

INTEGRASI AGEN BIOLOGIS DAN TEKNOLOGI DIGITAL DALAM SMART INTEGRATED PEST MANAGEMENT (SMART-IPM)

Erik Surahmat¹

¹Program Studi Biologi, Universitas Terbuka, Tangerang Selatan, Indonesia

*Erik Surahmat: e121ksoe@gmail.com

ABSTRAK

Sistem *Smart Integrated Pest Management (Smart-IPM)* menggabungkan agen pengendali biologis dengan teknologi digital modern untuk meningkatkan efektivitas pengendalian hama dan keberlanjutan pertanian. Teknologi seperti sensor IoT, citra *drone*, *deep learning*, dan kecerdasan buatan memungkinkan pemantauan real time, deteksi otomatis, serta pengambilan keputusan berbasis data. Sementara itu, agen biologis seperti *Bacillus thuringiensis*, *Trichoderma spp.*, dan *Bee Vectoring Technology (BVT)* menunjukkan potensi besar sebagai alternatif ramah lingkungan terhadap pestisida kimia. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa Smart-IPM mampu mengurangi penggunaan pestisida hingga 50%, meningkatkan akurasi deteksi hama di atas 82%, dan memberikan keuntungan ekonomi bagi petani, terutama skala kecil. Meskipun demikian, implementasi Smart-IPM masih menghadapi kendala berupa keterbatasan akses teknologi, infrastruktur digital, dan kesenjangan pengetahuan petani. Dukungan kebijakan, penguatan kapasitas pengguna, serta penelitian lanjutan diperlukan untuk memaksimalkan adopsinya pada berbagai agroekosistem.

Kata kunci: *Smart-IPM*, Teknologi Digital, Agen Biologis, IoT, Kecerdasan Buatan, Pertanian Presisi

1 PENDAHULUAN

Pertanian global menghadapi tantangan serius dari kerugian panen akibat hama, mencapai sekitar 30-40% penurunan produktivitas pertanian tahunan. Metode pengendalian hama konvensional yang bergantung pada pestisida kimia menunjukkan efektivitas jangka panjang yang terbatas dan dikaitkan dengan risiko signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan (Kariyanna & Sowjanya, 2024). Kerugian ekonomi secara global akibat hama dan penyakit mencapai sekitar 220 miliar USD per tahun, dengan dampak yang sangat merugikan pada tanaman pangan pokok (Izuafa *et al.*, 2025).

Paradigma *Smart Integrated Pest Management (Smart-IPM)* mewakili pendekatan transformatif yang mengintegrasikan agen kontrol biologis dengan teknologi digital canggih (Ullah *et al.*, 2025). Integrasi ini memungkinkan mekanisme pengiriman tertarget yang memastikan bahan aktif mencapai habitat hama spesifik sambil meminimalkan paparan terhadap organisme bermanfaat (Izuafa *et al.*, 2025). Agen biologis seperti *Bacillus thuringiensis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma harzianum*, dan penyerbuk terkelola menyediakan mekanisme pengendalian berbasis alam, sementara teknologi digital termasuk kecerdasan buatan, sensor Internet of Things (IoT), dan algoritma pembelajaran mesin memungkinkan pemantauan hama *real time* dan dukungan keputusan prediktif (Dimkić *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2023; Shafik, 2025).

Inovasi dalam teknologi pertanian semakin menekankan konvergensi solusi berbasis alam dengan infrastruktur digital terkini (Xu *et al.*, 2024). Integrasi ini mengatasi tiga dimensi kritis yaitu keberlanjutan ekologis dengan mengurangi ketergantungan kimia, kemajuan teknologi yang memungkinkan intervensi presisi, dan viabilitas ekonomi melalui alokasi sumber daya optimal dan peningkatan hasil panen (Konfo *et al.*, 2024).

