

Peningkatan Efisiensi Pemupukan Nitrogen Tanaman Padi melalui Pupuk Lepas Lambat

Increasing the Efficiency of Nitrogen Fertilization in Rice through Slow-Release Fertilizers

Gagad Restu Pratiwi, Sujinah

Pusat Riset Tanaman Pangan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, Badan Riset dan
Inovasi Nasional (BRIN)
Kawasan Sains dan Teknologi (KST) Dr. (H.C). Ir. Soekarno Jl. Raya Jakarta-Bogor KM 46,
Cibinong, Bogor 16915
E-mail: sujinah@brin.go.id

Diterima: 16 Juni 2025

Revisi: 9 September 2025

Disetujui: 11 September 2025

ABSTRAK

Nitrogen (N) sebagai hara penting dalam pertumbuhan dan hasil tanaman. N mudah larut dalam air sehingga mudah tersedia bagi tanaman, tetapi bersifat volatil sehingga mudah hilang jika tidak diserap di dalam tanah. Pemupukan N merupakan cara untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman karena kandungan N yang ada di tanah tidak cukup. Namun demikian, penggunaan pupuk N yang berlebihan memiliki dampak serius terhadap lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan pupuk N yang efisien sangat penting untuk mengoptimalkan produksi padi. Artikel ini membahas jenis pupuk lepas lambat dan bahan pelapisnya, serta penggunaan pupuk N lepas lambat yang terbukti efektif meningkatkan efisiensi penggunaan N dan hasil panen. Pupuk nitrogen lepas lambat merupakan pupuk yang memiliki laju pelepasan yang lebih rendah dibanding pupuk urea konvensional. Pupuk nitrogen lepas lambat terdiri dari dua kelompok, yaitu yang memiliki kelarutan rendah, dan pupuk yang dilapisi dengan bahan tertentu. Bahan pelapis dapat dikelompokkan ke dalam tiga jenis, yaitu berupa bahan organik, non-organik, dan biopolimer. Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pupuk nitrogen lepas lambat meningkatkan efisiensi penggunaan N dan juga hasil gabah. Peningkatan ini berkaitan dengan meningkatnya serapan N oleh tanaman dan juga penurunan kehilangan N. Oleh karena itu, penggunaan pupuk nitrogen lepas lambat menjadi alternatif cara untuk diterapkan pada budidaya tanaman padi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata kunci: efisiensi penggunaan nitrogen, hasil gabah, nitrogen, pupuk lepas lambat

ABSTRACT

Nitrogen (N) is an essential nutrient for plant growth and yield. N is very soluble in water, thereby it is easily available to plants, but it is volatile, making it easily lost if not absorbed by the soil. N fertilization is a way to fulfill plant nutrient needs when the N content in the soil is not sufficient. However, excessive use of N fertilizer has serious environmental impacts. Therefore, efficient use of N fertilizer is crucial to optimize rice production. This article reviewed types of slow-release fertilizer and coating materials, as well as the use of slow-release N fertilizer, which has been proven effective in increasing N use efficiency and crop yields. Slow-release nitrogen fertilizer is a fertilizer that has a lower release rate than conventional urea fertilizer. Slow-release nitrogen fertilizer consists of two groups, namely those with low solubility and fertilizers coated with certain materials. Coating materials can be classified into three types: organic, inorganic, and biopolymer materials. Research results showed that the use of slow-release nitrogen fertilizer increased nitrogen use efficiency (NUE) and grain yield. This increase was related to increased N uptake by plants and also reduced N loss. Therefore, the application of slow-release nitrogen fertilizer is an alternative way to be applied to rice cultivation, which is more environmentally friendly and sustainable.

Keywords: nitrogen use efficiency, grain yields, nitrogen, slow-release fertilizer

I. PENDAHULUAN

Nitrogen (N) merupakan unsur hara esensial yang berperan penting dalam meningkatkan hasil padi (Yang et al., 2012; Jiang et al., 2016). Pupuk N dibutuhkan tanaman untuk mendukung proses fotosintesis (pembentukan klorofil), pertumbuhan dan perkembangan (sintesis protein, enzim, DNA, dan RNA), serta meningkatkan kualitas hasil gabah. Peningkatan dosis pupuk N pada taraf tertentu dapat memperluas luas daun, meningkatkan tinggi tanaman, jumlah anakan, laju fotosintesis, dan laju transpirasi (Zhang et al., 2020). Apabila jumlah N yang diserap akar lebih rendah daripada kebutuhan tanaman untuk pertumbuhan, maka akan terjadi defisiensi N. Defisiensi N menyebabkan degradasi pigmen fotosintesis, ditandai dengan gejala menguningnya daun, sehingga menurunkan laju fotosintesis dan memengaruhi pertumbuhan tanaman. Lebih lanjut, defisiensi N menyebabkan perubahan pola asam organik pada daun dan akar, terutama asam malat dan sitrat (Chen et al., 2022). Namun demikian, sebagian besar penggunaan pupuk N di Indonesia masih berlebihan dan kurang efektif. Pemupukan N yang berlebihan menyebabkan degradasi tanah, penurunan kandungan bahan organik tanah, serta pencemaran lingkungan (Singh, 2018). Selain itu, pemupukan N berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman, khususnya terkait risiko kerebahan. Pemupukan N dalam jumlah tinggi menyebabkan berkurangnya penetrasi cahaya, penipisan batang, penurunan kekuatan batang, serta peningkatan risiko kerebahan (Lu et al., 2025). Bahkan, pemupukan N secara signifikan memengaruhi perilaku dan daya hidup *Sogatella furcifera*, hama wereng putih pada padi. Perilaku hama tersebut antara lain meningkatnya preferensi makan dan peletakan telur oleh imago, serta umur hidup imago yang lebih panjang, sehingga berpotensi menimbulkan ancaman serius bagi produksi padi (Li et al., 2021). Selain itu, penggunaan pupuk N yang berlebihan justru menurunkan tingkat pengisian gabah hingga 25 persen (Zhao et al., 2022). Kehilangan N menyebabkan eutrofikasi perairan, pencemaran air tanah, penurunan kualitas udara, serta berkontribusi terhadap pemanasan global melalui pembentukan gas rumah kaca (Huang et al., 2017). Oleh karena itu, penerapan

pupuk N perlu dilakukan dengan dosis dan waktu yang tepat agar lebih efisien serta dapat mengurangi pencemaran lingkungan.

