

Pemanfaatan Limbah Makanan Program Makanan Bergizi Gratis (MBG) sebagai Pupuk Organik Cair melalui Fermentasi: Analisis Dampak Lingkungan dan Edukatif di MTs SA Al Mina Bandungan

Sasmitha Afianti¹, Nisrina Hasna Tsabitha², Ahmad Minan Zuhri³

Tadris Ilmu Pengetahuan Alam, Fakultas Tarbiyah Dan Ilmu Keguruan, Universitas Islam Negeri Salatiga, Indonesia

sasmithasurya23@gmail.com

Kata Kunci:

Limbah Makanan, MBG, Pupuk Organik, Metana, Emisi Gas Rumah Kaca.

Abstrak

Limbah makanan (*food waste*) merupakan salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca dan permasalahan lingkungan global. Di Indonesia, peningkatan timbunan limbah makanan juga terjadi pada sektor pendidikan, termasuk pada program penyediaan makanan bergizi seperti Makanan Bergizi Gratis (MBG). Penelitian ini mengkaji pemanfaatan limbah makanan dari program MBG di MTs SA Al Mina Bandungan yang telah diolah menjadi pupuk organik cair (POC) sebagai contoh praktik pengelolaan limbah berbasis sekolah. Kajian dilakukan melalui telaah literatur ilmiah dan analisis pengalaman praktis di lapangan. Hasil kajian menunjukkan bahwa limbah MBG yang terdiri dari sisa sayur, nasi, lauk, dan buah memiliki karakteristik organik yang mudah terurai sehingga berpotensi diolah melalui proses fermentasi menjadi POC. Proses pengolahan ini tidak hanya menurunkan volume sampah yang sebelumnya langsung dibuang ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA), tetapi juga menghasilkan pupuk organik yang meningkatkan kualitas tanah dan pertumbuhan tanaman di lingkungan sekolah. Integrasi praktik pengolahan limbah MBG dengan prinsip 3R (*reduce, reuse, recycle*) terbukti mampu mengurangi emisi metana, meningkatkan kesadaran warga sekolah, serta mendukung ekosistem pendidikan berkelanjutan.

Key Word:

Food Waste, MBG, Organic Fertilizer, Methane, Greenhouse Gas Emissions.

Abstract

Food waste is one of the major contributors to greenhouse gas emissions and global environmental degradation. In Indonesia, the increase in food waste generation also occurs within the education sector, including in school-based nutrition programs such as the Free Nutritious Meal Program (Makanan Bergizi Gratis/MBG). This study examines the utilization of food waste produced from the MBG program at MTs SA Al Mina Bandungan, which has been processed into liquid organic fertilizer (LOF) as a model of school-based waste management practice. The analysis was conducted through a review of relevant scientific literature and practical field-based observations. The findings reveal that MBG food waste consisting of leftover vegetables, rice, side dishes, and fruit possesses organic characteristics that are easily degradable and therefore suitable for fermentation into LOF. This processing method not only reduces the volume of waste that would otherwise be disposed of in landfills but also produces organic fertilizer that enhances soil quality and supports plant growth within the school environment. Integrating MBG waste processing with the principles of reduce, reuse, and recycle (3R) has been shown to effectively reduce methane emissions, increase environmental awareness among the school community, and promote a sustainable educational ecosystem.

Copyright © 2025 Sasmitha Afianti, Nisrina Hasna Tsabitha, Ahmad Minan Zuhri
This work is licensed under an **Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)**

PENDAHULUAN

Jumlah penduduk dunia terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, baik dalam skala global maupun di tingkat lokal. Salah satu akibat dari bertambahnya jumlah penduduk adalah meningkatnya permintaan terhadap bahan pangan serta berbagai kebutuhan lain, baik kebutuhan utama maupun kebutuhan tambahan (Chaerul & Zatadini, 2020). Seiring dengan meningkatnya konsumsi pangan, muncul permasalahan baru berupa peningkatan jumlah limbah, baik yang bersifat organik maupun anorganik. Peningkatan jumlah sampah tersebut menjadi isu penting yang perlu segera ditangani. Salah satu permasalahan yang muncul dari hal ini adalah fenomena limbah makanan (*food waste*).

Data dari *Economist Intelligence Unit* (EIU) menunjukkan bahwa Indonesia adalah negara penghasil *food waste* tertinggi kedua di dunia, dengan setiap orang diperkirakan menyumbang sekitar 300 kilogram

sampah makanan per tahun. Jumlah tersebut sebenarnya cukup untuk memberi makan 28 juta orang yang kekurangan pangan (Tamara et al., 2020b). Menurut laporan United Nations Environment Programme (UNEP, 2021) pada tahun 2021 rata-rata pemborosan pangan (*food waste*) per kapita secara global adalah sebesar 121 kg/tahun, atau sekitar 931 juta ton. Rincian pemborosan tersebut meliputi 74 kg dari rumah tangga, 32 kg dari jasa pangan, dan 15 kg dari pengecer per kapita/tahun (Luna & Suryana, 2022).

Fenomena ini tidak hanya terjadi pada rumah tangga ataupun industri pangan, tetapi juga pada lembaga pendidikan, terutama sekolah yang menyediakan program konsumsi rutin seperti Makanan Bergizi Gratis (MBG). Program MBG bertujuan meningkatkan gizi peserta didik, namun secara bersamaan berpotensi menghasilkan timbunan limbah makanan dalam jumlah signifikan apabila tidak dikelola secara tepat. Di MTs SA Al Mina Bandung, implementasi program MBG menunjukkan adanya sisa makanan harian berupa sisa nasi, sayur, buah, dan lauk pauk. Limbah makanan ini sebelumnya langsung dibuang ke tempat sampah umum tanpa proses pemilahan, sehingga berpotensi menambah beban TPA, menghasilkan gas metana, serta menurunkan kualitas kebersihan lingkungan sekolah. Berdasarkan observasi awal, timbunan limbah MBG mencapai $\pm 3\text{--}5$ kg per hari pada hari tertentu, terutama akibat porsi yang tidak habis dikonsumsi atau menu yang kurang sesuai dengan preferensi siswa.

Salah satu alternatif yang relevan dan telah dipraktikkan di MTs SA Al Mina Bandung adalah pengolahan limbah MBG menjadi pupuk organik cair (POC) melalui proses fermentasi mikroorganisme. POC yang diproduksi melalui fermentasi mikroba mampu meningkatkan aktivitas enzim tanah, memperbaiki struktur agregat tanah, serta meningkatkan kapasitas tukar kation yang mendukung penyerapan nutrisi oleh tanaman (Widarti et al., 2020). Pemanfaatan ini sejalan dengan prinsip *zero waste school*, pendidikan lingkungan hidup, dan penguatan proyek Profil Pelajar Pancasila (P5), khususnya dimensi gotong royong dan keberlanjutan lingkungan.

