

Biochar Coated Urea sebagai Teknologi Pemupukan dalam Meningkatkan Efisiensi Nitrogen Menuju Sistem Pertanian Berkelanjutan

Moh. Rizal^{1*}

¹Departemen Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya

Email: mohrizal@student.ub.ac.id

Abstrak

Nitrogen merupakan nutrisi penting bagi tanaman yang bersifat *mobile* sehingga mudah hilang melalui pencucian (*leaching*) dan penguapan (*volatilization*). Pengembangan teknologi pemupukan yang mampu meningkatkan efisiensi nitrogen menjadi sebuah keniscayaan dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan. Artikel ini bertujuan untuk mengetahui mekanisme dan efektivitas *Biochar Coated Urea* dalam meningkatkan efisiensi nitrogen menuju system pertanian berkelanjutan. Penelitian dilakukan dengan metode tinjauan literatur yang diambil secara elektronik melalui platform database Google Scholar, Scopus, PubMed, dan ScienceDirect menggunakan kata kunci: "*Coated Urea*", "*Nitrogen Use Efficiency*", OR "*NUE*", "*Biochar Coated Urea*". Artikel yang dihasilkan dari pencarian kemudian disaring berdasarkan kriteria inklusi yaitu artikel penelitian (bukan review), diterbitkan dalam kurun waktu 5 tahun terakhir (2020-2025), fokus pada studi efisiensi nitrogen dan pertanian berlanjut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Biochar Coated Urea* tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memungkinkan penghematan input nitrogen tanpa mengorbankan produktivitas tanaman. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pemupukan dengan *Biochar Coated Urea* menjadi strategi yang efektif dalam meningkatkan efisiensi nitrogen dan sangat menjanjikan untuk pertanian berkelanjutan.

Kata kunci: Biochar coated urea, NUE, Pertanian berkelanjutan

Abstract

Nitrogen is an essential nutrient for plants which is mobile and easily lost through leaching and volatilization. The development of fertilization technology that can increase nitrogen efficiency is needed to achieve sustainable agriculture. This article aims to determine the mechanism and effectivity of Biochar Coated Urea in increasing nitrogen efficiency toward sustainable agriculture. The study was conducted using a literature review method retrieved electronically through the Google Scholar, Scopus, PubMed, and ScienceDirect database platforms using keywords: "Coated Urea", "Nitrogen use efficiency", OR "NUE", "Biochar Coated Urea". Articles resulting from the search were then filtered based on the inclusion criteria, namely research articles (not reviews), published within the last 5 years (2020-2025), focusing on nitrogen efficiency studies and sustainable agriculture. The results of the study show that Biochar Coated Urea is not only increase nitrogen efficiency but also allows savings in nitrogen inputs without sacrificing productivity on some crop. It indicates that fertilization with Biochar Coated Urea is an effective strategy to increase nitrogen efficiency and it is very promising for sustainable agriculture.

Keywords: Biochar coated urea, NUE, Sustainable agriculture

PENDAHULUAN

Nitrogen (N) merupakan unsur hara esensial yang paling dibutuhkan dalam jumlah besar untuk memastikan produktivitas tanaman dan ketahanan pangan global. Aplikasi pupuk nitrogen, khususnya urea, menjadi praktik yang tidak terelakkan dalam sistem pertanian intensif. Namun, efisiensi penggunaan nitrogen (NUE) dari pupuk urea konvensional masih sangat rendah, umumnya berkisar antara 30-50% (Zhang *et al.*, 2015). Hal ini berarti lebih dari separuh nitrogen yang diberikan tidak dapat diserap oleh tanaman dan justru terbuang ke lingkungan.

Rendahnya NUE ini terutama disebabkan oleh sifat urea yang sangat mudah mengalami proses transformasi di dalam tanah. Setelah diaplikasikan, urea dengan cepat terhidrolisis oleh enzim urease menjadi amonium karbonat $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$, yang tidak stabil dan menyebabkan lonjakan sementara pH di sekitar butiran pupuk. Kondisi ini memicu kehilangan nitrogen dalam bentuk gas amonia (NH_3) melalui volatilisasi. Selain itu, amonium (NH_4^+) yang terbentuk akan segera dioksidasi menjadi nitrat (NO_3^-) melalui proses nitrifikasi. Nitrat bersifat sangat mobil dan mudah hilang dari zona perakaran melalui pencucian (leaching), mencemari air tanah, atau menjadi substrat bagi proses denitrifikasi yang menghasilkan gas dinitrogen oksida (N_2O), sebuah gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global 265-298 kali lebih kuat daripada CO_2 dalam skala 100 tahun (Zhang *et al.*, 2023).

