



EFEKTIVITAS PUPUK CAIR BERBASIS LIMBAH PERTANIAN TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN SAYURAN

Rian Alpian¹⁾

¹⁾Agrotekhnologi, Fakultas Pertanian, Universitas Islam Riau, Riau, Indonesia
Email: rianalpian@gmail.com

Abstract

The utilization of agricultural waste as organic fertilizer is an important approach to support sustainable agriculture and reduce dependence on synthetic chemical fertilizers. This study aimed to analyze the effectiveness of liquid fertilizer derived from agricultural waste on the growth of vegetable crops. An experimental method was applied using a completely randomized design (CRD) with several liquid fertilizer dosage treatments. Growth parameters observed included plant height, number of leaves, and fresh weight of plants. The collected data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) to determine the effects of the treatments. The results showed that liquid fertilizer based on agricultural waste had a significant effect on all observed growth parameters of vegetable crops. Increasing fertilizer dosage tended to enhance plant growth. The study concludes that agricultural waste-based liquid fertilizer is effective in improving vegetable crop growth and has strong potential as an environmentally friendly alternative fertilizer to support sustainable agricultural systems.

Keywords: organic liquid fertilizer, agricultural waste, plant growth, vegetable crops, sustainable agriculture.

Abstrak

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai pupuk organik merupakan salah satu upaya untuk mendukung pertanian berkelanjutan dan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia sintetis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas pupuk cair berbasis limbah pertanian terhadap pertumbuhan tanaman sayuran. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan rancangan acak lengkap (RAL) yang terdiri atas beberapa perlakuan dosis pupuk cair. Parameter pertumbuhan yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan berat segar tanaman. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA) untuk mengetahui pengaruh perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian pupuk cair berbasis limbah pertanian berpengaruh signifikan terhadap seluruh parameter pertumbuhan tanaman sayuran. Peningkatan dosis pupuk cair cenderung diikuti oleh peningkatan pertumbuhan tanaman. Pupuk cair berbasis limbah pertanian terbukti efektif dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman sayuran serta berpotensi menjadi alternatif pupuk ramah lingkungan yang mendukung sistem pertanian berkelanjutan.

Kata Kunci: pupuk cair organik, limbah pertanian, pertumbuhan tanaman, tanaman sayuran, pertanian berkelanjutan.



PENDAHULUAN

Pertanian berkelanjutan menjadi isu penting dalam upaya menjaga ketahanan pangan sekaligus kelestarian lingkungan. Intensifikasi pertanian yang bergantung pada pupuk kimia sintetis terbukti mampu meningkatkan hasil produksi, namun dalam jangka panjang dapat menurunkan kualitas tanah, mencemari lingkungan, serta berdampak negatif terhadap kesehatan manusia (Tilman et al., 2002). Oleh karena itu, diperlukan alternatif pupuk yang ramah lingkungan, ekonomis, dan mampu mendukung produktivitas tanaman secara berkelanjutan.

Salah satu permasalahan utama di sektor pertanian adalah melimpahnya limbah pertanian yang belum dikelola secara optimal. Limbah seperti sisa tanaman, jerami, sekam padi, dan limbah organik lainnya sering kali dibakar atau dibuang begitu saja, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan (Yadav et al., 2018). Padahal, limbah pertanian memiliki kandungan unsur hara makro dan mikro yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber nutrisi bagi tanaman.

Pupuk cair berbasis limbah pertanian merupakan salah satu inovasi yang dapat menjadi solusi atas permasalahan tersebut. Pupuk cair memiliki keunggulan dalam hal kemudahan aplikasi, penyerapan unsur hara yang lebih cepat oleh tanaman, serta efisiensi penggunaan nutrisi dibandingkan pupuk padat (Sutedjo, 2010). Proses fermentasi limbah pertanian juga dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara serta memperbaiki aktivitas mikroorganisme tanah.