Limbah menurut jenisnya dibagi menjadi dua yaitu limbah organik dan limbah anorganik (Agus, 2000). Limbah organik adalah jenis limbah yang mudah terurai secara alami, biasanya berasal dari sisa makanan, daun, buah, sayuran, serta sisa kegiatan dapur. Sementara itu, limbah anorganik merupakan limbah yang sulit terurai, yang umumnya berasal dari bahan seperti plastik, kertas, dan logam (Larasati & Puspikawati, 2019). Limbah organik dapat dimanfaatkan untuk membuat pupuk. Pupuk yang dihasilkan dari limbah tersebut dikenal sebagai pupuk organik atau pupuk alami.

Pupuk organik menurut *American Plant Food Control Officials* (AAPFCO) adalah bahan yang mengandung karbon dan satu atau lebih unsur hara selain H dan O yang esensial untuk pertumbuhan tanaman. Sedangkan menurut *USDA National Organic Program* adalah semua pupuk organik yang tidak mengandung bahan terlarang dan berasal dari bahan alami yaitu dari tanaman atau hewan, sewage sludge, dan bahan non organik tidak termasuk. Menurut USEPA, pupuk organik adalah manure atau kompos yang diaplikasikan ke tanaman sebagai sumber unsur hara (Funk 2014).

POC merupakan salah satu jenis pupuk organik. Secara agronomis, POC memberikan suplai unsur hara makro dan mikro yang diperlukan tanaman, di antaranya nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K). Lingga & Marsono (2019) menyatakan bahwa ketersediaan unsur N berbanding lurus dengan intensitas kehijauan daun dan laju fotosintesis tanaman. Menurut penelitian Nugroho et al. (2021) POC berbasis fermentasi EM4 mampu merangsang pemanjangan sel dan meningkatkan laju pembelahan pada jaringan meristem, sehingga berdampak pada percepatan pertumbuhan tunas dan daun baru. Chen et al. (2020) menjelaskan bahwa keberadaan mikroorganisme EM4 membantu mempercepat mineralisasi unsur hara dari bentuk kompleks menjadi bentuk yang mudah diserap oleh akar tanaman. Kusumawati et al. (2020) yang menunjukkan bahwa aplikasi POC organik mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman hias hingga lebih dari 20-30% dibandingkan tanaman tanpa perlakuan.

Berbagai definisi di atas pada intinya adalah bahwa pupuk organik mengandung unsur karbon dan unsur hara lainnya yang berkombinasi dengan karbon. Pupuk organik merupakan pupuk yang berasal dari tumbuhan mati, kotoran hewan atau bagian hewan dan limbah organik lainnya yang telah melalui proses rekayasa, berbentuk padat atau cair, dapat diperkaya dengan bahan mineral, serta mikroba yang bermanfaat untuk meningkatkan kandungan hara dan bahan organik tanah serta memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Permentan No. 70/Permentan/SR.140/10/2011).

METODE

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan metode studi pustaka yang dipadukan dengan analisis deskriptif berbasis praktik lapangan. Studi pustaka dilakukan terhadap jurnal, laporan penelitian, dan buku ilmiah yang relevan mengenai food waste, emisi gas rumah kaca, dan teknologi pemanfaatan limbah organik. Analisis lapangan dilakukan berdasarkan dokumentasi dan pengalaman praktik pengolahan limbah MBG di MTs SA Al Mina Bandung. Prosedur pengolahan limbah menjadi pupuk organik cair meliputi: (1)

pemilahan limbah MBG; (2) penghancuran dan pencacahan limbah; (3) fermentasi limbah menggunakan aktivator mikroorganisme (EM4) selama 14 hari dalam wadah tertutup; (4) penyaringan dan pemanenan POC sebagai produk akhir; serta (5) aplikasi pada tanaman di lingkungan sekolah untuk menilai kualitas dan efektivitasnya. Proses ini kemudian dianalisis secara kualitatif untuk melihat manfaat ekologis, edukatif, serta relevansinya terhadap pengelolaan limbah di sekolah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep Limbah Makanan dan Dampaknya

Limbah makanan (food waste) merupakan bentuk residu pangan yang muncul pada berbagai tahapan rantai konsumsi, mulai dari proses penyimpanan, pengolahan, penyajian, hingga perilaku konsumen yang cenderung tidak menghabiskan makanan. Bau et al. (2022) menyatakan bahwa food waste tidak hanya berasal dari makanan yang rusak atau tidak layak konsumsi, tetapi juga mencakup makanan yang secara nutrisi masih dapat dikonsumsi, namun dibuang akibat pola konsumsi yang berlebihan, kesalahan dalam estimasi produksi pangan, dan rendahnya kesadaran masyarakat terhadap praktik konsumsi berkelanjutan. Dalam konteks nasional, Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (2021) menunjukkan bahwa kategori limbah makanan menempati porsi terbesar di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), yaitu mencapai 40,3% dari total komposisi sampah. Hal ini menandakan bahwa *food waste* merupakan persoalan struktural dalam sistem pengelolaan sampah Indonesia.

Peningkatan jumlah limbah makanan tidak dapat dipahami hanya sebagai persoalan kebersihan, tetapi juga berimplikasi multidimensional terhadap aspek ekologi, sosial, ekonomi, dan kesehatan masyarakat. Dari sudut pandang lingkungan global, laporan (UNEP, 2021) menegaskan bahwa lebih dari satu miliar ton makanan terbuang setiap tahun, sehingga menjadikan limbah makanan sebagai kontributor signifikan terhadap peningkatan gas rumah kaca. Ketika makanan terbuang, tidak hanya produk akhir yang hilang, tetapi seluruh sumber daya yang digunakan untuk menghasilkan makanan tersebut air, energi, lahan, dan tenaga kerja juga ikut terbuang. Kaza et al. (2019) menegaskan bahwa limbah makanan menjadi salah satu sumber emisi antropogenik terbesar pada sektor limbah, terutama ketika limbah organik tersebut terakumulasi pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA).