Efisiensi penggunaan nitrogen (NUE) adalah kemampuan tanaman dalam menyerap N dan memanfaatkannya untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Sher et al., 2019). Pupuk N yang diberikan pada lahan sawah sebagian diserap oleh tanaman, sebagian tertinggal di dalam tanah, dan sebagian lainnya hilang melalui penguapan amonia, pencucian nitrat, nitrifikasi, serta denitrifikasi (Cao et al., 2006; Zhou et al., 2006; Pan et al., 2012; Pan et al., 2016). Namun demikian, besarnya kehilangan N melalui berbagai mekanisme tersebut bervariasi, bergantung pada kondisi lingkungan dan pengelolaan budidaya. Kehilangan N melalui penguapan amonia dapat mencapai 19,7 persen dan melalui pencucian sebesar 2,1 persen pada pemupukan NPK yang dipadukan dengan pupuk kandang, sedangkan pada pemupukan NPK saja kehilangan N tercatat sebesar 4,2 persen akibat penguapan dan 42,9 persen akibat pencucian (Huang et al., 2017). Penguapan amonia akibat penggunaan urea pada lahan salin (alkali) meningkat seiring dengan kenaikan pH, terutama pada fase anakan padi (Li et al., 2017). Selain itu, pemupukan N dalam jangka panjang memengaruhi proses denitrifikasi di dalam tanah serta menimbulkan perubahan signifikan pada sifat-sifat tanah (Wang et al., 2018).

Penggunaan pupuk yang efisien dapat dicapai melalui penggunaan pupuk yang seimbang serta pemilihan pupuk dengan kualitas baik. Tidak semua jenis pupuk mampu meningkatkan kesuburan tanah secara bersamaan, sehingga pemupukan perlu mempertimbangkan interaksinya dengan unsur hara lain serta sifat kimia tanah (Siri-Prieto et al., 2021). Efisiensi pemupukan dapat ditingkatkan melalui modifikasi sistem kelarutan hara, bentuk dan ukuran pupuk, serta kadar hara yang dikandungnya. Jenis pupuk nitrogen padat yang paling banyak digunakan adalah urea, dengan kandungan N sebesar 46 persen. Namun demikian, urea memiliki tingkat kelarutan yang sangat tinggi pada lahan tergenang air, sehingga tanaman sering memerlukan tambahan pupuk untuk dapat memenuhi kebutuhannya.

Tabel 1. Perbedaan Pupuk Konvensional dan Lepas Lambat

Keterangan	Pupuk Konvensional	Pupuk Lepas Lambat
Pola pelepasan	Tidak dapat dikendalikan/cepat	Lambat
Tingkat kehilangan hara	Hilangnya hara lebih besar akibat pencucian, limpasan, curah hujan, dll	Kehilangan hara relatif lebih rendah karena memiliki lapisan semi-permeabel
Efisiensi penggunaan hara	Rendah	Lebih tinggi dibanding pupuk konvensional
Waktu pelepasan	Pelepasan hara dalam waktu singkat	Waktu pelepasan relatif lebih lama
Kelarutan dalam air	Tinggi kelarutan tinggi	Tingkat kelarutan dipengaruhi oleh bahan pelapis dan faktor-faktor eksternal
Faktor yang memengaruhi pelepasan	Kondisi tanah dan air	pH tanah, suhu, dan mikroorganisme
Hara yang digunakan pertumbuhan tanaman	N, P, K digunakan sebagai hara tanaman	Hara makro (N, P, K) digunakan sebagai pupuk
Harga dan ketersediaan	Lebih murah dan mudah dicari di pasaran	Harga lebih tinggi dan susah dicari di pasaran

Sumber: Priya et al. (2024)

Pada fase awal pertumbuhan, tanaman hanya memerlukan sedikit nutrisi. Pemberian pupuk dalam jumlah besar pada tahap awal tidak seluruhnya dimanfaatkan oleh tanaman, sedangkan sisanya hilang karena sifatnya yang mudah larut dalam air. Dalam kondisi tersebut, urea akan ikut terbuang bersama air limpasan. Oleh karena itu, beberapa ahli berupaya menemukan cara mengurangi kehilangan nitrogen akibat penggunaan pupuk urea sekaligus meningkatkan hasil panen. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah penggunaan pupuk lepas lambat. Pupuk lepas lambat, atau *slow-release fertilizer*, juga menjadi salah satu upaya juga untuk menurunkan jumlah penggunaan pupuk. Pupuk N lepas lambat memperlambat pelepasan unsur hara dari pupuk granular, sehingga tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga menjaga ketersediaan hara bagi tanaman pada fase-fase kritis (Ghafoor et al., 2021; Ghafoor et al., 2022). Tinjauan ini membahas pupuk lepas lambat, jenis serta bahan pelapisnya, serta pengaruhnya terhadap hasil tanaman padi.

II. METODE

Metode pengumpulan data yang digunakan

adalah studi pustaka atau studi literatur dari hasil-hasil penelitian. Studi literatur berfungsi untuk menggali informasi mengenai teori dan temuan hasil penelitian yang dapat memberikan wawasan (*insight*) dari kajian ini. Metode ini digunakan untuk mengumpulkan dan mengkaji berbagai hasil penelitian, baik jurnal maupun sumber relevan lain yang berkaitan dengan pupuk nitrogen lepas lambat. Hasil studi pustaka dideskripsikan secara deskriptif dalam bentuk kata-kata dengan konteks tertentu. Batasan kajian ini terletak pada penggunaan sumber-sumber yang digunakan berupa literatur tanpa melibatkan data primer yang dikumpulkan langsung dari lapangan. Oleh karena itu, hasil kajian ini lebih bersifat teoritis dan konseptual mengenai pupuk nitrogen lepas lambat serta pengaruhnya terhadap tanaman padi.