Berbagai bentuk kehilangan nitrogen ini tidak hanya menyebabkan pemborosan biaya produksi bagi petani, tetapi juga menimbulkan dampak negatif yang serius terhadap lingkungan, termasuk eutrofikasi perairan, asamifikasi tanah, dan kontribusi terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pemupukan yang mampu meningkatkan NUE sekaligus memitigasi dampak lingkungan menjadi sebuah keniscayaan dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan. Salah satu teknologi yang terbukti paling prospektif adalah penggunaan *Enhanced Efficiency Fertilizers* (EEF), dengan *Coated Urea* (Urea Bersalut) sebagai primadonanya. *Coated urea* adalah pupuk urea konvensional yang dilapisi dengan material tertentu, seperti polimer, sulfur, atau bahan organik, yang berfungsi untuk mengatur dan memperlambat pelepasan unsur hara (Qi *et al.*, 2021). Mekanisme pelepasan terkendali ini bertujuan untuk menyinkronkan ketersediaan nitrogen di dalam tanah dengan dinamika serapan hara oleh tanaman, sehingga dapat meminimalkan berbagai jalur kehilangan N.

Bukti-bukti empiris dari penelitian terbaru semakin mengukuhkan efektivitas coated urea. Sebuah meta-analisis global yang menganalisis 113 studi lapangan oleh Zhang et al. (2023) menyimpulkan bahwa *polymer-coated urea* secara signifikan dapat meningkatkan hasil panen sebesar 5-10% sekaligus mengurangi emisi N₂O hingga 39% dibandingkan dengan urea konvensional. Efisiensi yang lebih tinggi juga dilaporkan oleh Lyu et al. (2015), dimana dalam penelitiannya, pelapisan 12% *coated urea* menunjukkan hasil yang terbaik untuk hasil panen. Meski pelepasan N-nya agak terlambat di fase awal, tetapi berhasil menyediakan N dalam jumlah besar tepat pada fase pembentukan malai (*heading*), yang sangat menentukan hasil gabah. Pelepasan yang sangat minim di fase pemasakan juga lebih ideal. Kombinasi ini menghasilkan sinkronisasi terbaik antara pasokan N dan kebutuhan tanaman untuk menghasilkan gabah, sehingga meningkatkan hasil panen secara signifikan. Artikel ini akan mengidentifikasi mekanisme dan efektivitas *Biocahar Coated Urea* dalam meningkatkan efisiensi nitrogen menuju system pertanian berkelanjutan.

METODE

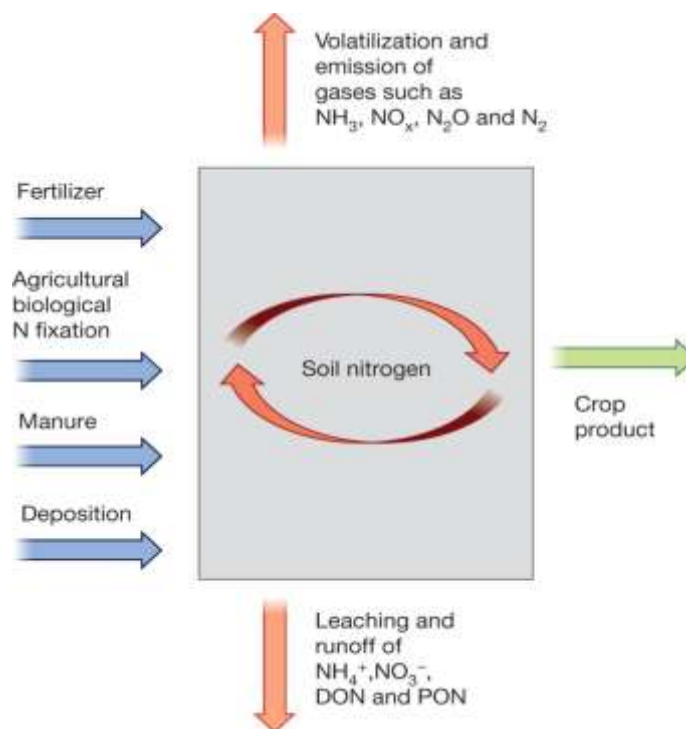
Penulisan artikel review ini dilakukan dengan metode tinjauan literatur. Literatur primer yang digunakan adalah artikel bereputasi yang dipublikasikan dalam jurnal internasional. Pencarian artikel dilakukan secara elektronik melalui platform database Google Scholar, Scopus, PubMed, dan ScienceDirect. Kombinasi kata kunci yang digunakan meliputi: "*Coated Urea*", "*Nitrogen Use Efficiency*", OR "NUE", "*Biochar Coated Urea*". Artikel yang dihasilkan dari pencarian kemudian disaring berdasarkan kriteria inklusi yaitu artikel penelitian (bukan review), diterbitkan dalam kurun waktu 5 tahun terakhir (2020-2025), fokus pada studi efisiensi nitrogen dan pertanian berlanjut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Inefisiensi dan Kehilangan Nitrogen dalam Sistem Pertanian