Dari perspektif sains, limbah makanan diklasifikasikan sebagai limbah organik mudah terurai. Namun, proses terurainya limbah ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan tempat pembuangan. Di TPA yang cenderung berlangsung dalam kondisi anaerob, limbah organik mengalami dekomposisi oleh mikroorganisme anaerob, sehingga menghasilkan gas metana (CH_4) yang memiliki *global warming potential* 28–36 kali lebih besar dibanding CO_2 dalam rentang 100 tahun (IPCC, 2021). Penelitian Wang et al. (2020) melaporkan bahwa limbah makanan menyumbang 50–70% total emisi metana dari TPA di negara berkembang, sementara Nasir et al. (2022) menunjukkan bahwa volume metana dapat meningkat drastis pada limbah yang kaya karbohidrat dan protein yang merupakan dua komponen utama penyusun limbah MBG.

Akumulasi emisi metana ini tidak hanya memberi kontribusi signifikan pada perubahan iklim global, tetapi juga menimbulkan risiko lokal. Konsentrasi metana sebesar 5–15% di udara dapat memicu kebakaran atau ledakan di kawasan TPA (Andhika & Agung, 2016), sehingga meningkatkan risiko keselamatan masyarakat sekitar. Selain itu, limbah makanan juga menghasilkan gas hidrogen sulfida (H_2S) yang berbau menyengat dan bersifat toksik pada konsentrasi tertentu. Kondisi ini menyebabkan penurunan kualitas udara, munculnya bau tidak sedap, dan peningkatan paparan terhadap patogen yang dapat memengaruhi kesehatan masyarakat maupun kenyamanan lingkungan sekitar tempat pembuangan.

Selain berdampak pada lingkungan, limbah makanan juga memiliki implikasi terhadap ketahanan pangan. Besarnya porsi makanan yang terbuang mencerminkan ketidakefisienan sistem konsumsi pangan masyarakat dan hilangnya potensi sumber nutrisi yang seharusnya dapat dikonsumsi. Tamara et al. (2020a) mencatat bahwa setiap warga Indonesia dapat menyumbang hingga 300 kg sampah makanan per tahun. Jumlah ini secara keseluruhan cukup untuk memenuhi kebutuhan pangan jutaan penduduk yang mengalami kerawanan pangan. Dengan demikian, limbah makanan mencerminkan ironi antara *oversupply* pangan dalam situasi konsumsi tertentu dengan kekurangan akses pangan pada golongan masyarakat lain.

Dalam konteks pendidikan, khususnya pada program Makanan Bergizi Gratis (MBG), persoalan limbah makanan menjadi semakin relevan. Sekolah yang menyediakan konsumsi harian berpotensi menghasilkan limbah dalam jumlah signifikan apabila tidak dilengkapi dengan sistem pengelolaan yang memadai. Limbah makanan di lingkungan sekolah bukan hanya menambah beban TPA, tetapi juga berkontribusi terhadap menurunnya kualitas sanitasi sekolah, memicu bau tidak sedap, dan meningkatkan risiko berkembangnya hama atau patogen. Tanpa adanya mekanisme pengelolaan yang sistematis, timbulan limbah seperti nasi, sayur, dan

buah yang tidak habis dikonsumsi akan mengalami pembusukan cepat dan memperburuk kondisi lingkungan belajar.

Secara keseluruhan, limbah makanan merupakan isu kompleks yang memerlukan pendekatan multidisipliner dan multi-level. Dampaknya tidak hanya terbatas pada meningkatnya volume sampah, tetapi juga berkontribusi terhadap percepatan perubahan iklim, penurunan kualitas lingkungan, risiko kesehatan, pemborosan sumber daya, dan ketimpangan akses pangan. Oleh karena itu, pengelolaan limbah makanan termasuk melalui strategi konversi menjadi Pupuk Organik Cair (POC) sebagaimana dilakukan di MTs SA Al Mina Bandung merupakan salah satu bentuk intervensi efektif dalam mendukung keberlanjutan lingkungan sekaligus meningkatkan kesadaran ekologis masyarakat sekolah.

Limbah Makanan Dalam Perspektif Sains Dan Lingkungan

Limbah makanan merupakan bagian dari limbah organik yang tersusun atas senyawa karbon, nitrogen, serta berbagai komponen biokimia seperti karbohidrat, protein, dan lipid yang mudah mengalami proses dekomposisi biologis. Secara ilmiah, limbah makanan termasuk dalam kategori biodegradable waste, yakni limbah yang dapat terurai oleh aktivitas mikroorganisme, baik secara aerob maupun anaerob. Karakteristik kimiawi ini menjadikan limbah makanan sebagai substrat yang sangat reaktif dalam proses pembusukan, sehingga memiliki implikasi ekologis yang jauh lebih kompleks dibandingkan jenis limbah lainnya.

Pada kondisi penumpukan di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), limbah makanan mengalami proses dekomposisi bertahap yang dimulai dari fase hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, hingga metanogenesis. Ketika limbah berada pada lapisan tertimbun tanpa pasokan oksigen, mikroorganisme anaerob mendominasi proses biodegradasi. Proses inilah yang menyebabkan produksi gas metana (CH_4) meningkat secara signifikan, sebagaimana dijelaskan oleh Puger (2018) bahwa fermentasi limbah organik di lingkungan anaerob meningkatkan suhu lokal dan menghasilkan gas berbau tidak sedap sebagai hasil pemecahan materi organik oleh mikroorganisme.

Wang et al. (2020) memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa limbah makanan menyumbang 50–70% potensi emisi metana dari Tempat Pembuangan Akhir di negara berkembang. Laporan Bank Dunia melalui Kaza et al. (2019) juga menegaskan bahwa sektor limbah padat, khususnya TPA, merupakan salah satu sumber terbesar emisi metana antropogenik. Hal ini semakin diperparah oleh praktik pemilahan limbah yang masih rendah di berbagai kawasan urban, sebagaimana diungkapkan Huang et al. (2023), yang menemukan bahwa minimnya pengolahan limbah organik di sumber menghasilkan peningkatan signifikan terhadap total emisi gas rumah kaca.

Dalam perspektif sains lingkungan, gas metana memiliki dampak pemanasan global yang sangat tinggi. Menurut IPCC (2021), CH_4 memiliki potensi pemanasan global sebesar 28–36 kali lipat lebih kuat dibandingkan CO_2 dalam periode 100 tahun. Setiap ton sampah organik yang terurai secara anaerob dapat menghasilkan rata-rata 50 kg metana, sedangkan setiap kilogram limbah makanan berpotensi menghasilkan sekitar 0,5 m^3 metana (Sudarman, 2010). Kondisi ini menjadikan limbah makanan sebagai salah satu kontributor strategis terhadap percepatan perubahan iklim global.

