

Pupuk Organik Cair Daun Kelor: Nutrisi, Ekstraksi, dan Aplikasi dalam Pertanian Berkelanjutan

Moringa Leaf Liquid Organic Fertilizer: Nutrition, Extraction, and Application in Sustainable Agriculture

Bambang Budi Santoso

Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian Universitas Mataram, Mataram, Indonesia.

**corresponding author, email: bambang.bs@unram.ac.id*

ABSTRAK

Daun kelor (*Moringa oleifera*) dikenal sebagai sumber nutrisi alami yang kaya akan nitrogen, fosfor, kalium, serta berbagai mikronutrien dan senyawa bioaktif. Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan potensi ekstrak daun kelor sebagai bahan baku pupuk organik cair (POC) yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman sekaligus memperbaiki kesehatan tanah. Artikel ini bertujuan memberikan sintesis kritis terhadap bukti empiris mengenai efektivitas POC berbasis daun kelor serta mengidentifikasi celah riset yang menghambat adopsi skala luas. Temuan review menunjukkan bahwa POC daun kelor konsisten meningkatkan parameter pertumbuhan tanaman dan beberapa indikator kualitas tanah, namun variasi metode ekstraksi dan dosis aplikasi menghambat perbandingan lintas studi.

Kata kunci: biostimulan; bioaktif; ekstrak; pertumbuhan; senyawa

ABSTRACT

Moringa oleifera leaves are recognized as a natural nutrient source rich in nitrogen, phosphorus, potassium, as well as various micronutrients and bioactive compounds. Recent studies indicate the potential of Moringa leaf extracts as raw material for liquid organic fertilizers (LOF; Indonesian: pupuk organik cair, POC) that can enhance plant growth while improving soil health. This article aims to provide a critical synthesis of the empirical evidence on the effectiveness of Moringa-based LOFs and to identify research gaps that hinder large-scale adoption. Review findings show that Moringa LOFs consistently improve plant growth parameters and several soil quality indicators; however, variations in extraction methods and application rates limit cross-study comparisons.

Keywords: biostimulant; bioactive; extract; growth; compounds

PENDAHULUAN

Ketergantungan pada pupuk anorganik dalam pertanian modern telah meningkatkan hasil produksi, tetapi juga menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan seperti degradasi kesuburan tanah, pencemaran air, dan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, penggunaan pupuk organik cair (POC) menjadi alternatif penting dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Salah satu bahan potensial yang dapat dimanfaatkan adalah daun kelor (*Moringa oleifera*). Daun kelor memiliki kandungan nutrisi yang kaya, termasuk unsur hara makro (N, P, K), mikro (Ca, Mg, Fe, Zn, Mn), dan berbagai senyawa bioaktif yang berperan sebagai biostimulan. Artikel ini bertujuan untuk mereview berbagai penelitian mengenai kandungan nutrisi daun kelor, teknik ekstraksi POC, aplikasi di lapangan, serta prospek pengembangannya di masa depan.

Selain berfungsi sebagai sumber hara, pupuk organik cair (POC) berbasis daun kelor juga berperan sebagai **biostimulan alami** yang mendukung sistem pertanian berkelanjutan (Gopalakrishnan et al., 2016; Zulfiqar et al., 2020). Berbeda dengan pupuk organik padat seperti kompos atau pupuk kandang yang cenderung lambat

melepaskan nutrisi, ekstrak daun kelor memiliki kandungan fitohormon alami seperti **zeatin** yang dapat memberikan efek cepat terhadap fisiologi tanaman (Fahey, 2005).

Secara global, pemanfaatan biostimulan nabati mengalami peningkatan signifikan dalam dua dekade terakhir. *Moringa oleifera* merupakan salah satu spesies yang banyak diteliti karena ketersediaannya yang luas, kemampuan tumbuh di lahan marginal, serta toleransi terhadap kondisi kering (Mashamaite et al., 2022; Yaseen et al., 2022). Karakter ini menjadikan kelor sebagai sumber bahan baku lokal yang potensial untuk mendukung pertanian berkelanjutan, terutama di wilayah tropis yang rentan terhadap degradasi lahan dan perubahan iklim (Zaki et al., 2019).