III. PEMBAHASAN

3.1. Pupuk Lepas Lambat

Pupuk urea konvensional memerlukan sejumlah proses biokimia agar dapat diserap oleh tanaman. Secara umum, nitrogen tersedia dalam bentuk amonium NH_4^+ , nitrit NO_2^- , nitrat NO_3^- , serta gas nitrogen anorganik. Urea yang

diaplikasikan ke tanah akan berubah dari bentuk padat menjadi gas melalui proses volatilisasi amonia, dan hanya sekitar 40–70 persen yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman, sedangkan sisanya hilang melalui pencucian ke dalam tanah maupun dalam bentuk gas yang terlepas ke atmosfer (Trenkel, 2010). Sebaliknya, pupuk lepas lambat diketahui mampu meminimalkan kehilangan hara akibat pencucian maupun faktor lainnya. Tabel 1 menyajikan perbedaan antara pupuk konvensional dan pupuk lepas lambat.

Pupuk lepas lambat didefinisikan sebagai pupuk dengan laju pelepasan nutrisi yang lebih lambat. Laju pelepasan pupuk nitrogen lepas lambat harus lebih lambat dibanding pupuk yang unsur haranya langsung tersedia bagi tanaman, misalnya lebih lambat daripada aplikasi urea atau larutan amonium dan nitrat (Trenkel, 2010). Laju pelepasan dan kehilangan nitrogen dari pupuk urea yang relatif cepat dapat diantisipasi melalui mekanisme pelepasan lambat atau pelepasan terkendali. Pupuk lepas lambat menjadi salah satu cara efektif untuk menyediakan pasokan nitrogen secara teratur sesuai kebutuhan tanaman. Karakteristik umum pupuk lepas lambat meliputi: (i) mampu mengurangi kehilangan hara di dalam tanah dengan membuat hanya sebagian kecil dari aplikasi pupuk langsung tersedia bagi tanaman; (ii) meminimalkan kehilangan nitrogen akibat volatilisasi serta meningkatkan kualitas panen dan hasil produksi; dan (iii) menghemat energi, mengurangi pencemaran lingkungan, serta layak secara ekonomi (Priya et al., 2024).

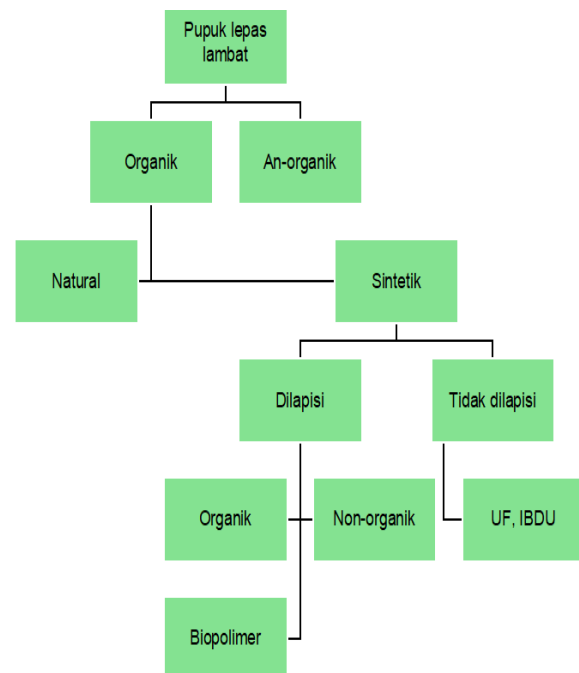
Mekanisme pelepasan pupuk lepas lambat sangat penting untuk memahami cara kerja pupuk ketika diaplikasikan di lapangan. Proses pelepasan pupuk ini sulit divisualisasikan karena dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain bahan pelapis, suhu dan kelembapan tanah, iklim mikro, serta metode budidaya (Beig et al., 2020). Namun demikian, kecepatan, waktu, dan jumlah pelepasannya masih dapat diprediksi dalam batasan tertentu (Yu dan Li, 2019).

3.2. Jenis Pupuk Lepas Lambat

Pupuk lepas lambat dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai atribut, seperti jenis pelapis dan mekanisme pelepasan yang terlibat (Gambar 1). Namun demikian, secara umum

pupuk lepas lambat dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu pupuk dengan kelarutan rendah dan pupuk yang dilapisi (*coated*). Pada kelompok pertama, pupuk berbahan dasar urea formaldehida (UF) telah banyak digunakan sebagai pupuk lepas lambat nitrogen (Yamamoto et al., 2016). Urea berfungsi sebagai sumber nitrogen bagi tanaman, yang mengalami dua tahap reaksi, yaitu perubahan dari amonium menjadi glutamat dan selanjutnya menjadi glutamin (Konzock et al., 2022). Pupuk UF dapat terdegradasi oleh aktivitas mikroba di dalam tanah menjadi urea dan formaldehida (Jahns et al., 2003). Di dalam tanah, nitrogen dilepaskan secara bertahap dari polimer UF rantai panjang karena kelarutannya yang rendah serta proses mineralisasi yang berlangsung lambat. Kondisi ini menyebabkan laju pelepasan nitrogen dapat dikendalikan oleh derajat polimerisasi (Hayatsu, 2014). Hasil penelitian Xiang et al. (2018) menunjukkan bahwa pupuk lepas lambat berbentuk granul yang dibuat melalui proses ekstrusi dingin berbasis UF, amonium polifosfat (APP), dan gel silika amorf (*alkali silica gel-ASG*) terbukti mampu meningkatkan efisiensi nitrogen secara signifikan hingga 84,14 persen.