Selain berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, akumulasi limbah makanan menimbulkan risiko ekologis dan kesehatan lingkungan. Gas metana memiliki sifat mudah terbakar, dan pada kisaran konsentrasi 5–15% di udara, gas ini dapat memicu kebakaran atau ledakan di area TPA (Andhika & Agung, 2016). Bersamaan dengan itu, proses pembusukan limbah organik juga menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), dan senyawa volatil organik lainnya yang berbau menyengat dan berpotensi mengganggu sistem pernapasan. Proses-proses tersebut menurunkan kualitas udara dan menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat sekitar.

Dalam konteks pendidikan seperti MTs SA Al Mina Bandung, keberadaan limbah makanan dari Program MBG mencerminkan mikro-ekosistem permasalahan tersebut. Jika tidak dikelola, limbah ini berpotensi menambah beban TPA, meningkatkan risiko emisi metana, menghasilkan bau tidak sedap, serta menjadi media pertumbuhan mikroorganisme patogen yang menurunkan kualitas sanitasi sekolah. Oleh karena itu, pengelolaan limbah makanan berbasis sekolah menjadi strategi penting dalam membangun kesadaran ekologis sekaligus berkontribusi nyata terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan.

Karakteristik dan Tahapan Pengolahan Limbah MBG Menjadi POC di MTs SA Al Mina

Limbah makanan yang dihasilkan dari Program Makanan Bergizi Gratis (MBG) di MTs SA Al Mina Bandung memiliki karakteristik utama sebagai limbah organik yang mudah terurai (biodegradable). Berdasarkan hasil observasi lapangan, jenis limbah yang paling dominan meliputi nasi, sisa sayuran, lauk pauk, kuah, serta buah-buahan. Secara kimiawi, material tersebut kaya karbohidrat, serat, dan sejumlah kecil protein, sehingga sangat sesuai untuk diolah melalui mekanisme fermentasi mikroba menjadi pupuk organik cair (POC). Karakteristik ini menguatkan temuan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (2021) yang

menyebutkan bahwa 40,3% komposisi sampah nasional terdiri dari limbah makanan yang secara alamiah bersifat mudah terdegradasi secara biologis.

Karakteristik biodegradabilitas limbah MBG menjadikannya sebagai sumber potensial untuk dilakukan pengolahan berbasis bioteknologi sederhana. Material organik seperti karbohidrat dan selulosa dalam nasi dan sayuran menjadi substrat utama bagi mikroorganisme fermentatif, sedangkan kandungan protein dan lemak dalam lauk pauk berfungsi sebagai penunjang nutrisi bagi aktivitas mikroba selama proses penguraian. Proses ini juga sejalan dengan konsep penguraian alami limbah organik sebagaimana dijelaskan dalam literatur mengenai kompos, pupuk organik, dan material hayati lainnya.

Tahap pertama dalam pengolahan limbah MBG adalah pemilahan antara sampah organik dan anorganik. Pemilahan ini merupakan langkah krusial karena keberadaan plastik, kemasan makanan, atau bahan non-organik lainnya dapat menghambat bahkan mencemari proses fermentasi. Limbah organik yang dipilah berupa nasi, sayuran, buah, dan lauk pauk yang seluruhnya tergolong limbah organik yang mudah terurai menurut klasifikasi Agus (2000) dan Larasati & Puspikawati (2019). Tahap pemilahan juga melatih warga sekolah untuk menerapkan kebiasaan pengelolaan sampah berbasis 3R dan menjadi fondasi utama dalam menjaga kualitas POC yang dihasilkan.

Setelah dipilah, limbah makanan mengalami proses penghancuran dan pencacahan untuk meminimalkan ukuran partikel. Pengurangan ukuran ini bertujuan memperbesar luas permukaan sehingga mempercepat aktivitas mikroorganisme selama proses fermentasi. Tahap ini mendukung optimalisasi akses enzim mikroba terhadap substrat organik sehingga mempercepat proses degradasi bahan organik, sebagaimana dijelaskan dalam konsep dekomposisi aerob maupun anaerob dalam literatur pengolahan limbah organik.

Tahap inti pengolahan adalah fermentasi anaerob dengan menambahkan aktivator mikroba (EM4) ke dalam wadah tertutup. Limbah organik difermentasi selama kurang lebih 14 hari dalam kondisi minim oksigen. EM4 mengandung bakteri asam laktat, bakteri fotosintetik, jamur fermentatif, dan Actinomycetes, yang semuanya berperan mempercepat penguraian bahan organik menjadi bentuk senyawa cair yang kaya nutrisi. Proses ini menghasilkan cairan berwarna coklat gelap yang tidak berbau menyengat, menandakan keberhasilan fermentasi sebagaimana dilaporkan dalam hasil pengamatan praktis di madrasah. Proses fermentasi ini juga sejalan dengan temuan Surendra et al. (2020) dan Liu et al. (2021) tentang efektivitas pengolahan limbah makanan menggunakan mikroorganisme, yang mampu mengurangi volume limbah dan meningkatkan kualitas nutrisi bahan fermentasi.

Setelah fermentasi mencapai tahap optimal, campuran limbah dipisahkan antara bagian padat dan cair melalui proses penyaringan. Cairan hasil fermentasi kemudian ditampung sebagai POC, sedangkan sisa padat dapat dimanfaatkan sebagai kompos atau ditambahkan ke dalam media tanam. POC yang dihasilkan disimpan dalam botol tertutup rapat untuk menjaga stabilitas mikrobial dan kualitas hara. Tahap ini memastikan produk akhir POC aman, stabil, dan siap diaplikasikan pada tanaman.

Tahap terakhir adalah pemanfaatan POC sebagai pupuk organik untuk tanaman hias di lingkungan MTs SA Al Mina. Pengamatan menunjukkan peningkatan tinggi tanaman mencapai 20% dalam tiga minggu, peningkatan warna daun menjadi lebih hijau, dan penambahan jumlah daun sebagaimana ditunjukkan dalam data empiris di lapangan. Efektivitas ini sejalan dengan (Permentan No. 70/Permentan/SR.140/10/ 2011) yang menyatakan bahwa pupuk organik dapat memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, meningkatkan aktivitas mikroorganisme, serta meningkatkan ketersediaan hara. Dengan demikian, tahapan pengolahan limbah MBG menjadi POC ini tidak hanya menjadi solusi pengurangan timbunan limbah, tetapi juga berfungsi sebagai media pembelajaran ekologis bagi peserta didik mengenai konsep siklus bahan organik dan pengelolaan sampah berkelanjutan.