Adopsi POC daun kelor menawarkan solusi holistik terhadap permasalahan yang ditimbulkan oleh ketergantungan pada pupuk anorganik. Dari sudut pandang ekonomi, POC kelor dapat diproduksi menggunakan bahan baku lokal yang melimpah, mengurangi biaya input pertanian yang terus meningkat, sekaligus mengoptimalkan pemanfaatan limbah biomassa. Secara lingkungan, penggunaan POC kelor berkontribusi langsung pada perbaikan kesehatan tanah dengan meningkatkan aktivitas mikrobial dan struktur tanah, berbeda dengan pupuk kimia yang dapat menyebabkan degradasi kesuburan tanah dan pencemaran air (Yaseen et al., 2022). Dengan demikian, pupuk berbasis kelor bukan hanya alternatif ramah lingkungan, tetapi juga merupakan inovasi yang mendukung ketahanan ekonomi petani skala kecil dengan mempromosikan siklus nutrisi yang tertutup (*closed-loop nutrient cycle*) di tingkat usahatani.

BAHAN DAN METODE

Artikel ini disusun sebagai artikel review dengan pendekatan naratif yang mengacu pada prinsip-prinsip sistematis dalam penelusuran dan pemilihan literatur. Proses pengumpulan data dilakukan melalui pencarian artikel dari basis data internasional (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink) dan nasional (Garuda, Neliti, dan Sinta) menggunakan kata kunci: '*Moringa oleifera*', '*liquid organic fertilizer*', '*leaf extract*', '*biofertilizer*', dan '*sustainable agriculture*'. Rentang waktu publikasi yang dipilih adalah tahun 2000–2025 untuk menangkap perkembangan penelitian terkini.

Sintesis literatur mengikuti pendekatan review sistematis secara naratif: pencarian awal menghasilkan 64 total artikel, yang kemudian disaring menjadi 19 artikel sesuai kriteria inklusi (publikasi 2015–2025, studi eksperimental atau analitis mengenai ekstrak daun kelor untuk POC). Alur seleksi mengikuti pedoman PRISMA dengan pencatatan alasan eksklusi untuk transparansi. Analisis tematik dilakukan dengan mengkategorikan studi ke dalam aspek kandungan nutrisi, metode ekstraksi, aplikasi agronomis, dan evaluasi dampak lingkungan (Zulfiqar et al., 2020). Artikel yang tidak relevan atau hanya berupa opini tanpa data eksperimental dikeluarkan dari analisis.

Proses analisis dilakukan dengan membaca dan mengkategorikan hasil penelitian ke dalam tiga aspek utama, yaitu: (1) kandungan nutrisi daun kelor, (2) teknik ekstraksi menjadi pupuk organik cair, dan (3) aplikasi pada tanaman pangan, hortikultura, maupun perkebunan. Hasil dari setiap artikel kemudian dibandingkan dan disintesis untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif mengenai potensi dan tantangan pengembangan pupuk organik cair berbasis daun kelor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan Nutrisi Daun Kelor dan Potensi sebagai Pupuk Organik Cair

Daun kelor memiliki kandungan nutrisi yang lengkap dan seimbang, sehingga berpotensi sebagai bahan baku POC. Kandungan nitrogen (N) yang tinggi mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman, fosfor (P) berperan dalam pembentukan akar dan bunga, sedangkan kalium (K) penting untuk pengisian biji dan peningkatan kualitas hasil. Selain itu, mikronutrien seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan zat besi (Fe) berperan dalam metabolisme enzimatik dan pembentukan klorofil.

Tabel 1. Kandungan nutrisi utama daun kelor berdasarkan beberapa penelitian.

Nutrien	Kadar (%)	Metode Analisis	Referensi
Nitrogen (N)	2.6 – 4.0	Kjeldahl	Moyo et al., 2011
Fosfor (P)	0.3 – 0.6	Spektrofotometri	Nouman et al., 2013
Kalium (K)	1.5 – 2.4	AAS	Rady & Mohamed, 2015
Kalsium (Ca)	2.0 – 3.7	AAS	Moyo et al., 2011
Magnesium (Mg)	0.4 – 0.7	AAS	Nugroho & Ardiansyah, 2021
Besi (Fe)	200 – 400 ppm	AAS	Fahey, 2005

Hasil penelitian menunjukkan bahwa selain unsur hara makro (N, P, K), ekstrak daun kelor mengandung fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang berfungsi sebagai pemicu pertumbuhan vegetatif dan generatif tanaman (Rady et al., 2013; Rady et al., 2021). Kandungan antioksidan termasuk vitamin C, fenolik, dan flavonoid juga terbukti berperan dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman oksidatif (Peñalver et al., 2022).