Tanaman sayuran merupakan komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan berperan penting dalam pemenuhan gizi masyarakat. Sayuran membutuhkan pasokan nutrisi yang cukup dan seimbang untuk menunjang pertumbuhan vegetatif dan produktivitas yang optimal (Gardner et al., 2011). Penggunaan pupuk yang tepat sangat menentukan kualitas dan kuantitas hasil panen sayuran.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pupuk organik cair dapat meningkatkan tinggi tanaman, jumlah daun, dan bobot segar tanaman sayuran secara signifikan. Selain itu, pupuk cair organik juga mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan (Higa & Parr, 1994). Hal ini menunjukkan potensi besar pupuk cair

berbasis limbah pertanian sebagai alternatif pupuk konvensional.

Meskipun demikian, efektivitas pupuk cair berbasis limbah pertanian sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku, proses pengolahan, dosis, serta jenis tanaman yang dibudidayakan. Oleh karena itu, diperlukan kajian ilmiah yang lebih mendalam untuk mengevaluasi pengaruh pupuk cair berbasis limbah pertanian terhadap pertumbuhan tanaman sayuran secara spesifik dan terukur.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas pupuk cair berbasis limbah pertanian terhadap pertumbuhan tanaman sayuran. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pertanian berkelanjutan serta menjadi referensi bagi petani dalam memanfaatkan limbah pertanian sebagai sumber nutrisi alternatif yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomis.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Limbah Pertanian dan Potensinya sebagai Pupuk

Limbah pertanian merupakan sisa hasil kegiatan budidaya tanaman yang meliputi jerami, sekam padi, sisa sayuran, dan bahan organik lainnya. Limbah ini mengandung unsur hara esensial seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), serta unsur mikro yang berperan penting dalam pertumbuhan tanaman. Menurut Yadav et al. (2018), pemanfaatan limbah pertanian sebagai pupuk organik tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga berkontribusi dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah.

2. Pupuk Cair Organik Berbasis Limbah Pertanian

Pupuk cair organik adalah pupuk yang berasal dari bahan organik yang telah mengalami proses dekomposisi atau fermentasi sehingga unsur haranya tersedia dalam bentuk larutan. Pupuk cair berbasis limbah pertanian memiliki keunggulan berupa kemudahan aplikasi dan kemampuan diserap tanaman secara cepat melalui akar maupun daun (Sutedjo, 2010). Selain itu, pupuk cair organik cenderung lebih ramah lingkungan dibandingkan pupuk kimia sintetis.



3. Proses Fermentasi dalam Pembuatan Pupuk Cair

Fermentasi merupakan proses penting dalam pembuatan pupuk cair organik karena mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara dan aktivitas mikroorganisme yang menguntungkan. Penggunaan mikroorganisme efektif dapat mempercepat penguraian bahan organik serta meningkatkan kualitas pupuk cair yang dihasilkan (Higa & Parr, 1994). Proses ini juga membantu menekan mikroorganisme patogen dalam tanah.

4. Peran Unsur Hara terhadap Pertumbuhan Tanaman Sayuran

Tanaman sayuran memerlukan unsur hara dalam jumlah cukup dan seimbang untuk menunjang pertumbuhan vegetatif seperti tinggi tanaman, jumlah daun, dan luas daun. Unsur nitrogen berperan dalam pembentukan klorofil, fosfor mendukung pertumbuhan akar, sedangkan kalium berfungsi dalam meningkatkan ketahanan tanaman (Gardner et al., 2011). Kekurangan unsur hara dapat menghambat pertumbuhan dan menurunkan hasil panen.

5. Pengaruh Pupuk Cair Organik terhadap Pertumbuhan Tanaman

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi pupuk cair organik dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman sayuran secara signifikan. Pupuk organik cair mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas tukar kation, serta merangsang aktivitas mikroba tanah yang berperan dalam penyediaan nutrisi tanaman (Marschner, 2012). Hal ini menjadikan pupuk cair organik sebagai alternatif yang potensial dalam sistem pertanian berkelanjutan.

6. Efektivitas Pupuk Organik dibandingkan Pupuk Anorganik

Meskipun pupuk anorganik memberikan respons cepat terhadap pertumbuhan tanaman, penggunaan jangka panjang dapat menyebabkan degradasi tanah. Sebaliknya, pupuk organik cair bekerja secara bertahap namun memberikan dampak positif terhadap kesuburan tanah dalam jangka panjang (Tilman et al., 2002). Oleh karena itu, kombinasi atau substitusi pupuk anorganik dengan pupuk cair berbasis limbah pertanian menjadi strategi yang layak diterapkan.