Selain UF, terdapat pula pupuk *isobutylidene diurea* (IBDU) dan *crotonaldehyde diurea* (CDU). IBDU dihasilkan dari reaksi antara urea dan



Gambar 1. Klasifikasi Pupuk Lepas Lambat (modifikasi dari Priya et al., 2024)

isobutiraldehida, sedangkan CDU diproduksi melalui kondensasi urea dengan aldehida asetat, yang kemudian dapat terdegradasi oleh aktivitas mikroba (Jadhav et al., 2017). Kandungan nitrogen lepas lambat dari beberapa pupuk yang beredar di pasar berbeda-beda dan sampai saat ini masih diproduksi di beberapa perusahaan luar negeri (Tabel 2).

pembengkakan yang menciptakan ruang bebas untuk melarutkan hara yang dienkapsulasi. Proses ini menimbulkan tekanan osmotik akibat meningkatnya konsentrasi, sehingga pelepasan hara terjadi melalui mekanisme difusi maupun dorongan tekanan osmotik. Makin besar penyerapan air, makin tinggi pula pelepasan nutrisi, dengan laju pelepasan yang berlangsung

Tabel 2. Beberapa Produk Pupuk Nitrogen Lepas Lambat

Pupuk	Kandungan Pupuk Lepas Lambat N (%)	Waktu Pelepasan (minggu)	Produsen
Urea	38	22	<i>Nu-Tec Specialty Products, Inc, Kanada</i>
Formaldehida (UF)	23-26	-	<i>Qatar Fertiliser Company</i>
	39	22	<i>Koch Turf & Ornamental, Kansas</i>
	39	26	<i>Lebanan Turf</i>
<i>Isobutylidene Diurea</i> (IBDU)	31	-	<i>Nutrite, Kanada</i>
	28	-	<i>Kingenta, China</i>

Keterangan: (-) menunjukkan tidak terdapat informasi

Kelompok kedua merupakan pupuk lepas lambat yang dilapisi dengan bahan tertentu. Pupuk jenis ini pada dasarnya mengendalikan laju pelepasan hara ke dalam tanah dengan mengurangi tingkat kelarutannya. Lapisan pada pupuk berfungsi sebagai penghalang fisik yang terurai secara bertahap setelah diaplikasikan ke tanah, sehingga memperlambat laju disintegrasi pupuk di dalam air (Guo et al., 2005). Proses ini membantu mencegah kehilangan pupuk yang tidak diinginkan, sekaligus memastikan sebagian besar hara tersedia bagi tanaman tepat waktu selama fase pertumbuhannya. Bahan pelapis yang umum digunakan pada pupuk lepas lambat dapat berupa bahan organik, anorganik, maupun biopolimer.

Mekanisme pelepasan pupuk berlapis melalui proses difusi dapat dilihat pada Gambar 2. Mekanisme pelepasan hara dari pupuk lepas lambat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain sifat bahan pelapis, jenis pupuk lepas lambat, suhu, dan kadar air. Ketika pupuk lepas lambat menyerap air, terjadi

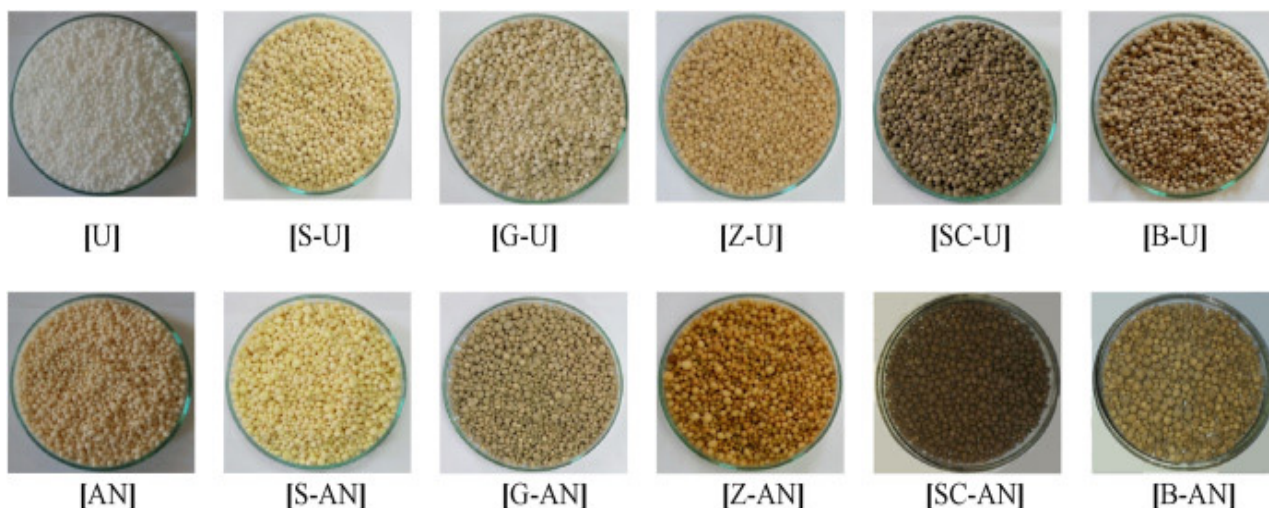
secara bertahap dan berkelanjutan (Dere et al., 2025).

3.3. Bahan Pelapis (Coating) Pupuk Lepas Lambat Nitrogen

Pelapisan pupuk dengan bahan tertentu merupakan salah satu metode untuk meningkatkan efektivitas pemupukan. Sejumlah peneliti telah menguji berbagai jenis bahan pelapis untuk pupuk lepas lambat (Yerizam et al., 2017; Salman & Suntari, 2023; Abhiram et al., 2023). Beberapa contoh urea dan amonium nitrat yang dilapisi bahan tertentu dapat dilihat pada Gambar 3. Secara umum, bahan pelapis dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu organik, anorganik, dan biopolimer.

a) Organik

Salah satu bahan organik yang digunakan sebagai pelapis pupuk adalah biochar. Biochar merupakan produk kaya karbon yang diperoleh dari biomassa melalui pemanasan dalam ruang tertutup dengan sedikit atau tanpa ketersediaan udara. Biochar dihasilkan