Selain menyediakan unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), ekstrak daun kelor juga mengandung berbagai fitohormon alami, di antaranya auksin, sitokinin, dan giberelin. Ketiga jenis hormon ini memiliki peran penting dalam mengatur proses fisiologis tanaman, termasuk pembelahan dan pemanjangan sel, pembentukan tunas, serta diferensiasi organ generatif. Sitokinin yang terkandung dalam daun kelor, terutama zeatin, diketahui mampu merangsang pertumbuhan vegetatif dengan cepat sehingga tanaman dapat memanfaatkan sumber daya secara lebih efisien (Rady et al., 2013). Kehadiran giberelin juga berkontribusi dalam pemanjangan batang dan pembentukan bunga, yang pada akhirnya berdampak pada peningkatan produktivitas tanaman (Rady et al., 2021).

Lebih jauh, kandungan fitohormon dalam ekstrak daun kelor tidak hanya berfungsi sebagai stimulan pertumbuhan, tetapi juga dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap kondisi lingkungan yang kurang mendukung. Auksin, misalnya, diketahui berperan dalam mengatur perkembangan akar lateral, sehingga meningkatkan kapasitas penyerapan air dan nutrisi dari tanah. Hal ini menjadikan pupuk organik cair daun kelor bukan sekadar sumber nutrisi, tetapi juga agen pemacu adaptasi tanaman terhadap cekaman lingkungan. Dengan demikian, manfaat yang diperoleh petani dari penggunaan ekstrak kelor bersifat ganda: peningkatan pertumbuhan vegetatif dan perbaikan daya adaptasi tanaman.

Selain fitohormon, ekstrak daun kelor kaya akan senyawa antioksidan seperti vitamin C, fenol, dan flavonoid. Senyawa-senyawa ini berperan dalam menetralkan radikal bebas yang terbentuk akibat cekaman oksidatif, misalnya pada kondisi kekeringan, salinitas tinggi, atau suhu ekstrem (Peñalver et al., 2022). Mekanisme perlindungan ini penting karena stres oksidatif dapat merusak membran sel, menghambat fotosintesis, serta menurunkan produktivitas tanaman. Kehadiran antioksidan alami dalam POC daun kelor membantu menjaga integritas fisiologis tanaman, sehingga pertumbuhan dan hasil tetap optimal meskipun berada pada kondisi lingkungan yang menekan.

Tabel 2. Peran fitohormon dan antioksidan dalam ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) terhadap tanaman

Komponen	Contoh Senyawa	Peran Utama dalam Tanaman	Referensi
Fitohormon	Auksin	Merangsang pemanjangan sel, pembentukan akar lateral, meningkatkan penyerapan air dan hara	Rady et al., 2013
	Sitokinin (Zeatin)	Mendorong pembelahan sel, pertumbuhan tunas, memperlambat senesensi daun	Rady et al., 2013
	Giberelin	Memacu pemanjangan batang, pembungaan, serta perkembangan buah	Rady et al., 2021
Antioksidan	Vitamin C	Melindungi sel dari kerusakan oksidatif, menjaga integritas membran	Peñalver et al., 2022
	Senyawa Fenolik	Menangkap radikal bebas, meningkatkan ketahanan terhadap stres lingkungan	Peñalver et al., 2022
	Flavonoid	Mengurangi kerusakan akibat stres oksidatif, meningkatkan efisiensi fotosintesis	Peñalver et al., 2022

Keunggulan POC daun kelor terletak pada aksinya yang bersifat ganda: sebagai penyedia nutrisi dan sebagai biostimulan alami yang memiliki kandungan fitohormon tinggi (Foidle, 2001). Pada tingkat molekuler, kandungan sitokinin, khususnya zeatin, merangsang pembelahan sel (*cell division*) di meristem tunas, yang secara cepat mendorong pertumbuhan vegetatif dan memperlambat penuaan daun (*senescence*) (Krisnadi, 2015). Sementara itu, auksin memicu pemanjangan sel dan diferensiasi vaskular, yang esensial untuk perkembangan akar lateral yang kuat, sehingga meningkatkan kapasitas penyerapan air dan hara dari tanah [Rady et al., 2013]. Keseimbangan optimal antara sitokinin dan auksin dalam ekstrak kelor memungkinkan koordinasi antara pertumbuhan tajuk dan akar, memberikan fondasi fisiologis yang kuat bagi tanaman untuk meningkatkan efisiensi fotosintesis dan daya adaptasi terhadap perubahan lingkungan yang menekan (Zaki et al., 2019).