Meskipun konsep Smart Integrated Pest Management (Smart-IPM) telah banyak dibahas dalam literatur, penelitian yang ada masih cenderung mengevaluasi agen biologis dan teknologi digital secara terpisah, sehingga keterkaitan langsung antara mekanisme biologis pengendalian hama di tingkat lapangan dan sistem digital adaptif berbasis kecerdasan buatan, sensor Internet of Things (IoT), serta model prediktif real-time belum sepenuhnya terjelaskan. Keterbatasan ini juga tercermin pada minimnya bukti kuantitatif yang terintegrasi mengenai efisiensi alokasi sumber daya dan manfaat ekonomi dari penerapan Smart-IPM sebagai satu sistem utuh, yang pada akhirnya menghambat adopsi berbasis bukti oleh praktisi dan pembuat kebijakan. Oleh karena itu, penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui sintesis komprehensif yang memposisikan Smart-IPM sebagai kerangka terpadu, dengan menyoroti konvergensi agen pengendali hayati berbasis alam dan teknologi digital cerdas untuk menghasilkan efek sinergis dalam meningkatkan presisi dan efikasi pengendalian hama, mengurangi dampak ekologis, serta memperkuat kelayakan ekonomi pertanian. Secara khusus, studi ini bertujuan untuk mensintesis perkembangan terkini sistem Smart-IPM, menganalisis kontribusi sinergis agen biologis dan teknologi digital terhadap pengendalian hama yang presisi dan berkelanjutan, serta mengevaluasi potensi manfaat ekonominya melalui peningkatan hasil panen, efisiensi input, dan pengurangan ketergantungan pada pestisida kimia, sehingga memberikan landasan konseptual dan praktis bagi implementasi Smart-IPM berbasis teknologi dalam pertanian modern.

2 METODE

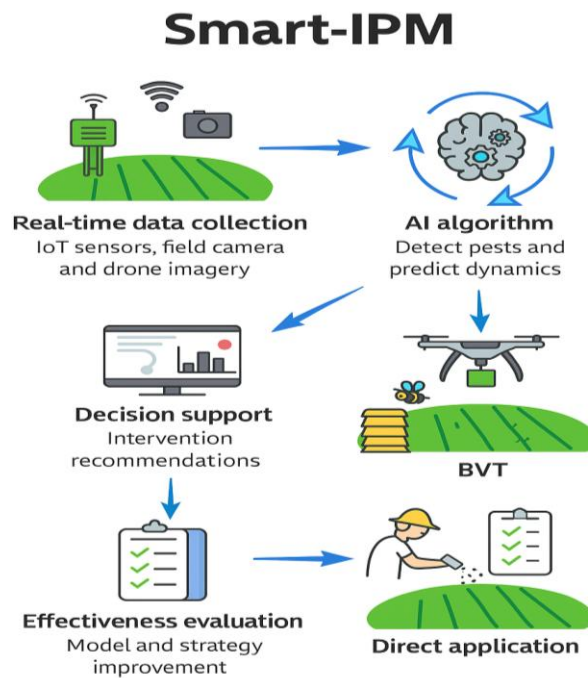
Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis dengan menelusuri artikel pada *ScienceDirect*, *Google Scholar*, *PubMed*, dan sumber terpercaya lainnya menggunakan kata kunci “*biological control*”, “*Smart-IPM*”, “*digital agriculture*”, “*precision agriculture*”, dan “*AI pest detection*”. Seleksi dilakukan berdasarkan rentang tahun 2020–2025, Publikasi yang dipilih difokuskan pada temuan-temuan terkini untuk mencerminkan kondisi terkini pengetahuan ilmiah (Alifiyah *et al.*, 2025).

Kriteria inklusi meliputi artikel ilmiah yang membahas penggunaan agen biologis, integrasi teknologi digital dalam monitoring atau pengendalian hama, studi yang dilakukan pada konteks pertanian. Kriteria eksklusi meliputi artikel yang hanya membahas pestisida kimia, publikasi non-ilmiah, artikel yang tidak menyinggung IPM atau Smart-IPM, artikel duplikat.