Penggunaan pupuk nitrogen (N) sintetis telah menjadi tulang punggung intensifikasi pertanian global, namun sebagian besar N yang diaplikasikan tidak diserap oleh tanaman, sehingga menyebabkan ineffisiensi dan polusi lingkungan. Nitrogen Surplus (N_{sur}), yaitu selisih antara input N (pupuk sintetis, pupuk kandang, fiksasi biologis, deposisi) dan output N (N yang dipanen), merupakan indikator kunci dari kehilangan N ke lingkungan (Zhang et al., 2015). Kehilangan N ini terutama terjadi melalui tiga mekanisme utama yaitu pencucian (*leaching*), volatilisasi, dan denitrifikasi (Gambar 1.).

Faktor pendorong inefisiensi ini meliputi aplikasi pupuk yang berlebihan yang melampaui kebutuhan tanaman, waktu dan penempatan aplikasi yang tidak tepat, serta kondisi manajemen air dan tanah yang tidak optimal (Cassman *et al.*, 2002). Seperti yang ditunjukkan oleh Zhang *et al.* (2015), negara-negara dengan subsidi pupuk yang tinggi, seperti China, cenderung memiliki Nsur yang sangat besar dan Efisiensi Penggunaan Nitrogen (NUE) yang rendah, karena insentif ekonomi mendorong aplikasi berlebih alih-alih adopsi praktik efisiensi. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang mekanisme kehilangan N dan faktor sosio-ekonomi yang mendasarinya sangat penting untuk merancang strategi manajemen N yang berkelanjutan. Berikut ini adalah gambaran mekanisme kehilangan N.



Zhang *et al.* (2015)

Gambar 1. Mekanisme kehilangan N

1. Pencucian (*Leaching*)

Nitrogen dalam bentuk nitrat (NO_3^-) sangat mudah larut dalam air dan dapat berpindah melampaui zona perakaran tanaman, terutama pada sistem drainase yang baik atau saat curah hujan tinggi. NO_3^- yang tercuci akan mencemari air tanah dan berkontribusi pada eutrofikasi di perairan permukaan (Galloway *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2015).