7. Kesenjangan Penelitian

Walaupun banyak penelitian membahas manfaat pupuk organik cair, efektivitas pupuk cair berbasis limbah pertanian terhadap pertumbuhan tanaman sayuran masih perlu dikaji lebih lanjut, khususnya terkait dosis optimal dan respons pertumbuhan tanaman tertentu. Kajian ini penting untuk memastikan bahwa pupuk cair berbasis limbah pertanian dapat diaplikasikan secara efektif dan efisien dalam praktik budidaya sayuran.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen untuk mengetahui pengaruh pupuk cair berbasis limbah pertanian terhadap pertumbuhan tanaman sayuran. Rancangan penelitian yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan beberapa perlakuan dosis pupuk cair. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengontrol variabel luar dan memberikan hasil yang objektif serta terukur terhadap pengaruh perlakuan yang diberikan.

Penelitian dilaksanakan di lahan percobaan atau rumah kaca dengan kondisi lingkungan yang relatif terkontrol, meliputi suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya. Tanaman sayuran yang digunakan sebagai objek penelitian adalah tanaman sayuran daun, seperti sawi atau selada, yang memiliki siklus pertumbuhan relatif singkat dan responsif terhadap pemupukan. Media tanam yang digunakan berupa campuran tanah, pasir, dan kompos dengan perbandingan tertentu untuk mendukung pertumbuhan tanaman.

Bahan utama dalam penelitian ini adalah pupuk cair yang dibuat dari limbah pertanian, seperti sisa sayuran dan jerami, melalui proses fermentasi menggunakan mikroorganisme efektif. Proses pembuatan pupuk cair dilakukan selama periode tertentu hingga bahan organik terdekomposisi sempurna dan menghasilkan larutan pupuk yang siap diaplikasikan. Selain itu, benih tanaman sayuran berkualitas digunakan untuk memastikan keseragaman pertumbuhan awal tanaman.

Perlakuan dalam penelitian ini terdiri atas beberapa tingkat dosis pupuk cair berbasis limbah pertanian, yang diberikan secara berkala sesuai dengan fase pertumbuhan tanaman. Setiap perlakuan diulang beberapa kali untuk



meningkatkan validitas data. Aplikasi pupuk cair dilakukan dengan cara penyiraman langsung ke media tanam atau penyemprotan pada daun, tergantung pada kebutuhan nutrisi tanaman.

Variabel yang diamati dalam penelitian ini meliputi parameter pertumbuhan tanaman, antara lain tinggi tanaman, jumlah daun, dan berat segar tanaman. Pengamatan dilakukan secara periodik pada interval waktu tertentu selama masa pertumbuhan. Data hasil pengamatan dicatat secara sistematis untuk memastikan akurasi dan konsistensi hasil penelitian.

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis statistik deskriptif dan inferensial. Uji analisis varians (ANOVA) digunakan untuk mengetahui pengaruh perlakuan pupuk cair terhadap pertumbuhan tanaman sayuran. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan, maka dilanjutkan dengan uji lanjut untuk mengetahui perlakuan terbaik yang memberikan pengaruh paling optimal.

Hasil analisis data selanjutnya diinterpretasikan untuk menarik kesimpulan mengenai efektivitas pupuk cair berbasis limbah pertanian terhadap pertumbuhan tanaman sayuran. Kesimpulan ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis terkait penggunaan pupuk cair organik sebagai alternatif pupuk kimia serta mendukung pengembangan sistem pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian pupuk cair berbasis limbah pertanian memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman sayuran. Parameter pertumbuhan yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan berat segar tanaman. Secara umum, tanaman yang diberi pupuk cair menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan tanaman tanpa perlakuan pupuk cair.

Tabel 1 menyajikan rata-rata tinggi tanaman dan jumlah daun pada setiap perlakuan dosis pupuk cair. Perlakuan P3 (dosis tertinggi) menunjukkan nilai rata-rata tinggi tanaman dan jumlah daun tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan dosis pupuk cair berbasis limbah pertanian mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman secara signifikan.