Manfaat Pengolahan Limbah MBG Serta Dampaknya Apabila Tidak Dikelola

Pengolahan limbah makanan dari program Makanan Bergizi Gratis (MBG) melalui proses fermentasi terbukti memberikan manfaat ekologis, edukatif, dan sosial bagi lingkungan madrasah. Hasil praktik fermentasi menunjukkan bahwa volume limbah MBG dapat berkurang hingga $\pm 50\%$ dari jumlah awal setelah melalui tahapan pemilahan, pencacahan, dan pemrosesan anaerob dengan EM4. Proses ini menghasilkan pupuk organik cair (POC) berwarna coklat gelap dengan aroma yang relatif netral serta stabilitas kimia yang baik (Gambar.1), seperti karakteristik fermentasi mikroba yang dilaporkan oleh Liu et al. (2021) dan Surendra et al. (2020). Keberhasilan ini memperlihatkan bahwa pendekatan berbasis mikroba merupakan metode efisien untuk mengonversi limbah makanan menjadi produk bernilai guna tinggi. Sebaliknya, apabila limbah MBG tidak dikelola secara sistematis, akumulasi sisa makanan tersebut berpotensi menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan di area madrasah. Limbah organik yang menumpuk tanpa pengolahan akan mengalami dekomposisi anaerobik yang tidak terkontrol, memicu timbulnya aroma tidak sedap serta menjadi sarang

vektor penyakit. Secara ekologis, tumpukan limbah ini juga berkontribusi pada pelepasan gas metana ke atmosfer dan pencemaran air lindi yang dapat merusak kualitas tanah di sekitar institusi pendidikan.



Gambar 1. Proses Fermentasi Limbah MBG Menjadi POC

Secara ekologis, pengolahan limbah MBG membantu menekan timbulan sampah organik yang sebelumnya langsung dibuang ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Jika limbah ini tidak dikelola, materi organik tersebut akan terakumulasi dan mengalami proses dekomposisi anaerob secara alamiah di TPA, yang menurut Wang et al. (2020) dan Huang et al. (2023) merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi gas metana (CH_4). Mengingat CH_4 memiliki potensi pemanasan global 28–36 kali lebih besar dibanding CO_2 (IPCC, 2021), keberadaan limbah MBG yang tidak dikelola berpotensi menambah kontribusi sekolah terhadap emisi gas rumah kaca. Selain itu, Sudarman (2010) menjelaskan bahwa setiap kilogram limbah makanan dapat menghasilkan hingga $0,5 \text{ m}^3$ metana, sehingga tanpa intervensi, akumulasi limbah MBG di lingkungan sekolah dapat menjadi sumber percepatan degradasi lingkungan.

Selain berdampak pada perubahan iklim, tidak adanya pengelolaan limbah MBG dapat menimbulkan permasalahan sanitasi dan kesehatan lingkungan. Limbah yang membusuk dalam kondisi anaerob menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S), gas berbau menyengat yang dapat mengganggu sistem pernapasan dan menurunkan kenyamanan area belajar. Andhika & Agung (2016) juga menekankan bahwa konsentrasi metana 5–15% di udara berpotensi memicu ledakan di lingkungan TPA, sehingga akumulasi limbah organik yang tidak dikendalikan merupakan potensi bahaya kebakaran dan keselamatan. Bagi lingkungan madrasah, kondisi ini dapat menciptakan lingkungan belajar yang tidak higienis, meningkatkan risiko penyebaran patogen, serta menurunkan kualitas kebersihan sekolah.

Melalui pengolahan menjadi POC, limbah MBG justru memberikan manfaat langsung bagi pemeliharaan ruang hijau madrasah. POC yang dihasilkan mengandung unsur hara makro dan mikro yang berfungsi meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki struktur fisik tanah, serta meningkatkan aktivitas mikroorganisme menguntungkan. Hal ini sejalan dengan pedoman Permentan No. 70/Permentan/SR.140/10/2011 yang menjelaskan bahwa pupuk organik berperan memperkaya kandungan bahan organik tanah dan memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Aplikasi POC pada tanaman hias di lingkungan madrasah menunjukkan peningkatan kualitas tanaman, seperti pertumbuhan daun yang lebih hijau, kenaikan tinggi tanaman, dan peningkatan jumlah daun dalam periode pengamatan 21 hari.

Dari aspek edukatif, praktik pengolahan limbah MBG juga berfungsi sebagai media pembelajaran berbasis proyek (*project-based learning*) yang relevan bagi peserta didik. Kegiatan pemilahan limbah, formulasi bahan fermentasi, hingga proses pengamatan pertumbuhan tanaman menjadi sarana internalisasi nilai-nilai literasi lingkungan, penguatan Profil Pelajar Pancasila, serta implementasi prinsip 3R (*reduce, reuse, recycle*) di lingkungan sekolah. Kegiatan ini tidak hanya meningkatkan kesadaran siswa dalam mengelola

sampah, tetapi juga membangun perilaku berkelanjutan seperti memilah sampah, mengurangi food waste, dan memanfaatkan kembali bahan organik.

Secara keseluruhan, pengolahan limbah MBG menjadi POC memberikan dua manfaat utama: (1) manfaat ekologis berupa penurunan emisi metana, pengurangan beban TPA, pengendalian bau, serta peningkatan kualitas tanah; dan (2) manfaat edukatif berupa pengembangan kompetensi sains, pembiasaan perilaku peduli lingkungan, serta integrasi pengelolaan sampah dengan pembelajaran IPA dan kegiatan P5. Sebaliknya, apabila limbah MBG tidak dikelola, madrasah berpotensi menghadapi peningkatan timbunan sampah, risiko pencemaran udara dan bau, potensi berkembangnya mikroorganisme patogen, serta kontribusi terhadap emisi gas rumah kaca yang memperburuk perubahan iklim.

Dengan demikian, program pengolahan limbah MBG bukan hanya solusi teknis dalam penanganan sampah makanan, tetapi juga strategi komprehensif yang mendukung pembangunan lingkungan belajar yang bersih, sehat, berkelanjutan, dan relevan dengan tujuan pendidikan lingkungan hidup di satuan pendidikan.