2. Volatilisasi

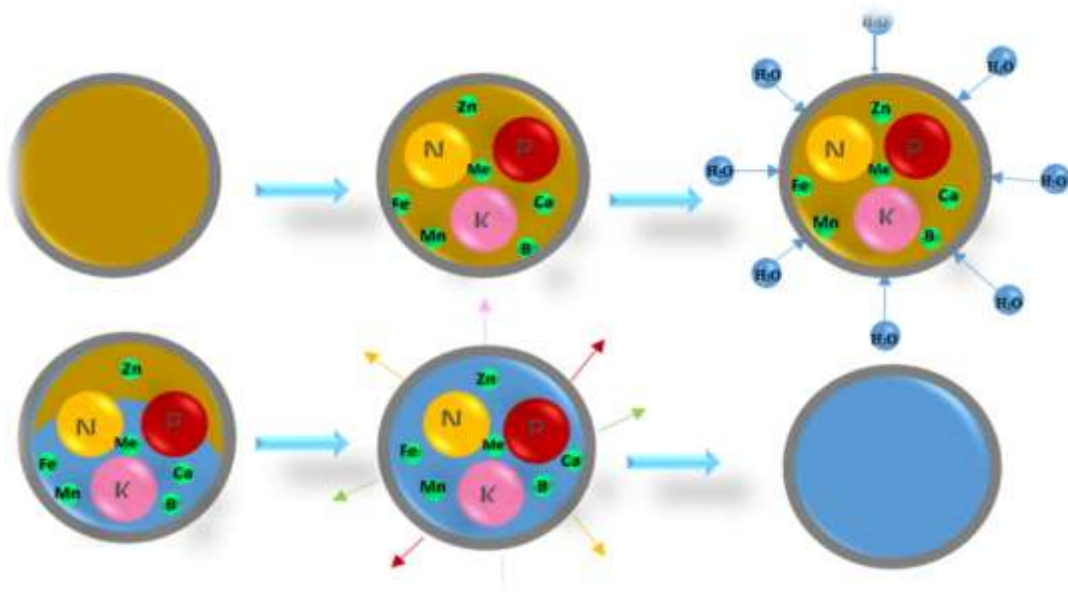
Nitrogen dalam bentuk amonia (NH_3) dapat menguap dari tanah dan tanaman ke atmosfer, terutama setelah aplikasi pupuk urea pada kondisi tanah yang lembab dan hangat dengan pH tinggi. Kehilangan ini tidak hanya mengurangi ketersediaan N bagi tanaman tetapi juga berkontribusi pada pembentukan partikel halus ($\text{PM}_{2.5}$) dan deposisi asam (Sutton *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2015).

3. Denitrifikasi dan Emisi Gas

Melalui proses denitrifikasi mikroba dalam kondisi anaerobik, nitrat (NO_3^-) diubah menjadi gas nitrogen oksida (N_2O) dan gas nitrogen (N_2). Nitrous oxide (N_2O) merupakan gas rumah kaca yang sangat poten dengan potensi pemanasan global 298 kali lipat dibandingkan CO_2 dan juga merupakan zat perusak ozon stratosfer (Ravishankara *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2015).

Pelepasan Nitrogen dari Pupuk Coated Urea

Berdasarkan artikel ulasan oleh Moradi *et al.* (2024), mekanisme pelepasan nutrisi dari Pupuk Pelepas Terkendali (*Controlled-Release Fertilizers/CRFs*) melibatkan proses fisiko-kimia yang kompleks dan dapat diprediksi. Mekanisme pelepasan nutrisi dari *Coated Urea* umumnya terjadi dalam tiga tahap utama:



Moradi *et al.* (2024)

Gambar 2. Mekanisme pelepasan nutrisi dari Coated Urea

1. Tahap Penundaan (*Lag Phase*)

Air mulai berdifusi melalui membran atau lapisan polimer yang melapisi granula pupuk. Proses ini didorong oleh perbedaan tekanan uap antara bagian dalam dan luar lapisan. Pada tahap ini, nutrisi belum dilepaskan secara signifikan karena granula belum jenuh dengan air.

2. Tahap Pelepasan Konstan (*Constant-Release Phase*)

Setelah air menembus lapisan dan melarutkan nutrisi di dalam inti pupuk, terbentuklah gradien konsentrasi antara bagian dalam dan luar granula. Nutrisi kemudian berdifusi secara perlahan melalui membran lapisan ke lingkungan sekitarnya (tanah). Pada CRFs berlapis polimer, mekanisme utama pelepasan adalah difusi, di mana laju pelepasan relatif stabil dan dapat dikendalikan oleh sifat membran. Sebaliknya, pada lapisan belerang, dapat terjadi pelepasan katastrofik (*catastrophic release*) jika lapisannya retak, yang menyebabkan pelepasan nutrisi secara tiba-tiba dan tidak terkendali.

3. Tahap Peluruhan (*Decay Phase*)

Seiring waktu, ketika sebagian besar nutrisi inti telah terlarut dan dilepaskan, konsentrasi nutrisi di dalam granula menurun. Akibatnya, gradien konsentrasi yang mendorong difusi juga melemah, sehingga laju pelepasan nutrisi semakin melambat hingga akhirnya berhenti.