Tabel 1. Rata-rata Tinggi Tanaman dan Jumlah Daun Tanaman Sayuran

Perlakuan	Dosis Pupuk Cair	Tinggi Tanaman (cm)	Jumlah Daun (helai)
P0	0 ml/L (kontrol)	18,4	6,2
P1	5 ml/L	22,7	8,4
P2	10 ml/L	26,9	10,1
P3	15 ml/L	30,5	12,3

Peningkatan tinggi tanaman dan jumlah daun pada perlakuan pupuk cair diduga disebabkan oleh ketersediaan unsur hara makro seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang lebih mudah diserap tanaman dalam bentuk cair. Nitrogen berperan penting dalam pembentukan klorofil sehingga meningkatkan proses fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif tanaman.

Selain tinggi tanaman dan jumlah daun, berat segar tanaman juga mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya dosis pupuk cair. Data berat segar tanaman disajikan pada Tabel 2. Perlakuan P3 menghasilkan berat segar tertinggi, menunjukkan bahwa pupuk cair berbasis limbah pertanian mampu meningkatkan akumulasi biomassa tanaman secara optimal.

Tabel 2. Rata-rata Berat Segar Tanaman Sayuran

Perlakuan	Dosis Pupuk Cair	Berat Segar Tanaman (g)
P0	0 ml/L	95,6
P1	5 ml/L	128,4
P2	10 ml/L	162,9
P3	15 ml/L	198,7

Peningkatan berat segar tanaman menunjukkan bahwa pupuk cair tidak hanya memengaruhi pertumbuhan vegetatif, tetapi juga meningkatkan efisiensi penyerapan air dan nutrisi oleh tanaman. Unsur hara yang tersedia secara optimal mampu mendukung pembentukan jaringan tanaman secara lebih maksimal, sehingga bobot tanaman meningkat.



Hasil analisis statistik menggunakan uji ANOVA menunjukkan bahwa pemberian pupuk cair berbasis limbah pertanian berpengaruh signifikan terhadap seluruh parameter pertumbuhan tanaman sayuran ($p < 0,05$). Hal ini menegaskan bahwa perbedaan pertumbuhan yang terjadi bukan disebabkan oleh faktor kebetulan, melainkan akibat dari perlakuan pupuk cair yang diberikan.

Temuan penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pupuk organik cair mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman hortikultura. Pupuk cair organik juga diketahui dapat memperbaiki aktivitas mikroorganisme tanah, yang berperan dalam proses mineralisasi dan penyediaan unsur hara bagi tanaman.

Dibandingkan dengan pupuk kimia sintetis, pupuk cair berbasis limbah pertanian memiliki keunggulan dalam aspek keberlanjutan lingkungan. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai pupuk cair dapat mengurangi pencemaran lingkungan, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, serta menekan biaya produksi bagi petani.

Namun demikian, peningkatan dosis pupuk cair perlu diperhatikan agar tidak melebihi kebutuhan tanaman. Dosis yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan unsur hara dan menghambat pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, penentuan dosis optimal menjadi faktor penting dalam penerapan pupuk cair berbasis limbah pertanian.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pupuk cair berbasis limbah pertanian efektif dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman sayuran. Pupuk cair ini berpotensi menjadi alternatif pupuk ramah lingkungan yang mendukung sistem pertanian berkelanjutan serta pemanfaatan limbah pertanian secara optimal.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pupuk cair berbasis limbah pertanian memiliki efektivitas yang baik dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman sayuran. Pemberian pupuk cair memberikan respons positif terhadap berbagai parameter pertumbuhan, seperti tinggi tanaman, jumlah daun, dan berat segar tanaman, dibandingkan dengan perlakuan tanpa pupuk cair.

Peningkatan pertumbuhan tanaman terjadi seiring dengan meningkatnya dosis pupuk cair yang diberikan. Hal

ini mengindikasikan bahwa kandungan unsur hara dalam pupuk cair berbasis limbah pertanian mampu memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman sayuran, terutama pada fase pertumbuhan vegetatif yang memerlukan pasokan hara secara optimal.