Seleksi dilakukan melalui tiga tahap yaitu identifikasi artikel dari ketiga database, penyaringan melalui pembacaan judul dan abstrak, serta evaluasi kelayakan melalui pembacaan penuh untuk memastikan artikel memenuhi kriteria. Sebanyak 52 artikel berhasil diidentifikasi, dan 15 artikel lolos proses seleksi akhir untuk dianalisis dan disintesis berdasarkan tema

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Integrasi agen biologis dan teknologi digital dalam *Smart-IPM* menunjukkan peningkatan performa yang konsisten dalam efektivitas pengendalian hama, stabilitas ekosistem, dan efisiensi penggunaan sumber daya. Bukti empiris menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu mengurangi ketergantungan pada input kimia sekaligus meningkatkan ketepatan intervensi lapangan (Dara, 2019). *Smart-IPM* bekerja melalui sinergi antara *biological control agents* dan teknologi monitoring presisi sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan secara tepat waktu dan sesuai kebutuhan biologis tanaman (Konfo *et al.*, 2024; Shukla *et al.*, 2025).



Gambar 1. Diagram Alur Smart-IPM

Sistem *Smart-IPM* dimulai dari pengumpulan data lapangan secara *real time* melalui sensor IoT, kamera lapangan, dan citra *drone*. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan algoritma kecerdasan buatan untuk mendeteksi hama dan memprediksi dinamika populasinya. Hasil analisis menjadi dasar rekomendasi intervensi pada *modul decision support system*. Aplikasi agen biologis dilakukan secara presisi melalui *Bee Vectoring Technology* (BVT), *drone*, atau metode langsung. Proses diakhiri dengan evaluasi efektivitas, yang kemudian memberikan umpan balik untuk memperbaiki model AI dan strategi pengendalian berikutnya.

3.1 Deteksi dan Monitoring Hama Berbasis AI dan Deep Learning

Teknologi *artificial intelligence* (AI) merupakan komponen kritis dalam *Smart-IPM*. Teknologi ini memungkinkan deteksi hama otomatis dengan akurasi tinggi. Sistem berbasis *deep learning* seperti *DenseNet*, *Inception V3*, *EfficientNet*, *YOLO*, dan *Faster R-CNN* mampu mengidentifikasi hama pada berbagai tahap pertumbuhan tanaman dengan akurasi di atas 82% (Ray *et al.*, 2025). Studi yang dilakukan Mehzabeen & Gayathri (2025) melaporkan adanya tingkat akurasi 88,83% dalam klasifikasi 10 jenis hama tomat menggunakan *DenseNet169*. Pattnaik *et al.*, (2020) menambahkan penggunaan *EfficientNet B4* menghasilkan akurasi pelatihan 96,32% dalam dataset 102 kelas hama. Pendekatan dengan *weighted ensemble* juga meningkatkan stabilitas prediksi serta menurunkan *false positive*, menjadikannya lebih siap untuk implementasi lapangan (Dinca *et al.*, 2024). Teknologi berbasis AI ini terbukti dapat meningkatkan responsivitas pengendalian hama, karena data visual dari *drone*, sensor IoT, dan kamera lapangan dapat dianalisis secara *real time*. Dengan demikian, keputusan terkait pelepasan agen biologis dapat dirumuskan secara lebih presisi dibandingkan metode manual yang bersifat subjektif dan lambat (Ahmed *et al.*, 2024; Nyakuri *et al.*, 2025).