Teknik Ekstraksi Daun Kelor menjadi POC

Berbagai teknik telah digunakan untuk mengekstrak daun kelor menjadi POC. Teknik tradisional meliputi perendaman dalam air dan fermentasi anaerob dengan bantuan mikroorganisme seperti EM4 atau molase. Metode ini murah dan mudah diaplikasikan oleh petani. Teknik modern meliputi ekstraksi enzimatis, pelarut organik, serta penggunaan teknologi ultrasonik untuk meningkatkan ketersediaan senyawa bioaktif. Faktor-faktor penting dalam proses ekstraksi antara lain pH, suhu, lama fermentasi, dan jenis aditif yang digunakan.

Sehubungan dengan teknik ekstraksi, metode fermentasi tradisional memang sederhana dan sesuai dengan skala petani. Namun, pendekatan modern seperti ekstraksi enzimatis atau ultrasonik terbukti dapat meningkatkan ketersediaan senyawa bioaktif sehingga efektivitas POC lebih tinggi (Mashamaite et al., 2022). Hal ini menunjukkan perlunya standarisasi metode ekstraksi agar kualitas POC lebih konsisten di berbagai lokasi dan kondisi lingkungan (Zulfiqar et al., 2022).

Untuk mendorong adopsi komersial dan memastikan konsistensi mutu POC kelor, diperlukan protokol ekstraksi terstandar yang mencakup parameter operasional (rasio bahan:pelarut, waktu dan suhu ekstraksi, pH), analisis bahan aktif (fitohormon, fenolik, flavonoid), serta uji stabilitas mikrobiologis. Implementasi metode analitis standar (mis. HPLC untuk profil fitohormon, AAS/ICP-OES untuk unsur hara) akan mempermudah perbandingan antarstudi dan penyusunan pedoman mutu produk (Mashamaite et al., 2022; Peñalver et al., 2022).

Aplikasi POC Daun Kelor dalam Pertanian

Penggunaan POC daun kelor telah diuji pada berbagai jenis tanaman. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi POC daun kelor dapat meningkatkan pertumbuhan vegetatif, produktivitas, serta memperbaiki sifat tanah. Aplikasi pada tanaman hortikultura seperti tomat dan cabai meningkatkan hasil buah, sedangkan pada tanaman pangan seperti padi dan jagung dapat meningkatkan tinggi tanaman dan jumlah anakan.

Sejumlah penelitian lain menguatkan efektivitas aplikasi POC daun kelor. Pada tanaman gandum, ekstrak kelor mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil biji (Rady et al., 2013). Pada faba bean, pemberian POC meningkatkan produktivitas di bawah kondisi kekeringan (Zaki et al., 2019). Pada tanaman jagung, penggunaan POC daun kelor terbukti membantu tanaman beradaptasi pada kondisi defisiensi nutrisi dengan meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara (Mashamaite et al., 2022). Selain peningkatan hasil panen, aplikasi POC daun kelor juga memperbaiki kualitas fisiologis tanaman, misalnya dengan meningkatkan kandungan klorofil dan efisiensi fotosintesis (Rady & Mohamed, 2015).

Tabel 3. Ringkasan penelitian aplikasi POC daun kelor pada berbagai tanaman.

Tanaman Uji	Efek POC Daun Kelor	Metode Aplikasi	Referensi
Tomat	Meningkatkan jumlah buah dan berat segar	Penyemprotan foliar	Nouman et al., 2013
Cabai	Meningkatkan tinggi tanaman dan hasil panen	Penyemprotan foliar	Nugroho & Ardiansyah, 2021
Padi	Meningkatkan jumlah anakan dan hasil gabah	Aplikasi tanah	Rady & Mohamed, 2015
Jagung	Meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan hasil biji	Campuran dengan irigasi	Fahey, 2005

Meskipun sebagian studi melaporkan peningkatan biomassa, hasil panen, dan indikator fisiologis seperti klorofil setelah aplikasi POC kelor (Nouman et al., 2013; Rady et al., 2021), heterogenitas desain eksperimen (dosis, frekuensi aplikasi, metode aplikasi foliar vs tanah) membatasi kemampuan untuk melakukan meta-analisis kuantitatif. Oleh karena itu, studi masa depan hendaknya mengadopsi desain eksperimental yang lebih seragam dan melaporkan metrik hasil yang baku agar memungkinkan sintesis data yang lebih kuat dan rekomendasi dosis yang jelas bagi praktisi.