Gambar 2. Urea (U) dan Amonium Nitrat (AN) yang Dilapisi dengan Beberapa Bahan (S: sulfur; G: gypsum; Z: zeolit; SC: ampas sari tebu; B: ampas bit gula (El-Hassanin et al., 2024)

melalui proses dekomposisi termal pada kondisi pasokan oksigen terbatas dan suhu relatif rendah (Carvalho et al., 2022). Kualitas biochar ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain komposisi dan sifat biomassa yang digunakan. Biochar banyak dimanfaatkan sebagai bahan organik pelapis pupuk. Hasil penelitian Jia et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan biochar sebagai pelapis urea dapat meminimalkan kehilangan nitrogen, khususnya kehilangan nitrat akibat pelindian, serta meningkatkan efisiensi serapan nitrogen hingga 20 persen dibandingkan pemberian urea tanpa pelapis. Selain itu, partikel urea dapat mengisi pori-pori bagian dalam biochar sehingga pelepasan nitrogen mencapai 61,3 persen setelah 28 hari inkubasi dalam air dan 54,6 persen setelah 98 hari inkubasi dalam tanah (Liu et al., 2019). Namun demikian, penggunaan biochar sebagai pelapis pupuk lepas lambat masih menghadapi beberapa kendala, antara lain biaya yang tinggi dan teknologi produksi yang belum efisien.

b) Non-organik

Salah satu bahan anorganik yang banyak digunakan sebagai pelapis pupuk urea adalah sulfur. Pada awalnya, penggunaan sulfur sebagai pelapis pupuk dikembangkan oleh *Tennessee Valley Authority* (TVA), tetapi prosesnya cukup rumit dan memerlukan biaya yang tinggi. Kondisi ini mendorong sejumlah peneliti untuk mengembangkan

kembali proses pelapisan dengan sulfur yang telah ada sebelumnya. Penelitian Ayub et al. (2001) menyimpulkan bahwa suhu semburan dan laju aliran udara yang diatomisasi berpengaruh terhadap kualitas lapisan sulfur. Penggunaan bahan pelapis urea yang mengandung unsur hara lain juga dapat membantu mengatasi kekurangan nutrisi pada tanaman. Rehman et al. (2022) melaporkan bahwa penggunaan sulfur sebagai pelapis urea memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan urea granul, terutama dalam meningkatkan kadar klorofil a dan b. Sulfur berperan penting dalam proses fisiologis tanaman, seperti pembentukan klorofil yang mendukung produksi karbohidrat, lemak, minyak, dan senyawa lainnya.

c) Biopolimer

Biopolimer terbaru, seperti lignin, selulosa, dan pati, dapat digunakan sebagai bahan pelapis ramah lingkungan dengan biaya relatif rendah. Penelitian Zhang dan Yang (2021) menunjukkan bahwa selulosa tidak hanya memiliki daya serap & retensi air yang baik, tetapi juga mampu menyerap penghambat biokimia seperti NO_3^- , sehingga dapat mengurangi polutan. Selain itu, urea yang dilapisi biopolimer dan unsur hara makro (*potassium iodide*) terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen, mengurangi kehilangan nitrogen, serta meningkatkan hasil panen gandum (Nezami et al., 2021).

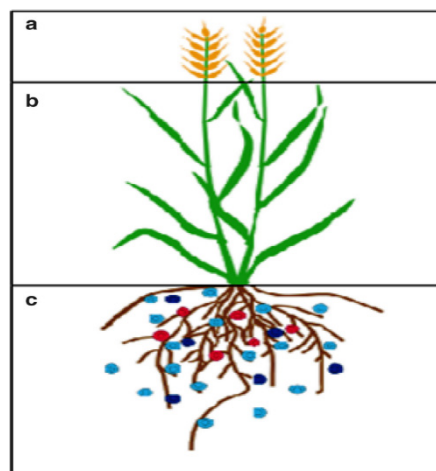
3.4. Efisiensi Penggunaan Nitrogen dan Pengaruh Pupuk Lepas Lambat pada Tanaman Padi

Nitrogen use efficiency (NUE) merupakan indikator penting dalam pengelolaan nitrogen untuk meningkatkan hasil panen. Indikator ini mencerminkan besarnya peningkatan produksi yang diperoleh untuk setiap satuan pupuk N yang diberikan. Faktor utama yang memengaruhi NUE meliputi kebutuhan tanaman, ketersediaan hara N dari pupuk maupun tanah, serta kehilangan N dalam sistem interaksi tanah–tanaman. Lebih lanjut, Gambar 3 memperlihatkan bahwa NUE bergantung pada proses fisiologis dan metabolisme, antara lain penyerapan nitrogen dari tanah, asimilasi dari akar ke bagian lain, transportasi *source–sink*, jalur pensinyalan, serta regulasi status nitrogen dalam tanaman dan pertumbuhannya (Anas et al., 2020)

Pupuk nitrogen lepas lambat banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan *nitrogen use efficiency* (NUE) pada tanaman, yang erat kaitannya dengan serapan nitrogen. Karakter morfologi dan aktivitas akar pada tanaman padi sangat memengaruhi serapan serta pemanfaatan pupuk nitrogen (Wang et al., 2022). Morfologi akar berperan penting dalam menentukan perolehan nitrogen pada tanaman padi. Karakteristik morfologi akar padi dapat digambarkan melalui parameter jumlah, berat, panjang, luas permukaan, diameter, dan sudut akar. Morfologi akar padi yang mendukung serapan nitrogen tinggi ditandai oleh akar yang panjang, volume besar, distribusi rapat, dan luas permukaan yang luas. Sementara itu, fisiologi perakaran juga sangat memengaruhi efisiensi penggunaan nitrogen, dengan indikator berupa aktivitas oksidasi akar dan luas area penyerapan.