Pemanfaatan POC Untuk Tanaman Hias di Lingkungan Madrasah

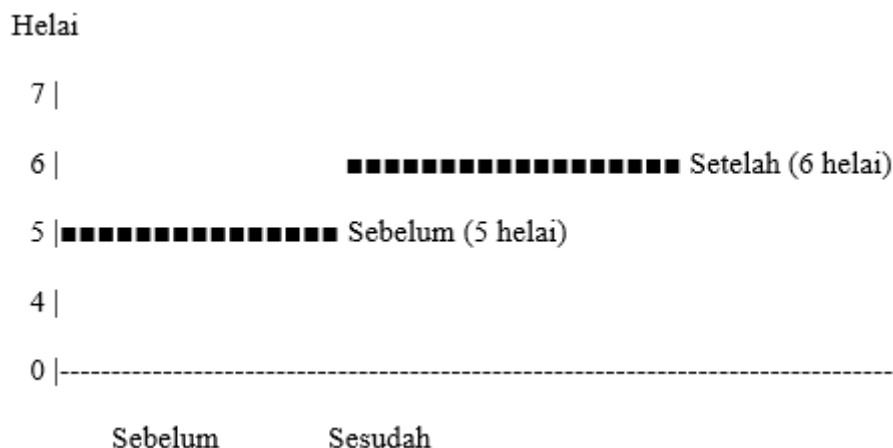
Pemanfaatan Pupuk Organik Cair (POC) hasil fermentasi limbah makanan program Makanan Bergizi Gratis (MBG) di MTs SA Al Mina Bandungan menunjukkan kontribusi nyata terhadap peningkatan kualitas pertumbuhan tanaman hias di lingkungan madrasah. Secara agronomis, penggunaan POC memberikan suplai unsur hara makro dan mikro yang diperlukan tanaman, di antaranya nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), serta senyawa bioaktif hasil aktivitas mikroorganisme selama fermentasi. Menurut Widarti et al. (2020) POC yang diproduksi melalui fermentasi mikroba mampu meningkatkan aktivitas enzim tanah, memperbaiki struktur agregat tanah, serta meningkatkan kapasitas tukar kation yang mendukung penyerapan nutrisi oleh tanaman.

Tabel 1. Tabel Efektivitas POC Pada Pertumbuhan Tanaman Hias

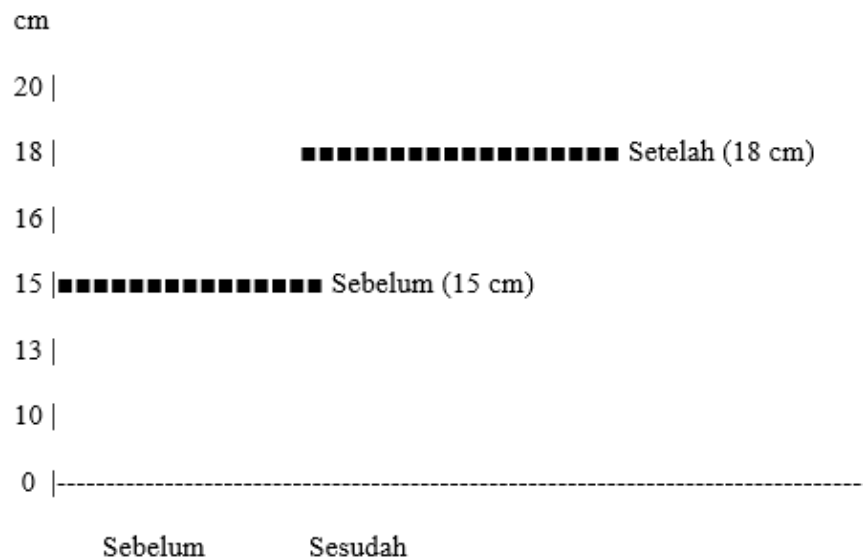
Parameter	Sebelum (cm)	Sesudah (cm)	Lama Pengamatan
Tinggi tanaman	15	18	21
Jumlah daun	5	6	21
Warna daun	Hijau kekuningan	Hijau tua	21

Tabel 1. di atas merupakan hasil pengamatan pada tanaman hias di madrasah memperlihatkan adanya peningkatan yang signifikan pada parameter pertumbuhan vegetatif setelah aplikasi POC. Dalam kurun waktu 21 hari, terjadi peningkatan tinggi tanaman hingga 20%, pertambahan jumlah helai daun, serta perubahan warna daun dari hijau kekuningan menjadi hijau lebih tua. Perubahan ini menunjukkan bahwa ketersediaan nitrogen dan magnesium dalam POC mampu mengoptimalkan sintesis klorofil, sebagaimana dinyatakan oleh Lingga & Marsono (2019) bahwa ketersediaan unsur N berbanding lurus dengan intensitas kehijauan daun dan laju fotosintesis tanaman.

Proses fermentasi limbah MBG menggunakan EM4 juga menghasilkan senyawa metabolit sekunder seperti asam laktat dan hormon tumbuh (IAA dan sitokinin) yang dapat berfungsi sebagai bio-stimulan. Menurut penelitian Nugroho et al. (2021) POC berbasis fermentasi EM4 mampu merangsang pemanjangan sel dan meningkatkan laju pembelahan pada jaringan meristem, sehingga berdampak pada percepatan pertumbuhan daun baru (Gambar.2) dan pertumbuhan tunas (Gambar.3). Hal tersebut sejalan dengan temuan pada uji coba di MTs SA Al Mina, di mana tanaman menunjukkan pertumbuhan tunas baru lebih cepat daripada fase sebelum diberikan POC.



Gambar 2. Pertambahan Jumlah daun Tanaman Sebelum Dan Sesudah Pemberian POC



Gambar 3. Pertumbuhan Tanaman Sebelum Dan Sesudah POC

Selain manfaat fisiologis pada tanaman, penggunaan POC juga memberikan dampak ekologis pada kualitas tanah di area penanaman. POC meningkatkan porositas tanah serta meningkatkan populasi mikroorganisme menguntungkan seperti bakteri pelarut fosfat (*phosphate solubilizing bacteria*). Menurut Chen et al. (2020), keberadaan mikroorganisme ini membantu mempercepat mineralisasi unsur hara dari bentuk kompleks menjadi bentuk yang mudah diserap oleh akar tanaman. Oleh karena itu, pemberian POC secara teratur dapat menjaga stabilitas ekosistem tanah, terutama di area dengan kondisi tanah yang cenderung miskin bahan organik seperti halaman madrasah.

Dari perspektif pendidikan lingkungan, pemanfaatan POC untuk tanaman hias di madrasah menjadi salah satu bentuk implementasi nyata konsep *eco-school* dan pembelajaran berbasis proyek (*Project Based Learning*, PjBL). Peserta didik terlibat dalam proses mulai dari pemilahan limbah MBG, pembuatan POC, hingga pemantauan pertumbuhan tanaman. Keterlibatan ini meningkatkan kompetensi saintifik siswa, khususnya dalam hal observasi, pengukuran, pencatatan data pertumbuhan, serta interpretasi hasil. Penelitian Aini & Rahmasari (2022) menyebutkan bahwa keterlibatan peserta didik dalam aktivitas pengelolaan limbah dan pertanian organik dapat meningkatkan kesadaran ekologis dan literasi lingkungan secara signifikan.