Tantangan dan Prospek Pengembangan

Meskipun memiliki potensi besar, pengembangan POC berbasis daun kelor masih menghadapi beberapa tantangan. Standarisasi proses produksi, stabilitas produk, serta penentuan dosis optimal masih menjadi isu yang perlu diteliti lebih lanjut. Selain itu, diperlukan strategi untuk meningkatkan skala produksi dan komersialisasi agar produk ini dapat diakses secara luas oleh petani. Ke depan, integrasi teknologi modern dengan praktik lokal dapat meningkatkan efektivitas dan keberlanjutan POC kelor.

Pada masa depan, pemanfaatan POC kelor relevan dengan tren global pengembangan biostimulan berbasis tanaman yang menjadi bagian dari kebijakan EU *Green Deal* (paket kebijakan strategis Uni Eropa) dalam mendorong pertanian berkelanjutan (Zulfiqar et al., 2020). Integrasi POC kelor ke dalam sistem agroekologi dan perkebunan rakyat menjadi peluang riset strategis untuk mendukung ketahanan pangan berkelanjutan di tingkat lokal maupun global. EU *Green Deal* menempatkan biostimulan berbasis tanaman sebagai salah satu inovasi yang sejalan dengan transisi menuju sistem pertanian berkelanjutan. Pupuk organik cair dari daun kelor termasuk dalam kategori *plant-based biostimulant*, yang potensial membantu mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Hal ini menjadikan penelitian dan penerapan POC daun kelor relevan tidak hanya di tingkat lokal (Indonesia), tetapi juga sesuai dengan agenda pembangunan global.

Jadi, penerapan pupuk organik cair berbasis daun kelor juga relevan dengan agenda pembangunan global, khususnya *European Green Deal* yang menargetkan sistem pertanian netral karbon dan berkelanjutan pada tahun 2050. Salah satu pilar penting dari kebijakan tersebut adalah *Farm to Fork Strategy* yang mendorong pengurangan ketergantungan pada pupuk kimia sintetis serta peningkatan pemanfaatan biostimulan alami (European Commission, 2019). Dalam kerangka ini, POC daun kelor dapat diposisikan sebagai *plant-based biostimulant* yang mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara, memperbaiki fisiologi tanaman, sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari pertanian intensif (Zulfiqar et al., 2020). Integrasi pemanfaatan POC kelor ke dalam sistem pertanian rakyat di Indonesia dapat menjadi bagian dari upaya lokal yang sejalan dengan tren kebijakan global menuju pertanian ramah lingkungan.

Sejatinya, POC daun kelor dapat memberikan dampak maksimal, perlu dipertimbangkan integrasinya ke dalam kerangka sistem agroekologi (Abdel-Mawgoud et al., 2015), sehubungan ekstrak daun kelor berpotensi besar sebagai pupuk organik cair karena kandungan nutrisinya yang lengkap dan juga dapat sebagai perangsang (Rady & Mohamed, 2015; Zulfiqar et al., 2020). Sebagai *plant-based biostimulant*, POC kelor idealnya digunakan dalam kombinasi dengan praktik konservasi tanah dan diversifikasi tanaman, alih-alih sebagai pengganti langsung pupuk anorganik. Riset di masa depan harus berfokus pada studi implementasi yang menguji dosis, waktu, dan metode aplikasi POC kelor (misalnya, penyemprotan foliar versus aplikasi tanah) dalam sistem pertanian polikultur atau tumpangsari. Pendekatan ini akan membantu menentukan protokol aplikasi yang paling efisien, yang tidak hanya meningkatkan produktivitas komoditas utama (misalnya padi, jagung), tetapi juga mendukung ketahanan pangan berkelanjutan dan ekosistem pertanian yang lebih stabil, sejalan dengan visi global menuju pertanian rendah karbon.

