical Geology*, 2020, 541, 119573.
- Major, J. Steiner, C. Downie, A. & Lehmann, J. 2012. Biochar effects on nutrient leaching. In *Biochar for environmental management* (pp. 303-320). Routledge Yuan, J. H. Xu, R. K. (2011). The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil use and management*. 27(1):110-115.
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. (2020). Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants*, 9(1), 97.
- Mnv Almutairi, A. A., Ahmad, M., Rafique, M. I., & Al-Wabel, M. I. 2023. Variations in composition and stability of biochars derived from different feedstock types at varying pyrolysis temperature. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 22(1):25-34.
- Ndzelu, B. S., Dou, S., Zhang, X., Zhang, Y., Ma, R., & Liu, X. 2021. Tillage effects on humus composition and humic acid structural characteristics in soil aggregate-size fractions. *Soil and Tillage Research*, 213, 105090.
- Nooeaid, P., Chuysinuan, P., Pitakdantham, W., Aryuwananon, D., Techasakul, S., & Dechtrirat, D. 2021. Eco-friendly polyvinyl alcohol/polylactic acid core/shell structured fibers as controlled-release fertilizers for sustainable agriculture. *Journal of Polymers and the Environment*. 29(2): 552-564.
- Pariyar, P., Kumari, K., Jain, M. K., & Jadhao, P. S. 2020. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. *Science of the Total Environment*, 713, 136433.
- Qasim, W., Xia, L., Lin, S., Wan, L., Zhao, Y., & Butterbach-Bahl, K. 2021. Global greenhouse vegetable production systems are hotspots of soil N₂O emissions and nitrogen leaching: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 272, 116372.
- Rahmi, E., Marlina, M., Fahmi, R., Yamani, S. Z., & Mariana, M. 2023. Efektifitas Penggunaan Humic Substance Dengan Carrier Zeolit Dan Biochar Terhadap Peningkatan Pertumbuhan Tanaman Jagung (*Zea Mays*). *Jurnal Agrotek Tropika*. 11(4):731-739.
- Rahmi, E., & Satriawan, H. 2022. Soil amelioration using several types of humic substances extracted from andisol, spodosol, peat and lignite to increase the growth of corn plants (*Zea mays*). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1115(1):012089. IOP Publishing.
- Rahmi, E. Suwardi, S. Sumawinata, B. 2018. Characterization of Humic Substance Extracted from Andisols, Spodosols, Peat, and Lignite. *Sains Tanah-Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 15(1):35-45.
- Schnee, L. S., Knauth, S., Hapca, S., Otten, W., & Eickhorst, T. 2016. Analysis of physical pore space characteristics of two pyrolytic biochars and potential as microhabitat. *Plant and Soil*, 408, 357-368.
- Schreiter, I. J., Schmidt, W., Kumar, A., Graber, E. R., & Schüth, C. 2020. Effect of water leaching on biochar properties and its impact on organic contaminant sorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 691-703.
- Sharaf-Eldin, M. A., Elsayy, M. B., Eisa, M. Y., El-Ramady, H., Usman, M., & Zia-ur-Rehman, M. 2022. Application of nano-nitrogen fertilizers to enhance nitrogen efficiency for lettuce growth under different irrigation regimes. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 59(3).
- Solaiman, Z.M., dan Anawar, H.M., 2015, Application of Biochar for Soil. *Pedosphere*. 25(5):631-638.
- Suyatmo, R. I. D., Fitriyani, N. C., Fadila, M. A., Melyna, E., & Nulhakim, L. 2024. Pengaruh Kecepatan Pengadukan serta Penambahan Poli Vinil Alkohol (PVA) dan Sodium Dodesil Sulfat (SDS) pada Enkapsulasi Minyak Biji Rami dalam Urea-Formaldehid Untuk Aplikasi Self-Healing Coating. *Jurnal Teknologi*. 11(2):195-204.

- Suntari R, Retnowati R, Soemarno, Munir M. 2013. Study on the release of Navailable (NH_4^+ and NO_3^-) of urea-humate. *International Journal of Agriculture and Forestry*. 3(6): 209–219.
- Taer, E., Aiman, S., Sugianto, S., dan Taslim, R., 2015, Variasi Ukuran Karbon Tempurung Kelapa Sebagai Alat Kontrol Kelembapan, *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, Pekanbaru. 4:89-92.
- Tomaszewska M, Jarosiewicz A. 2002. Use of poly sulfone in controlled-release NPK fertilizer formulations. *J. Agric. Food Chem*. 50: 4634-4639.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1):191-215.
- Trenkel T. 2021. Slow-and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. *International Fertilizer Industry Association (IFA)*.
- Ukalska-Jaruga, A., Bejger, R., Debaene, G., & Smreczak, B. 2021. Characterization of soil organic matter individual fractions (fulvic acids, humic acids, and humins) by spectroscopic and electrochemical techniques in agricultural soils. *Agronomy*, 11(6), 1067.
- Vo, P. T., Nguyen, H. T., Trinh, H. T., Nguyen, V. M., Le, A. T., Tran, H. Q., & Nguyen, T. 2021. The nitrogen slow-release fertilizer based on urea incorporating chitosan and poly (vinyl alcohol) blend. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101528.
- Walida, H., Harahap, F. S., Dalimunthe, B. A., Hasibuan, R., Nasution, A. P., & Sidabuke, S. H. 2020. Pengaruh pemberian pupuk urea dan pupuk kandang kambing terhadap beberapa sifat kimia tanah dan hasil tanaman sawi hijau. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 7(2):283-289.
- Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G. & Wang, H. 2022. Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167.
- Wendeborn, S. 2020. The chemistry, biology, and modulation of ammonium nitrification in soil. *Angewandte Chemie International Edition*. 59(6):2182-2202.
- Yi, Y., Zhang, H. Y., Liu, L. W., Wang, J., Zhu, X. C., Zhao, N., & Feng, G. H. 2022. Effects of slow-released fertilizer compound humic acid instead of urea on grain yield and population quality in Xumai new varieties.
- Yang, H., Luo, B., Zhang, Y., Zhou, B., Manzoor Ahmed, S., Liu, H. & Xia, S. 2020. Study of humic acid adsorption character on natural maifan stone: characterization, kinetics, adsorption isotherm, and thermodynamics. *ACS omega*. 5(13):7683-7692.
- Yang, L., Wu, Y., Wang, Y., An, W., Jin, J., Sun, K., & Wang, X. 2021. Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus. *Science of the Total Environment*, 758, 143657.
- Zafar, N., Niazi, M. B. K., Sher, F., Khalid, U., Jahan, Z., Shah, G. A., & Zia, M. 2021. Starch and polyvinyl alcohol encapsulated biodegradable nanocomposites for environment friendly slow release of urea fertilizer. *Chemical Engineering Journal Advances*, 7, 100123.
- Zhao, C., Xu, J., Bi, H., Shang, Y., & Shao, Q. 2023. A slow-release fertilizer of urea prepared via biochar-coating with nano-SiO₂-starch-polyvinyl alcohol: formulation and release simulation. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103264.