3.2 Optimalisasi Agen Biologis melalui Teknologi Presisi

Agen biologis seperti *Bacillus thuringiensis*, *Trichoderma spp.*, atau *Pseudomonas fluorescens* menunjukkan efektivitas tinggi dalam menekan populasi hama dan patogen tanaman. Pada sistem *Smart-IPM*, agen biologis ini tidak hanya digunakan sebagai substitusi pestisida kimia, tetapi diintegrasikan dengan teknologi digital untuk menentukan waktu, lokasi,

dan dosis aplikasi yang optimal (Dimkić *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2023). IoT dapat memantau tingkat kelembaban, suhu, intensitas cahaya, serta aktivitas hama yang menjadi indikator kapan agen hayati harus diaplikasikan. Data ini kemudian diolah oleh sistem berbasis AI untuk menghasilkan rekomendasi aplikasi presisi (Nyakuri *et al.*, 2025; Wei *et al.*, 2025). Teknologi penyemprotan berbasis *drone* dalam penelitian Nyakuri *et al.*, (2025) telah terbukti meningkatkan homogenitas distribusi agen biologis dan menurunkan biaya aplikasi di lahan luas. Integrasi ini memastikan bahwa agen hayati tetap aktif dan mencapai target biologis secara efisien (Zhou *et al.*, 2024).

3.3 Bee Vectoring Technology (BVT) sebagai Sistem Pengiriman Biologis Alami

Bee Vectoring Technology (BVT) merupakan inovasi berbasis alam yang memanfaatkan penyerbuk terkelola sebagai *carrier agent antagonis* seperti *Clonostachys rosea* CR-7 dan *Aureobasidium pullulans*. Teknologi ini efektif terutama untuk penyakit tanaman yang infeksiya dimulai pada permukaan bunga (Shafik, 2025; Sutherland *et al.*, 2016). Integrasi BVT dalam *Smart-IPM* dapat diperkuat dengan *sensor monitoring* populasi lebah, *RFID tracking*, dan analisis pola terbang berbasis AI untuk memastikan distribusi agen biologis berlangsung optimal. Studi menunjukkan pengurangan kejadian penyakit secara signifikan serta peningkatan kualitas hasil panen pada sistem budidaya berry dan tomat (Shafik, 2025).

3.4 Pengurangan Pestisida Kimia dan Dampak Lingkungan

Sinergi agen biologis dan intervensi presisi secara langsung menurunkan kebutuhan pestisida kimia. Formulasi nanopartikel dengan pelepasan terkontrol mampu mengurangi penggunaan kimia aktif hingga 50% tanpa penurunan efikasi (Shekhar *et al.*, 2021). Walaupun nanopestisida bukan merupakan agen biologis, inovasi ini tetap relevan dalam konteks *Smart-IPM*, karena mendukung strategi pengurangan risiko lingkungan. Selain itu, pengurangan frekuensi aplikasi dan residu kimia berkontribusi pada peningkatan kualitas tanah, keberlanjutan ekosistem, dan kesehatan manusia (Zainab *et al.*, 2024).

3.5 Analisis Viabilitas Ekonomi dan Dampak Sosial

Penerapan *Smart-IPM* terbukti memberikan keuntungan ekonomi baik untuk petani skala besar maupun skala kecil. Sistem ini dapat meningkatkan hasil panen 15–30%, mengurangi biaya pestisida, serta meningkatkan nilai jual produk rendah residu (Abdollahdokht *et al.*, 2022). Implementasi BVT menunjukkan rasio keuntungan hingga dua kali lipat dibandingkan metode penyemprotan konvensional dalam tiga musim tanam (Shafik, 2025). Studi di Brazil yang dilakukan oleh Vermelho *et al* (2025) menegaskan bahwa petani kecil memperoleh manfaat signifikan melalui pengurangan input kimia dan transisi ke bioinput yang lebih ekonomis. Hal ini meningkatkan daya saing di pasar global dan mendukung sektor pertanian berkelanjutan.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi agen pengendali biologis dengan teknologi digital dalam kerangka *Smart-IPM* mampu meningkatkan efektivitas pengendalian hama sekaligus memperkuat keberlanjutan pertanian. Teknologi digital seperti kecerdasan buatan, sensor IoT, pemetaan *drone*, dan sistem analisis citra memungkinkan identifikasi serta prediksi populasi hama dengan akurasi tinggi. Pemanfaatan agen biologis seperti *Bacillus thuringiensis*, *Trichoderma spp.*, dan teknologi *Bee Vectoring Technology* (BVT) terbukti dapat menurunkan penggunaan pestisida kimia hingga 50% dan meningkatkan kualitas agroekosistem. Sinergi ini tidak hanya menghasilkan manfaat ekologis, tetapi juga keuntungan ekonomi melalui efisiensi biaya input dan peningkatan hasil panen. Meski demikian, *Smart-IPM* masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan infrastruktur, kemampuan teknis petani, dan akses terhadap