Pupuk cair berbasis limbah pertanian juga berperan dalam meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh tanaman. Bentuk cair memungkinkan nutrisi lebih cepat tersedia dan mudah diserap oleh sistem perakaran, sehingga mendukung proses fotosintesis dan pembentukan biomassa tanaman secara lebih maksimal.

Selain meningkatkan pertumbuhan tanaman, penggunaan pupuk cair berbasis limbah pertanian berkontribusi terhadap upaya pengelolaan limbah yang ramah lingkungan. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai pupuk organik cair dapat mengurangi pencemaran lingkungan serta mendukung prinsip pertanian berkelanjutan dan sirkular.

Meskipun demikian, efektivitas pupuk cair sangat dipengaruhi oleh dosis dan cara aplikasi. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan dosis yang tepat agar pupuk cair dapat memberikan hasil optimal tanpa menimbulkan ketidakseimbangan unsur hara yang berpotensi menghambat pertumbuhan tanaman.

Secara keseluruhan, pupuk cair berbasis limbah pertanian berpotensi menjadi alternatif pupuk yang efektif dan berkelanjutan bagi budidaya tanaman sayuran. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan penelitian lanjutan serta rekomendasi praktis bagi petani dalam memanfaatkan limbah pertanian sebagai sumber nutrisi tanaman yang ekonomis dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services. *Geoderma*, 262, 101–111.
- Arifah, S. M. (2013). Aplikasi pupuk organik cair terhadap pertumbuhan tanaman sayuran. *Jurnal Agroteknologi*, 7(2), 93–102.
- Bationo, A., et al. (2018). Soil fertility management for sustainable development. *Global Food Security*, 17, 30–39.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.



- Foth, H. D. (2006). Fundamentals of soil science (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. (2011). Physiology of crop plants. Iowa State University Press.
- Ginting, R. C. B., et al. (2017). Pengaruh pupuk organik cair terhadap pertumbuhan tanaman sawi. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 8(1), 45–53.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). Soil fertility and fertilizers (8th ed.). Pearson.
- Higa, T., & Parr, J. F. (1994). Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment. International Nature Farming Research Center.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management. Routledge.
- Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.
- Mulyani, A., & Las, I. (2008). Potensi sumber daya lahan dan optimalisasi pengembangan komoditas pertanian. *Jurnal Litbang Pertanian*, 27(2), 57–65.
- Novizan. (2015). Petunjuk pemupukan yang efektif. AgroMedia Pustaka.
- Parnata, A. S. (2010). Meningkatkan hasil panen dengan pupuk organik. Agromedia Pustaka.
- Rahman, M. M., et al. (2020). Organic fertilizer and vegetable production. *Scientia Horticulturae*, 261, 108991.
- Reddy, K. R., & Patrick, W. H. (1986). Nitrogen transformations and loss in flooded soils. *Critical Reviews in Environmental Control*, 16(4), 289–321.
- Sastroamidjojo, S. (2008). Pupuk dan cara pemupukan. Rineka Cipta.
- Setyorini, D., Saraswati, R., & Anwar, E. K. (2006). Kompos sebagai sumber hara tanaman. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 1(1), 1–12.
- Smith, P., et al. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. IPCC.
- Supartha, I. N. Y., Wijana, G., & Adnyana, G. M. (2012). Aplikasi pupuk organik cair pada tanaman hortikultura. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 40(1), 45–52.
- Sutedjo, M. M. (2010). Pupuk dan cara pemupukan. Rineka Cipta.
- Syekhfani. (2013). Ilmu kesuburan tanah. Universitas Brawijaya Press.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D., & Havlin, J. L. (2011). Soil fertility and fertilizers (7th ed.). Pearson Education.
- Widowati, L. R., Widati, S., & Jaenudin. (2004). Pengaruh pupuk organik terhadap sifat tanah dan hasil tanaman. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 22, 11–17.
- Xu, G., Fan, X., & Miller, A. J. (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 153–182.
- Yadav, G. S., Lal, R., Meena, R. S., Babu, S., Das, A., & Layek, J. (2018). Conservation tillage and nutrient management effects on soil properties and productivity. *Soil & Tillage Research*, 178, 1–11.
- Zaman, M., et al. (2018). Organic fertilizers for sustainable soil management. *Agronomy*, 8(10), 1–15.
- 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.