Penurunan Kehilangan Nitrogen dari Pupuk Biochar Coated Urea

Aplikasi *biochar-coated urea* (BCU) terbukti efektif dalam mengendalikan kehilangan nitrogen (N) dari tanah, terutama melalui penurunan signifikan pada kehilangan N akibat pencucian (*leaching*). Mekanisme utama dari pengendalian kehilangan N ini dapat diatribusikan kepada dua aspek. Pertama, sifat pelepasan lambat (*slow-release*) dari BCU yang memperlambat pelepasan urea ke dalam tanah, sehingga mengurangi ketersediaan N yang berlebihan pada fase awal dan menyesuaikan waktu pelepasan dengan penyerapan tanaman. Kemudian sifat adsorpsi dan retensi dari biochar yang digunakan sebagai bahan pelapis, yang memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan gugus fungsi permukaan yang mampu mengadsorpsi ion NH_4^+ dan NO_3^- , sehingga mempertahankan N dalam zona perakaran dan mengurangi pencucian (Jia *et al.*, 2021; Shi *et al.*, 2020).

Studi ini menunjukkan bahwa BCU mengurangi kehilangan N total hingga 32,48–33,95% dibandingkan urea biasa, dengan penurunan pencucian NO_3^- -N sebesar 19,8–24,7% (Jia *et al.*, 2021). Namun, aplikasi BCU justru meningkatkan volatilisasi amonia

(NH₃) dibandingkan urea, karena peningkatan konsentrasi NH₄⁺-N tanah dan terbentuknya mikro-lingkungan basa di sekitar butiran BCU yang mendorong pelepasan NH₃ (Puga *et al.*, 2019). Meskipun demikian, secara keseluruhan, pengurangan kehilangan N melalui pencucian jauh lebih besar dibandingkan peningkatan volatilisasi, sehingga BCU tetap menekan total kehilangan N.

Selain itu, kombinasi BCU dengan penambahan biochar tambahan (BCU+B) terbukti lebih efektif lagi dalam mengurangi kehilangan N, meskipun dari segi biaya kurang efisien (Jia *et al.*, 2021). Dengan demikian, BCU dapat dianggap sebagai pupuk pelepasan terkendali yang menjanjikan untuk mengurangi kehilangan N, terutama melalui mekanisme pelepasan bertahap dan retensi biochar.

Peningkatan *Nitrogen Use Efficiency* (NUE) dari Pupuk Coated Urea

Berdasarkan penelitian oleh Jia *et al.* (2021), aplikasi biochar-coated urea (BCU) secara signifikan meningkatkan *Nitrogen Use Efficiency* (NUE) hingga lebih dari 20% dibandingkan dengan penggunaan urea konvensional. Peningkatan efisiensi ini dimediasi oleh beberapa mekanisme kunci. Pertama, sifat pelepasan lambat (*slow-release*) dari BCU, yang dikonfirmasi dalam studi sebelumnya oleh peneliti yang sama (Jia *et al.*, 2020), memastikan ketersediaan nitrogen (N) yang lebih tersinkronisasi dengan kebutuhan fisiologis tanaman, sehingga mengurangi kehilangan N yang tidak termanfaatkan. Kedua, BCU secara efektif mengurangi kehilangan N total, terutama melalui penurunan pencucian nitrat (NO₃⁻), yang berarti lebih banyak N dari pupuk yang dipertahankan dalam sistem tanah-tanaman dan tersedia untuk diserap akar. Ketiga, aplikasi BCU terbukti meningkatkan residu N dalam tanah, yang ditunjukkan dengan konsentrasi NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, dan N total tanah yang lebih tinggi, sehingga menyediakan cadangan N jangka panjang untuk tanaman (Zheng *et al.*, 2013). Mekanisme keempat adalah peningkatan serapan N oleh tanaman itu sendiri, yang tercermin dari konsentrasi dan jumlah serapan N pada tanaman rapeseed yang lebih tinggi pada perlakuan BCU.