teknologi digital. Oleh karena itu, keberhasilan jangka panjang *Smart-IPM* memerlukan dukungan kebijakan, peningkatan kapasitas petani, pengembangan data lokal, serta kolaborasi multipihak. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi model adopsi teknologi, integrasi multiskala, serta dampak sosio ekonomi *Smart-IPM* pada berbagai ekosistem pertanian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada keluarga dan pihak-pihak yang telah membantu dalam penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

Abdollahdokht, D., Gao, Y., Faramarz, S., Poustforoosh, A., Abbasi, M., Asadikaram, G., & Nematollahi, M. H. (2022). Conventional agrochemicals towards nano-biopesticides: an overview on recent advances. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00281-0>

Ahmed, S., Marwat, S. N. K., Brahim, G. Ben, Khan, W. U., Khan, S., Al-Fuqaha, A., & Koziel, S. (2024). IoT based intelligent pest management system for precision agriculture. *Scientific Reports*, 14(1), 31917. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83012-3>

Alifiyah, N. I., Aryanto, A., & Zikriyani, H. (2025). Phytochemical constituents, nutritional composition, and pharmacological potentials of *Mangifera foetida**: A comprehensive review*. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(3), 1–15. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i3.9167>

Dara, S. K. (2019). The New Integrated Pest Management Paradigm for the Modern Age. *Journal of Integrated Pest Management*, 10(1), 12. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz010>

Dimkić, I., Janakiev, T., Petrović, M., Degrassi, G., & Fira, D. (2022). Plant-associated *Bacillus* and *Pseudomonas* antimicrobial activities in plant disease suppression via biological control mechanisms - A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 117, 101754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101754>

Dinca, M. A., Popescu, D., Ichim, L., Angelescu, N., & Pinotti, C. M. (2024). Decision fusion-based system to detect two invasive stink bugs in orchards. *Smart Agricultural Technology*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100548>

Izuafa, A., Chimbekujwo, K. I., Raji, R. O., Oyewole, O. A., Oyewale, R. O., & Abioye, O. P. (2025). Application of nanoparticles for targeted management of pests, pathogens and disease of plants. In *Plant Nano Biology* (Vol. 13). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100177>

Kariyanna, B., & Sowjanya, M. (2024). Unravelling the use of artificial intelligence in management of insect pests. In *Smart Agricultural Technology* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100517>

Konfo, T. R. C., Chabi, A. B. P., Amoussouga Gero, A., Lagnika, C., Avlessi, F., Biaou, G., & Sohounhloue, C. K. D. (2024). Recent climate-smart innovations in agrifood to enhance producer incomes through sustainable solutions. In *Journal of Agriculture and Food Research* (Vol. 15). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100985>