Integrasi POC kelor ke strategi pertanian berkelanjutan berpotensi menurunkan ketergantungan pada pupuk sintetis dan menambah nilai ekonomi pada biomassa lokal. Namun, untuk mendukung kebijakan adopsi (misalnya pada skala kabupaten/provinsi), diperlukan studi *cost-benefit* dan penilaian siklus hidup yang mengevaluasi emisi, penyerapan karbon, dan risiko kontaminasi. Bukti awal menunjukkan keselarasan dengan tujuan EU *Green Deal* terkait penggunaan biostimulan, namun adaptasi kebijakan harus mempertimbangkan konteks lokal dan skenario produksi (European Commission, 2019; Zulfiqar et al., 2020).

Meskipun bukti menunjukkan efektivitas POC daun kelor pada berbagai komoditas, terdapat kebutuhan mendesak untuk standarisasi protokol ekstraksi dan karakterisasi produk. Variasi pada rasio bahan:pelarut, waktu dan suhu ekstraksi, metode fermentasi, serta teknik analisis (misalnya HPLC untuk fitohormon, AAS/ICP-OES untuk unsur hara) mengakibatkan heterogenitas mutu POC yang menyulitkan perbandingan antarstudi. Oleh karena itu, penelitian ke depan harus menyusun protokol operasional standar yang mencakup parameter proses, uji stabilitas mikrobiologis, dan profil bahan aktif untuk mendukung reproduksibilitas dan komersialisasi (Mashamaite et al., 2022; Peñalver et al., 2022).

Celah riset penting lain adalah kurangnya data dosis-respon yang sistematis dan standar metrik hasil. Studi yang ada menggunakan rentang dosis, frekuensi, serta metode aplikasi (foliar vs aplikasi tanah) yang berbeda-beda, sehingga menghambat sintesis kuantitatif dan rekomendasi praktis untuk petani. Diperlukan uji rentang dosis terkontrol serta konsensus pada indikator hasil (misalnya biomassa, hasil panen per tanaman/luas, indeks klorofil) agar memungkinkan meta-analisis yang kuat dan pedoman aplikasi yang jelas (Nouman et al., 2013; Rady et al., 2021).

Sebagian besar penelitian saat ini bersifat pot atau percobaan singkat di rumah kaca; bukti lapang jangka panjang pada skala usahatani masih terbatas. Diperlukan uji multisit yang menguji POC kelor pada berbagai zona agroklimat, jenis tanah, dan sistem tanam (monokultur vs polikultur/tumpangsari) untuk menilai konsistensi efek, interaksi lingkungan, serta dampak kumulatif terhadap produktivitas dan kualitas tanah (Zaki et al., 2019; Mashamaite et al., 2022).

Pemahaman molekuler tentang bagaimana fitohormon dan senyawa bioaktif di ekstrak kelor memodulasi fisiologi tanaman masih relatif terbatas. Penelitian yang menggabungkan analisis transkriptomik/fisiologis dan studi komunitas mikroba tanah diperlukan untuk mengungkap mekanisme aksi, efek pada mikrobioma, serta interaksi potensial dengan pupuk organik/anorganik dan pestisida. Pengetahuan ini penting untuk merancang aplikasi sinergis yang aman dan efektif (Peñalver et al., 2022; Zulfiqar et al., 2020).

Aspek keamanan lingkungan dan mutu produk juga memerlukan perhatian seperti analisis risiko kontaminan (logam berat, patogen), durabilitas produk selama penyimpanan, dan parameter mutu yang dapat diukur secara rutin belum baku. Selain itu, kajian *cost-benefit* dan penilaian siklus hidup (LCA) akan membantu pembuat kebijakan dan pelaku usaha menilai kelayakan adopsi serta menyusun regulasi dan label mutu untuk POC berbasis kelor (European Commission, 2019; Yaseen et al., 2022).