Pupuk nitrogen lepas lambat yang dikombinasikan dengan sistem pengairan basah-kering mampu meningkatkan penyerapan dan asimilasi nitrogen tanpa menurunkan produksi biomassa maupun hasil gabah (Lee et al., 2025). Penelitian Yu et al. (2022) menunjukkan bahwa kombinasi pupuk nitrogen lepas lambat dengan urea konvensional menghasilkan NUE sebesar 27,4–96,5 persen pada tanaman padi, sekaligus meningkatkan kandungan bahan organik tanah, nitrogen total, dan nitrogen tersedia. Sementara

itu, penelitian Zheng et al. (2020) melaporkan bahwa penggunaan pupuk nitrogen lepas terkendali meningkatkan NUE sebesar 33,9 persen dan hasil gabah sebesar 12,2 persen, yang disebabkan oleh peningkatan serapan nitrogen serta penurunan kehilangan nitrogen.



Gambar 3. Bagian utama tanaman yang berperan dalam NUE (Anas et al., 2020) Akar (c) menyerap hara yang efisien, bagian batang dan daun (b) mendistribusikan hara dan asimilasi, sedangkan biji (a) sebagai penyimpan hara dan responsif terhadap pupuk

Aplikasi pupuk nitrogen lepas lambat terbukti secara signifikan meningkatkan karakteristik morfofisiologis tanaman padi. Penelitian Aasmi et al. (2022) menunjukkan bahwa pupuk nitrogen lepas lambat meningkatkan pertumbuhan, hasil gabah, dan NUE pada tanaman padi, terutama melalui peningkatan biomassa akar, distribusi akar yang lebih dalam, struktur daun yang lebih baik, serta kualitas kanopi yang lebih optimal. Meskipun nitrogen mudah menguap, pupuk nitrogen lepas lambat berpotensi mengurangi volatilitas N sehingga ketersediaannya bagi tanaman tetap terjaga. Selain itu, penggunaan pupuk nitrogen lepas lambat juga meningkatkan karakteristik fotosintesis, yang tercermin dari nilai SPAD (*soil plant analysis development*), indeks luas daun, dan laju pertumbuhan, sehingga berkontribusi pada peningkatan hasil gabah (Ma et al., 2024).

Peningkatan hasil akibat aplikasi pupuk nitrogen lepas lambat dapat mencapai 25,75 persen (Sun et al., 2023). Selain itu, penggunaan pupuk nitrogen lepas lambat mampu

menurunkan kebutuhan pupuk N hingga 20 persen (Chen et al., 2020). Aplikasi pupuk lepas lambat dengan dosis 150 kg N/ha dibandingkan pupuk konvensional dengan dosis 180 kg N/ha secara signifikan meningkatkan jumlah dan laju translokasi N dari pelepah batang pada fase berbunga ke fase pengisian gabah, efisiensi produksi biomassa, efisiensi agronomi, serta efisiensi *recovery* nitrogen (Sun et al., 2023). Temuan ini mengindikasikan bahwa pupuk lepas lambat dapat menjadi alternatif yang layak diterapkan dalam budidaya padi untuk mengurangi penggunaan pupuk N, waktu, dan tenaga kerja tanpa menurunkan hasil gabah.

IV. KESIMPULAN

Pupuk urea konvensional yang mudah larut dalam air melepaskan hara dengan laju lebih cepat dibanding kebutuhan tanaman. Kondisi ini menyebabkan sebagian pupuk hilang melalui limpasan dan pencucian dari lahan, yang pada akhirnya menimbulkan eutrofikasi dan mencemari lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan pupuk yang lebih ramah lingkungan perlu dilakukan sebagai upaya masa depan untuk meningkatkan produktivitas sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Pupuk nitrogen lepas lambat memiliki pola pelepasan nitrogen yang lebih sesuai dengan kebutuhan tanaman padi, sehingga memberikan efisiensi penggunaan nitrogen dan hasil yang lebih tinggi dibanding pupuk urea konvensional. Aplikasi pupuk lepas lambat dengan dosis 150 kg N/ha secara signifikan meningkatkan efisiensi produksi biomassa, efisiensi agronomi, dan efisiensi *recovery* nitrogen dibandingkan pupuk konvensional dengan dosis 180 kg N/ha. Dengan demikian, pupuk nitrogen lepas lambat dapat menjadi solusi terhadap keterbatasan pupuk urea konvensional sekaligus meminimalkan kehilangan nitrogen.

DAFTAR PUSTAKA

- Abhiram, G., Bishop, P., Jeyakumar, P., Grafton, M., Davies, C. E., & McCurdy, M. (2023). Formulation and characterization of polyester-lignite composite coated slow-release fertilizers. *Journal of Coatings Technology and Research*, 20(1), 307–320. <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00670-6>
- Anas, M., Liao, F., Verma, K. K., Sarwar, M. A., Mahmood, A., Chen, Z. L., Li, Q., Zeng, X. P., Liu, Y., & Li, Y. R. (2020). Fate of nitrogen in agriculture and environment: Agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. *Biological Research*, 53(47), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s40659-020-00312-4>
- Aasmi, Al. A. L., Li, J., Hamoud, Y. A., Lan, Y., Alordzinu, K. E., Appiah, S. A., Shaghaleh, H., Sheteiwy, M., Wang, H., Qiao, S., & Yu, C. (2022). Impacts of slow-release nitrogen fertilizer rates on the morpho-physiological traits, yield, and nitrogen use efficiency of rice under different water regimes. *Agriculture*, 12(86), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010086>
- Ayub, G. S. E., Rocha, S. C. S., & Perrucci, A. L. I. (2001). Analysis of the surface quality of sulphur-coated urea particles in a two-dimensional spouted bed. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 18(1), 13–22. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322001000100002>
- Beig, B., Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Hussain, A., Zia, M. H., & Mehran, M. T. (2020). Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 43(10), 1510–1533. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1744647>
- Cao, B., He, F.-Y., Xu, Q.-M., Yin, B., & Cai, G.-X. (2006). Denitrification losses and N₂O emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field. *Pedosphere*, 16(3), 390–397.
- Carvalho, J., Nascimento, L., Soares, M., Valério, N., Ribeiro, A., Faria, L., Silva, A., Pacheco, N., Araújo, J., & Vilarinho, C. (2022). Life cycle assessment (LCA) of biochar production from a circular economy perspective. *Processes*, 10(2684), 1–19. <https://doi.org/10.3390/pr10122684>
- Chen, L. H., Cheng, Z. X., Xu, M., Yang, Z. J., & Yang, L. T. (2022). Effects of nitrogen deficiency on the metabolism of organic acids and amino acids in *Oryza sativa*. *Plants*, 11(2576), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants11192576>
- Chen, Z., Wang, Q., Ma, J., Zou, P., & Jiang, L. (2020). Impact of controlled-release urea on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a single rice cropping system. *Scientific Reports*, 10, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67110-6>
- Dere, I., Gungula, D. T., Kareem, S. A., Andrew, F. P., Saddiq, A. M., Tame, V. T., Kefas, H. M., Patrick, D. O., & Joseph, J. I. (2025). Preparation of slow-release fertilizer derived from rice husk silica, hydroxypropyl methylcellulose, polyvinyl alcohol and paper composite coated urea. *Heliyon*, 11, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42036>