- Lee, J., Kim, S., Jung, H., Koo, B. K., Han, J. A., & Lee, H. S. (2023). Exploiting Bacterial Genera as Biocontrol Agents: Mechanisms, Interactions and Applications in Sustainable Agriculture. In *Journal of Plant Biology* (Vol. 66, Issue 6, pp. 485–498). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s12374-023-09404-6>
- Mehzabeen, S. M., & Gayathri, R. (2025). Effective adaptive res-BiGRU network for pest classification performance based on regionViT-yolov8-aided pest detection technique. *Big Data Research*, 42, 100571. <https://doi.org/10.1016/J.BDR.2025.100571>
- Nyakuri, J. P., Nkundineza, C., Gatera, O., Nkurikiyeyezu, K., & Mwitende, G. (2025). AI and IoT-powered edge device optimized for crop pest and disease detection. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06452-5>
- Pattnaik, G., Shrivastava, V. K., & Parvathi, K. (2020). Transfer Learning-Based Framework for Classification of Pest in Tomato Plants. *Applied Artificial Intelligence*, 981–993. <https://doi.org/10.1080/08839514.2020.1792034>
- Ray, R. K., Chakravarty, S., Dash, S., Ghosh, A., Mohanty, S. N., Reddy Chirra, V. R., Ayouni, S., & Khan, M. I. (2025). Precision pest management in agriculture using Inception V3 and EfficientNet B4: A deep learning approach for crop protection. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2025.09.005>
- Shafik, W. (2025). Bee Vectoring Technology (BVT) as a nature-based strategy for sustainable pest control management. In *Green Technologies and Sustainability* (Vol. 4, Issue 1). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100267>
- Shekhar, S., Sharma, S., Kumar, A., Taneja, A., & Sharma, B. (2021). The framework of nanopesticides: a paradigm in biodiversity. *Materials Advances*, 2(20), 6569–6588. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d1ma00329a>
- Shukla, S., Chaudhary, K., Aahana, Phutela, S., Bhutani, R., & Shukla, S. K. (2025). Smart crop varieties and Precision agriculture: a way ahead for climate-resilient sustainable agriculture. *Climate Change and Agricultural Ecosystems*, 435–466. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26520-4.00027-5>
- Sutherland, W. J., Broad, S., Caine, J., Clout, M., Dicks, L. V., Doran, H., Entwistle, A. C., Fleishman, E., Gibbons, D. W., Keim, B., LeAnstey, B., Lickorish, F. A., Markillie, P., Monk, K. A., Mortimer, D., Ockendon, N., Pearce-Higgins, J. W., Peck, L. S., Pretty, J., & Rockström, J. (2016). A Horizon Scan of Global Conservation Issues for 2016. *Trends in Ecology & Evolution*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.11.007>
- Ullah, F., Guru-Pirasanna-Pandi, G., Murtaza, G., Sarangi, S., Gul, H., Li, X., Chavarín-Gómez, L. E., Ramírez-Romero, R., Guedes, R. N. C., & Desneux, N. (2025). Evolving strategies in agroecosystem pest control: Transitioning from chemical to green management. *Journal of Pest Science*, 1–18.
- Vermelho, A. B., Beatriz, A., Macrae, A., Neves Junior, A., Domingos, L., Emanuela De Souza, J., Cristina, A., Borsari, P., Souza De Oliveira, S., Von Der Weid, I., Veillard, P., & Zilli, J. E. (2025). Microbial Bioinputs in Brazilian Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*.

- Wei, C., Shan, Y., & Zhen, M. (2025). Deep learning-based anomaly detection for precision field crop protection. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1576756>
- Xu, J., Li, Y., Zhang, M., & Zhang, S. (2024). Sustainable agriculture in the digital era: Past, present, and future trends by bibliometric analysis. *Heliyon*, 10(14), e34612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34612>
- Zainab, R., Hasnain, M., Ali, F., Abideen, Z., Siddiqui, Z. S., Jamil, F., Hussain, M., & Park, Y.-K. (2024). Prospects and challenges of nanopesticides in advancing pest management for sustainable agricultural and environmental service. *Environmental Research*, 261, 119722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119722>
- Zhou, W., Arcot, Y., Medina, R. F., Bernal, J., Cisneros-Zevallos, L., & Akbulut, M. E. S. (2024). Integrated Pest Management: An Update on the Sustainability Approach to Crop Protection. In *ACS Omega* (Vol. 9, Issue 40, pp. 41130–41147). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06628>