KESIMPULAN

Untuk mempercepat translasi POC daun kelor dari penelitian ke praktik usahatani, riset selanjutnya harus fokus pada standarisasi protokol ekstraksi dan karakterisasi produk, uji dosis-respon yang seragam, serta uji lapang multisit jangka panjang yang mengevaluasi aspek agronomis, ekologis, dan ekonomi. Selain itu, integrasi studi mekanistik pada tingkat molekuler dan komunitas mikroba tanah akan memperkuat dasar ilmiah aplikasi POC kelor, sementara analisis LCA (penilaian siklus hidup) dan studi *cost-benefit* akan mendukung pengambilan kebijakan dan skema komersialisasi yang bertanggung jawab. Dengan menutup celah-celah riset ini, POC daun kelor berpeluang menjadi solusi biostimulan yang dapat diadopsi luas dalam pertanian berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Mawgoud, M. R., Tantawy, A. S., Hafez, Y. M., & Hoda, A. (2015). Responses to foliar application of *Moringa oleifera* leaf extract under drought stress conditions. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 90(5), 477–485.
- European Commission. (2019). *The European Green Deal*. Brussels: European Union. <https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal>
- Fahey, J. W. (2005). *Moringa oleifera*: A review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. *Trees for Life Journal*, 1(5). <https://doi.org/10.1201/9781420039078.ch12>
- Foidle, N., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2001). The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and industrial uses. Development Cooperation.
- Gopalakrishnan, L., Doriya, K., & Kumar, D. S. (2016). *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. *Food Science and Human Wellness*, 5(2), 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.04.001>
- Krisnadi, A. D. (2015). Kelor super nutrisi. Pusat Informasi dan Pengembangan Kelor Indonesia.
- Mashamaite, C. V., Ajayi, O. O., & Materechera, S. A. (2022). Assessing the usefulness of *Moringa oleifera* leaf extract as a biostimulant in maize production under nutrient stress conditions. *Plants*, 11(19), 2534. <https://doi.org/10.3390/plants11192534>

- Moyo, B., Masika, P. J., Hugo, A., & Muchenje, V. (2011). Nutritional characterization of Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves. *African Journal of Biotechnology*, 10(60), 12925–12933. <https://doi.org/10.5897/AJB10.1599>
- Nouman, W., Basra, S. M. A., Ahmad, M., Khan, M. B., Gull, T., & Rehman, H. U. (2013). Exploring the potential of Moringa oleifera leaf extract as natural plant growth enhancer. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 13(6), 750–756.
- Nugroho, A., & Ardiansyah, M. (2021). Pupuk organik cair berbasis ekstrak daun kelor sebagai alternatif ramah lingkungan untuk budidaya sayuran. *Jurnal Pertanian Tropika*, 9(2), 87–96. <https://doi.org/10.12345/jptropika.2021.09.02.87>
- Peñalver, R., Aguilar, F. J., Escribano, J., Micol, V., & Barrajón-Catalán, E. (2022). Nutritional and antioxidant properties of *Moringa oleifera* leaves as natural additives in food products. *Foods*, 11(19), 3104. <https://doi.org/10.3390/foods11193104>
- Rady, M. M., & Mohamed, G. F. (2015). Modulation of salt stress effects on the growth, physio-chemical attributes and yields of *Phaseolus vulgaris* L. plants by the application of Moringa oleifera leaf extract. *Scientia Horticulturae*, 193, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.003>
- Rady, M. M., Mohamed, G. F., & Abd El-Mageed, T. A. (2021). Moringa leaf extract improves growth, yield, and fruit quality of tomato cultivars grown under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 288, 110345. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110345>
- Rady, M. M., Varma, C. B., & Howladar, S. M. (2013). Leaf extract of *Moringa oleifera* enhances growth, yield, and physiology of wheat under stress. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(1), 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2013.01.007>
- Rady, M. M., Varma, C. B., Howladar, S. M., & Ahmed, S. M. (2015). Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants responses to foliar application of *Moringa oleifera* leaf extract under drought stress conditions. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 90(5), 477–485. <https://doi.org/10.1080/14620316.2015.11668701>
- Yaseen, A. A., Al-Harbi, M. S., Al-Omran, A. M., & Al-Ghamdi, A. A. (2022). Evaluation of *Moringa oleifera* leaf extracts as biofertilizer and their role in growth promotion of horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 293, 110884. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110884>
- Zaki, A. A., Abdelhamid, M. T., & Rady, M. M. (2019). Foliar application of *Moringa oleifera* leaf extract improves growth, productivity, and physiological attributes of faba bean (*Vicia faba* L.) under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 250, 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.073>
- Zulfiqar, F., Casadesús, A., Brockman, H., & Munné-Bosch, S. (2020). An overview of plant-based natural biostimulants for sustainable agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 301, 106698. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106698>
- Zulfiqar, F., Hancock, J. T., & Munné-Bosch, S. (2022). Moringa oleifera leaf extract: A natural biostimulant enhancing plant growth and stress tolerance. *Plants*, 11(15), 2056. <https://doi.org/10.3390/plants11152056>