- Ghafoor, I., Habib-Ur-Rahman, M., Ali, M., Afzal, M., Ahmed, W., Gaiser, T., & Ghaffar, A. (2021). Slow-release nitrogen fertilizers enhance growth, yield, NUE in wheat crop and reduce nitrogen losses under an arid environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 43528–43543. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13700-4>
- Ghafoor, I., Rahman, M. H. ur, Hasnain, M. U., Ikram, R. M., Khan, M. A., Iqbal, R., Hussain, M. I., & Sabagh, A. El. (2022). Effect of slow-release nitrogenous fertilizers on dry matter accumulation, grain nutritional quality, water productivity and wheat yield under an arid environment. *Scientific Reports*, 12(14783), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18867-5>
- Guo, M., Liu, M., Zhan, F., & Wu, L. (2005). Preparation and properties of a slow-release membrane-encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(12), 4206–4211. <https://doi.org/10.1021/ie0489406>
- Hayatsu, M. (2014). A novel function of controlled-release nitrogen fertilizers. *Microbes and Environments*, 29(2), 121–122. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME2902rh>
- Huang, J., Duan, Y. H., Xu, M. G., Zhai, L. M., Zhang, X. B., Wang, B. R., Zhang, Y. Z., Gao, S. D., & Sun, N. (2017). Nitrogen mobility, ammonia volatilization, and estimated leaching loss from long-term manure incorporation in red soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(9), 2082–2092. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61498-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61498-3)
- Jadhav, N., Kachare, D., Satbhai, R., & Naik, R. (2017). Biodegradability and nitrogen use efficiency of crotonaldehyde diurea in wheat. *International Research Journal of Multidisciplinary Studies*, 3(7), 1–13. <http://www.irjms.in>
- Jahns, T., Ewen, H., & Kaltwasser, H. (2003). Biodegradability of urea-aldehyde condensation products. *Journal of Polymers and the Environment*, 11(4), 155–159.
- Jia, Y., Hu, Z., Ba, Y., & Qi, W. (2021). Application of biochar-coated urea controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(3), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00205-4>
- Jiang, Q., Du, Y., Tian, X., Wang, Q., Xiong, R., Xu, G., Yan, C., & Ding, Y. (2016). Effect of panicle nitrogen on grain filling characteristics of high-yielding rice cultivars. *European Journal of Agronomy*, 74, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.11.006>
- Konzock, O., Zaghen, S., Fu, J., & Kerkhoven, E. J. (2022). Urea is a drop-in nitrogen source alternative to ammonium sulphate in *Yarrowia lipolytica*. *iScience*, 25, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105703>
- Lee, B., Kim, M., Geem, K. R., & Sung, J. (2025). Improving nutrient use efficiency of rice under alternative wetting and drying irrigation combined with slow-release nitrogen fertilization. *Plants*, 14(1530), 1–14. <https://doi.org/10.3390/plants14101530>
- Li, Y., Huang, L., Zhang, H., Wang, M., & Liang, Z. (2017). Assessment of ammonia volatilization losses and nitrogen utilization during the rice growing season in alkaline salt-affected soils. *Sustainability*, 9(132), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su9010132>
- Li, Z., Xu, B., Du, T., Ma, Y., Tian, X., Wang, F., & Wang, W. (2021). Excessive nitrogen fertilization favors the colonization, survival, and development of *Sogatella furcifera* via bottom-up effects. *Plants*, 10(875), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants10050875>
- Liu, X., Liao, J., Song, H., Yang, Y., Guan, C., & Zhang, Z. (2019). A biochar-based route for environmentally friendly controlled release of nitrogen: Urea-loaded biochar and bentonite composite. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46065-3>
- Lu, Y., Cui, J., Bao, S., Liu, W., Geng, Y., Liang, X., Li, S., Guo, L., & Shao, X. (2025). Effects of nitrogen fertilizer application rate on lodging resistance for rice (*Oryza sativa* L.) stem. *Scientific Reports*, 15, 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85641-8>
- Ma, L., Zhang, C., Xu, R., Yang, T., Han, G., Wu, L., Wang, S., Zhang, J., Yuan, Q., & Kou, X. (2024). Slow-release nitrogen fertilizer reduces input without yield loss in a rice-crayfish integrated system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 128, 35–51. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10330-9>
- Nezami, Q., Shah, G., Hassan, Z., Niazi, M., Sadiq, M., Bran, A., Arthur, K., Iqbal, Z., Mahmood, I., Ali, N., & Rashid, M. (2021). Potassium plus biopolymer coating controls nitrogen dynamics of urea in soil and increases wheat production. *Coatings*, 11(804), 1–20.
- Pan, B., Lam, S. K., Mosier, A., Luo, Y., & Chen, D. (2016). Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.011>