Program ini tidak hanya memberikan manfaat biologis pada tanaman, tetapi juga meningkatkan estetika lingkungan madrasah. Tanaman yang tumbuh lebih subur menciptakan suasana belajar yang lebih nyaman serta mendukung pembangunan karakter siswa melalui pembiasaan perilaku peduli lingkungan. Dengan demikian, pemanfaatan POC di MTs SA Al Mina Bandungan membuktikan bahwa pengelolaan limbah makanan tidak hanya menjadi solusi ekologis untuk mengurangi timbunan sampah, tetapi juga menjadi sarana pendidikan berkelanjutan (*education for sustainable development*).

Secara keseluruhan, penggunaan POC hasil pengolahan limbah MBG memberikan manfaat multidimensional, yaitu (1) meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman hias, (2) memperbaiki kesuburan tanah, (3) menciptakan lingkungan madrasah yang lebih hijau dan sehat, serta (4) meningkatkan kesadaran dan kompetensi ekologis warga sekolah. Temuan ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya oleh Kusumawati et al. (2020) yang menunjukkan bahwa aplikasi POC organik mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman hias hingga lebih dari 30% dibandingkan tanaman tanpa perlakuan. Dengan demikian, implementasi pemanfaatan POC di madrasah dapat dijadikan model praktik pengelolaan limbah sekolah yang efektif, berkelanjutan, dan mudah direplikasi di berbagai satuan pendidikan lainnya.

Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Makanan Dalam Skala Besar

Pengelolaan limbah makanan dalam skala besar merupakan isu strategis yang berkaitan langsung dengan keberlanjutan lingkungan, efisiensi sumber daya, serta mitigasi perubahan iklim. Limbah makanan yang tidak ditangani secara sistematis berpotensi memberikan tekanan signifikan terhadap Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), memicu peningkatan emisi gas metana, serta menimbulkan dampak ekologis dan sosial yang luas. Oleh karena itu, berbagai pendekatan teknologi dan manajemen berbasis prinsip ekonomi sirkular telah dikembangkan untuk mengubah limbah makanan menjadi sumber daya bernilai tambah. Strategi-strategi tersebut tidak hanya bertujuan mengurangi timbunan limbah, tetapi juga meningkatkan manfaat ekologis dan sosial bagi masyarakat dan institusi pendidikan.

Salah satu metode pengelolaan limbah makanan berskala besar yang banyak digunakan adalah pengomposan aerob (*aerobic composting*). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa limbah makanan memiliki rasio C/N yang memungkinkan terjadinya dekomposisi optimal dalam kondisi beroksigen. Liu et al. (2021) mencatat bahwa proses pengomposan aerob mampu menghasilkan kompos berkualitas tinggi dalam waktu 4–6 minggu, dengan kandungan unsur hara makro yang mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kemampuan tanah menyimpan air, serta menstimulasi aktivitas mikroorganisme menguntungkan. Dalam skala institusi, metode ini relatif mudah diterapkan dengan dukungan fasilitas yang memadai, seperti mesin pencacah, shelter kompos, serta sistem aerasi yang terkontrol.

Metode lain yang semakin populer dalam pengelolaan limbah makanan adalah biokonversi menggunakan larva *Black Soldier Fly* (BSF). Surendra et al. (2020) menunjukkan bahwa larva BSF memiliki kemampuan dekomposisi yang sangat efisien terhadap bahan organik berkelembapan tinggi seperti limbah makanan. Dalam kondisi ideal, larva dapat mengurangi volume limbah hingga 50–70% dalam waktu 10–14 hari. Produk samping dari metode ini berupa biomassa larva yang kaya protein dan dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak berkelanjutan, serta *frass* (residu) yang dapat digunakan sebagai pupuk organik. Pendekatan ini sangat relevan bagi pengelolaan limbah berskala institusional dan perkotaan, karena mampu mengonversi limbah secara cepat serta mendukung praktik ekonomi sirkular.

Selain kedua metode tersebut, pemanfaatan lubang biopori juga menjadi strategi pengelolaan limbah makanan yang efektif dan ramah lingkungan. Lubang resapan biopori (LRB) berfungsi sebagai struktur infiltrasi air sekaligus tempat dekomposisi sampah organik di dalam tanah. Pertiwi et al. (2020) melaporkan bahwa penggunaan biopori dapat meningkatkan laju infiltrasi tanah hingga 60%, mengurangi genangan air, serta mempercepat proses penguraian bahan organik oleh fauna tanah seperti cacing dan mikroorganisme dekomposer. Dalam konteks pengelolaan limbah skala besar, biopori merupakan metode yang ekonomis, sederhana, dan dapat diperbanyak di berbagai ruang terbuka seperti halaman sekolah, fasilitas publik, maupun permukiman.

Ketiga pendekatan tersebut (pengomposan aerob, biokonversi BSF, dan lubang biopori) menunjukkan bahwa limbah makanan bukan sekadar residu yang harus dibuang, tetapi merupakan sumber daya potensial yang dapat diolah menjadi produk bernilai ekonomi dan ekologis. Secara konseptual, pengelolaan limbah makanan dalam skala besar mendukung implementasi *reduce, reuse, recycle* (3R), serta berkontribusi terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) terutama pada tujuan 11 (kota dan komunitas berkelanjutan), tujuan 12 (konsumsi dan produksi berkelanjutan), serta tujuan 13 (penanganan perubahan iklim).

Dalam konteks lembaga pendidikan seperti madrasah, penerapan berbagai model pengelolaan limbah makanan skala besar memberikan manfaat tambahan berupa nilai edukatif. Siswa dapat mempelajari siklus materi, pengelolaan lingkungan, dan teknologi ramah lingkungan melalui praktik langsung. Dengan integrasi ke dalam pembelajaran IPA maupun proyek Profil Pelajar Pancasila (P5), institusi pendidikan berpotensi menjadi pusat inovasi pengolahan limbah sekaligus agen perubahan perilaku ramah lingkungan pada generasi muda.