Peningkatan serapan ini diduga terkait dengan ketersediaan N yang lebih konsisten dan perbaikan kondisi rizosfer oleh biochar. Senada dengan temuan ini, Liu *et al.* (2017) juga melaporkan bahwa aplikasi biochar dari jerami jagung meningkatkan NUE pada tanaman ryegrass dengan meningkatkan ketersediaan N tanah. Yang penting, penelitian Jia *et al.* (2021) lebih lanjut menunjukkan bahwa pengurangan dosis pemupukan N sebesar 20% ketika menggunakan BCU (BCU2) tidak menurunkan biomassa tanaman, namun tetap mempertahankan NUE yang tinggi (50,26%), bahkan setara dengan perlakuan urea dosis

penuh ditambah biochar (U1+B). Hal ini mengindikasikan bahwa BCU tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memungkinkan penghematan input nitrogen tanpa mengorbankan produktivitas, menjadikannya strategi yang sangat menjanjikan untuk pertanian berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Biochar Coated Urea termasuk dalam pupuk pelepas terkendali (*Controlled-Release Fertilizers/CRFs*). Mekanisme pelepasan nutrisi dari *Coated Urea* umumnya terjadi dalam tiga tahap yaitu tahap Penundaan (*Lag Phase*), Pelepasan Konstan (*Constant-Release Phase*) dan Peluruhan (*Decay Phase*). Aplikasi *Biochar Coated Urea* (BCU) mengendalikan kehilangan nitrogen (N) melalui dua mekanisme. Pertama, sifat pelepasan lambat (*slow-release*) dari BCU yang memperlambat pelepasan urea ke dalam tanah, sehingga mengurangi ketersediaan N yang berlebihan pada fase awal dan menyesuaikan waktu pelepasan dengan penyerapan tanaman. Kedua, sifat adsorpsi dan retensi dari biochar yang digunakan sebagai bahan pelapis, yang memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan gugus fungsi permukaan yang mampu mengadsorpsi ion NH_4^+ dan NO_3^- , sehingga mempertahankan N dalam zona perakaran dan mengurangi pencucian. *Biochar Coated Urea* tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memungkinkan penghematan input nitrogen tanpa mengorbankan produktivitas, menjadikannya strategi yang sangat menjanjikan untuk pertanian berkelanjutan. Teknologi ini masih perlu dikembangkan melalui penelitian lebih lanjut utamanya dalam pemilihan bahan biochar dan variasi pemanasan untuk pembuatan biochar supaya dihasilkan bahan pelapis dari biochar yang terbaik.

DAFTAR PUSTAKA

- Cassman, K. G., Dobermann, A., & Walters, D. T. (2022). *Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management*. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 132-140.
- Jia, Y., Hu, Z., Mu, J., Zhang, W., Xie, Z., & Wang, G. (2020). *Preparation of biochar as a coating material for biochar-coated urea*. *Science of the Total Environment*, 731, 139063.
- 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(1), 3.
- Liu, Z., He, T., Cao, T., Yang, T., Meng, J., & Chen, W. (2017). *Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in two distinct soils*. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(2), 515-528.

- Lyu, X., Yang, Y., Li, Y., Fan, X., Wan, Y., Geng, Y., & Zhang, M. (2015). *Polymer-coated tablet urea improved rice yield and nitrogen use efficiency*. *Agronomy Journal*, 107(5), 1837-1844.
- Moradi, S., Babapoor, A., Ghanbarlou, S., Kalashgarani, M. Y., Salahshoori, I., & Seyfaee, A. (2024). *Toward a new generation of fertilizers with the approach of controlled-release fertilizers: a review*. *Journal of Coatings Technology and Research*, 21(1), 31-54.
- Puga, A. P., Queiroz, M. C. D. A., Ligo, M. A. V., Carvalho, C. S., Pires, A. M. M., Marcatto, J. D. O. S., & Andrade, C. A. D. (2020). *Nitrogen availability and ammonia volatilization in biochar-based fertilizers*. *Archives of agronomy and soil science*, 66(7), 992-1004.
- Qi, Z., Dong, Y., He, M., Wang, M., Li, Y., & Dai, X. (2021). *Coated, stabilized enhanced-efficiency nitrogen fertilizers: Preparation and effects on maize growth and nitrogen utilization*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 792262.
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Herbert, S., & Xing, B. (2023). *Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil*. *Geoderma*, 206, 32-39.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015). *Managing nitrogen for sustainable development*. *Nature*, 528(7580), 51-59.
- Zhang, X., Lv, J., Zhang, Y., Li, S., Chen, X., & Sha, Z. (2023). *A meta-analysis study on the use of biochar to simultaneously mitigate emissions of reactive nitrogen gases (N₂O and NO) from soils*. *Sustainability*, 15(3), 2384.