- org/10.1016/j.agee.2016.08.019
- Pan, S.-G., Huang, S.-Q., Zhai, J., Wang, J.-P., Cao, C.-G., Cai, M.-L., Zhan, M., & Tang, X.-R. (2012). Effects of N management on yield and N uptake of rice in Central China. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(12), 1993–2000.
- Priya, E., Sarkar, S., & Maji, P. K. (2024). A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113211>
- Rehman, H., Asghar, M. G., Ikram, R. M., Hashim, S., Hussain, S., Irfan, M., Mubeen, K., Ali, M., Alam, M., Ali, M., Haider, I., Shakir, M., Skaliky, M., Alharbi, S. A., & Alfarraj, S. (2022). Sulphur coated urea improves morphological and yield characteristics of transplanted rice (*Oryza sativa* L.) through enhanced nitrogen uptake. *Journal of King Saud University – Science*, 34, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101664>
- Salman, M., & Suntari, R. (2023). Pemanfaatan beberapa bahan pelapis pada urea terhadap nitrogen tersedia dan sifat kimia di Vertisol Pasuruan. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 10(1), 49–56. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.010.1.5>
- Sher, A., Zhang, L. G., Noor, M. A., Nadeem, M., Ashraf, U., Baloch, S. K., Ameen, A., Yuan, X. Y., & Guo, P. Y. (2019). Nitrogen use efficiency in cereals under high plant density: Manufacturing, management strategies and future prospects. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(4), 10139–10153. https://doi.org/10.15666/aeer/1704_1013910153
- Singh, B. (2018). Are nitrogen fertilizers deleterious to soil health? *Agronomy*, 8(48), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agronomy8040048>
- Siri-Prieto, G., Bustamante, M., Battaglia, M., Ernst, O., Seleiman, M. F., & Sadeghpour, A. (2021). Effects of perennial biomass yield energy grasses and fertilization on soil characteristics and nutrient balances. *Agronomy Journal*, 113(5), 1–14. <https://doi.org/10.1002/agj2.20771>
- Sun, Y., Yuan, X., Chen, K., Wang, H., Luo, Y., Guo, C., Wang, Z., Shu, C., Yang, Y., Weng, Y., Zhou, X., Yang, Z., Chen, Z., Ma, J., & Sun, Y. (2023). Improving the yield and nitrogen use efficiency of hybrid rice through rational use of controlled-release nitrogen fertilizer and urea topdressing. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1240238>
- Trenkel, M. E. (2010). *Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture*. <http://www.fertilizer.org>
- Wang, B., Zhou, G., Guo, S., Li, X., Yuan, J., & Hu, A. (2022). Improving nitrogen use efficiency in rice for sustainable agriculture: Strategies and future perspectives. *Life*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.3390/life12101653>
- Wang, F., Chen, S., Wang, Y., Zhang, Y., Hu, C., & Liu, B. (2018). Long-term nitrogen fertilization elevates the activity and abundance of nitrifying and denitrifying microbial communities in an upland soil: Implications for nitrogen loss from intensive agricultural systems. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02424>
- Xiang, Y., Ru, X., Shi, J., Song, J., Zhao, H., Liu, Y., & Zhao, G. (2018). Granular, slow-release fertilizer from urea-formaldehyde, ammonium polyphosphate, and amorphous silica gel: A new strategy using cold extrusion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(29), 7606–7615. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02349>
- Yamamoto, C. F., Pereira, E. I., Mattoso, L. H. C., Matsunaka, T., & Ribeiro, C. (2016). Slow release fertilizers based on urea/urea-formaldehyde polymer nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 287, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.023>
- Yang, Y., Zhang, M., Li, Y. C., Fan, X., & Geng, Y. (2012). Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield. *Soil Science Society of America Journal*, 76(6), 2307–2317. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0173>
- Yerizam, M., Purnamasari, I., Hasan, A., & Junaidi, R. (2017). Modifikasi urea menjadi pupuk lepas lambat menggunakan fly ash batubara dan NaOH sebagai binder. *Jurnal Teknik Kimia*, 23(4), 226–229. <https://www.researchgate.net/publication/334049993>
- Yu, X., & Li, B. (2019). Release mechanism of a novel slow-release nitrogen fertilizer. *Particuology*, 45, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.09.005>
- Yu, Z., Shen, Z., Xu, L., Yu, J., Zhang, L., Wang, X., Yin, G., Zhang, W., Li, Y., Zuo, W., Shan, Y., Huo, Z., & Bai, Y. (2022). Effect of combined application of slow-release and conventional urea on yield and nitrogen use efficiency of rice and wheat under full straw return. *Agronomy*, 12(998), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agronomy12050998>
- Zhang, J., Tong, T., Potcho, P. M., Huang, S., Ma, L., & Tang, X. (2020). Nitrogen effects on yield, quality and physiological characteristics of giant rice. *Agronomy*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111816>
- Zhang, M., & Yang, J. (2021). Preparation and

characterization of multifunctional slow release fertilizer coated with cellulose derivatives. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 70(11), 774–781. <https://doi.org/10.1080/00914037.2020.1765352>

Zhao, C., Liu, G., Chen, Y., Jiang, Y., Dai, Q., Huo, Z., Shi, Y., Zhao, L., Liao, P., Wang, W., & Xu, K. (2022). Excessive nitrogen application leads to lower rice yield and grain quality by inhibiting the grain filling of inferior grains. *Agriculture*, 12(962), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070962>

Zheng, Y., Han, X., Li, Y., Liu, S., Ji, J., & Tong, Y. (2020). Effects of mixed controlled release nitrogen fertilizer with rice straw biochar on rice yield and nitrogen balance in Northeast China. *Scientific Reports*, 10(9452), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66300-6>

Zhou, J.-B., Xi, J.-G., Chen, Z.-J., & Li, S.-X. (2006). Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: A soil column method. *Pedosphere*, 16(2), 245–252.

BIODATA PENULIS:

Gagad Restu Pratiwi, dilahirkan di Surakarta, 21 Desember 1981. Penulis menyelesaikan S1 Program Agronomi di Universitas Slamet Riyadi Surakarta tahun 2003, S2 dan S3 pada Program Ilmu Pertanian di Universitas Gadjahmada tahun 2006 dan 2021.

Sujinah, dilahirkan di Kediri, 26 Agustus 1983. Penulis menyelesaikan S1 Program Pemuliaan Tanaman di Universitas Brawijaya tahun 2006, dan S2 Program Agronomi dan Hortikultura IPB tahun 2022.