Dengan demikian, pengelolaan limbah makanan dalam skala besar tidak hanya menekankan aspek teknis pengolahan, namun juga mencakup dimensi sosial, edukatif, dan ekologis. Praktik-praktik berbasis teknologi tepat guna seperti pengomposan aerob, biokonversi BSF, dan biopori dapat diadopsi pada berbagai tingkat lembaga, termasuk madrasah, sebagai bagian dari upaya menciptakan lingkungan belajar yang berkelanjutan dan berwawasan ekologis. Pendekatan ini mempertegas bahwa solusi terhadap permasalahan limbah makanan membutuhkan komitmen kolektif, integrasi lintas-sektor, serta penerapan teknologi yang adaptif terhadap kebutuhan lokal.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur yang dipadukan dengan temuan praktik lapangan di MTs SA Al Mina Bandung, dapat disimpulkan bahwa limbah makanan dari program Makanan Bergizi Gratis (MBG) memiliki potensi sebagai sumber daya organik apabila dikelola melalui teknologi pengolahan yang tepat. Limbah MBG yang didominasi oleh sisa nasi, sayuran, lauk, dan buah merupakan bahan organik mudah terurai. Jika tidak dikelola secara benar, maka akan berpotensi meningkatkan timbunan sampah, memperbesar risiko emisi gas metana, serta menurunkan kualitas kebersihan dan kesehatan lingkungan madrasah. Implementasi pengolahan limbah MBG menjadi pupuk organik cair (POC) melalui proses fermentasi terbukti mampu mereduksi volume limbah secara signifikan, mengurangi potensi pembentukan gas rumah kaca, serta menghasilkan produk pupuk cair yang efektif dalam meningkatkan kualitas tanah dan pertumbuhan tanaman di lingkungan madrasah. Selain manfaat ekologis, program ini juga memberikan dampak edukatif berupa peningkatan kesadaran lingkungan pada peserta didik, pembiasaan perilaku pemilahan sampah, dan penguatan budaya madrasah

berwawasan lingkungan. Dengan demikian, pengolahan limbah MBG menjadi POC tidak hanya relevan sebagai strategi pengurangan limbah dan mitigasi dampak lingkungan, tetapi juga dapat dijadikan model pengelolaan *food waste* berbasis madrasah yang berkelanjutan, adaptif, dan mudah direplikasi pada satuan pendidikan lainnya.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Tadris Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Negeri Salatiga atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama proses penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Ahmad Minan Zuhri, selaku dosen pembimbing, atas arahan, bimbingan ilmiah, serta masukan konstruktif yang sangat membantu dalam penyempurnaan penelitian ini. Selain itu, penulis mengapresiasi kontribusi semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam bentuk bantuan data, referensi ilmiah, serta diskusi yang memperkaya perspektif penelitian ini. Kepada seluruh narasumber dan lembaga penyedia data, penulis menyampaikan terima kasih atas akses informasi yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Akhirnya, penulis berharap hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta menjadi rujukan bagi upaya pengelolaan limbah makanan yang berkelanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- Agus, F. (2000). Kontribusi bahan organik untuk meningkatkan produksi pangan pada lahan kering bereaksi masam. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Sumber Daya Lahan: Buku III* (Cisarua, Bogor, 9–11 Februari 1999). Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Aini, N., & Rahmasari, A. (2022). Environmental literacy improvement through school-based waste management programs. *Journal of Environmental Education Research*, 14(2), 110–125.
- Andhika, R., & Agung, A. (2016). Pemanfaatan limbah organik menjadi biogas ramah lingkungan. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 22(1), 45–52.
- Bau, D., Rahayu, M., & Pratama, Y. (2022). Household food waste generation and behavioral factors influencing disposal practices. *Journal of Environmental Management*, 318, 115–128.
- Chaerul, M., & Zatadini, A. (2020). Pengaruh sikap dan norma subjektif terhadap perilaku membuang sisa makanan pada masyarakat urban. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan*, 12(2), 145–154.
- Chen, J., Wu, S., & Xu, M. (2020). Soil microbial community responses to organic fertilizer applications: A meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 145, 103–118.
- Huang, Y., Lin, Z., & Chen, W. (2023). Greenhouse gas emissions from municipal food waste: A systematic analysis of landfill degradation processes. *Waste Management*, 157, 34–46.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2019). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.
- Kusumawati, L., Handayani, N., & Putra, A. (2020). Effectiveness of liquid organic fertilizer on ornamental plant growth. *Agrohort Journal*, 8(1), 55–63.
- Larasati, A. A., & Puspikawati, S. (2019). Pengolahan sampah sayuran menjadi kompos dengan metode Takakura. *Jurnal Ikesma*, 15(2), 61.
- Lingga, P., & Marsono, M. (2019). *Petunjuk penggunaan pupuk*. Penebar Swadaya.
- Liu, X., Wang, J., & Zhao, L. (2021). Aerobic composting of household food waste: Process optimization and quality assessment. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101–156.
- Luna, P., & Suryana, E. A. (2022). Implementasi sistem pengelolaan food loss and waste (FLW) di Indonesia sebagai inisiatif presidensi G20. *Jurnal Analis Kebijakan*, 6(1), 46–61.
- Nasir, I., Rahman, S., & Karim, A. (2022). Methane production from food waste under anaerobic digestion: A review of influencing factors. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 158, 112–238.
- Nugroho, A., Yuliani, R., & Prasetyo, D. (2021). Impact of EM4-based liquid organic fertilizers on plant growth performance. *Journal of Organic Agriculture*, 12(1), 35–42.
- Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 70/Permentan/SR.140/10/2011.
- Pertiwi, L. N., Nugroho, S. P., & Wicaksono, A. (2020). Efektivitas lubang biopori dalam meningkatkan infiltrasi dan mempercepat dekomposisi sampah organik. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 421–430.
- Puger, A. (2018). Analisis timbulan dan karakteristik sampah organik pasar tradisional sebagai sumber energi alternatif. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 14(2), 67–74.
- Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. (2021). Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.

- Sudarman, S. (2010). Pengaruh gas metana dari tempat pembuangan akhir terhadap lingkungan. *Jurnal Sains Atmosfer*, 5(1), 12–20.
- Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., & Khanal, S. K. (2020). Bioconversion of organic wastes by black soldier fly larvae: A review of recent advances. *Waste Management*, 110, 202–214.
- Tamara, V., Mulyana, I. J., & Gunawan, I. (2020a). Pemodelan pengelolaan food waste di jaringan grocery store dengan sistem dinamis. *Widya Teknik*, 19(1), 49–58.
- Tamara, V., Mulyana, I. J., & Gunawan, I. (2020b). Pemodelan pengelolaan food waste di jaringan grocery store dengan sistem dinamis. *Scientific Journal Widya Teknik*, 19(1).
- UNEP. (2021). *Food waste index report 2021*. United Nations Environment Programme.
- Wang, S., Li, Y., & Chen, Q. (2020). Methane emission potential from municipal solid waste landfills: Influence of waste composition and climatic conditions. *Science of the Total Environment*, 703, 135–147.
- Widarti, A., Sutrisno, S., & Antara, M. (2020). Liquid organic fertilizer and its influence on soil biological properties. *Soil Science and Agroecology*, 9(2), 87–95.