



Efektivitas Penggunaan Air Nanobubble dalam Meningkatkan Pertumbuhan Tanaman: A Mini Review

Mery Delvina^{1*}, Abdul Razak², Skunda Diliarosta³

¹Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Negeri Padang

²Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

³Departemen Pendidikan Ipa, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*merydelvinaaa@gmail.com, ar210371@fmipa.unp.ac.id, skunda@fmipa.unp.ac.id

Abstrak

Pertanian merupakan sektor vital dalam ketahanan pangan global yang terus menghadapi berbagai tantangan, termasuk perubahan iklim, keterbatasan lahan, dan kebutuhan untuk meningkatkan produktivitas. Dalam menghadapi tantangan tersebut, inovasi teknologi menjadi kunci utama untuk mengoptimalkan hasil pertanian. Jenis penelitian ini mengadopsi pendekatan studi kepustakaan yang mengedepankan proses pengumpulan data melalui penelaahan sumber-sumber literatur. Metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini mengikuti beberapa tahapan sistematis, meliputi pengkajian literatur, penentuan judul, penyaringan abstrak, pemilihan naskah lengkap, dan penyusunan mini-review. Hasil dari penelitian ini mengemukakan bahwa Air nanobubble merupakan inovasi teknologi yang menghadirkan gelembung berukuran 1-100 nanometer dalam media udara. Teknologi ini memiliki keunggulan berupa muatan permukaan negatif yang tinggi, stabilitas jangka panjang hingga berminggu-minggu, dan kemampuan meningkatkan kadar oksigen terlarut secara signifikan. Karakteristik uniknya mencakup modifikasi struktur molekul udara yang menciptakan sifat hidrofobik-hidrofilik, serta distribusi gelembung yang lebih merata karena ukurannya yang nano mengurangi kecenderungan penggabungan atau pengapungan. Pelepasan oksigen yang bertahap mendukung proses biologis seperti pertumbuhan akar dan aktivitas mikroorganisme. Dengan berbagai keunggulan tersebut, air nanobubble memiliki potensi besar dalam penerapan pertanian modern, terutama dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi dibandingkan sistem irigasi konvensional.

Kata Kunci: Air NanoBubble, Pertumbuhan Tanaman, A Mini Review

PENDAHULUAN

Pertanian merupakan sektor vital dalam ketahanan pangan global yang terus menghadapi berbagai tantangan, termasuk perubahan iklim, keterbatasan lahan, dan kebutuhan untuk meningkatkan produktivitas (Raihansyah et al., 2024). Dalam menghadapi tantangan tersebut, inovasi teknologi menjadi kunci utama untuk mengoptimalkan hasil pertanian (Tasya & Silvia, 2024). Salah satu teknologi yang menjanjikan adalah penggunaan air nanobubble dalam sistem pertanian modern (Fevria et al., 2023). Teknologi nanobubble merupakan terobosan yang relatif baru dalam bidang pertanian, dimana gelembung-gelembung berukuran nano (1-100 nanometer) diintegrasikan ke dalam air. Keunikan teknologi ini terletak pada ukuran gelembung yang sangat kecil, memungkinkan penetrasi yang lebih efektif ke dalam jaringan tanaman dan tanah. Karakteristik ini membuka potensi besar untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi dalam sistem pertanian (Tama et al., 2024).

Air nanobubble memiliki beberapa karakteristik fisik yang menguntungkan, termasuk muatan negatif tinggi, stabilitas yang baik, dan kemampuan meningkatkan kadar oksigen terlarut. Gelembung berukuran nano ini dapat bertahan lebih lama dalam air dibandingkan gelembung biasa, memberikan efek yang lebih berkelanjutan pada sistem pertanian (Wang et al., 2023). Salah satu aspek penting dari air nanobubble adalah kemampuannya dalam meningkatkan oksigenasi pada zona perakaran tanaman. Peningkatan kadar oksigen di sekitar akar dapat menstimulasi pertumbuhan akar, meningkatkan penyerapan nutrisi, dan menciptakan lingkungan yang lebih optimal untuk mikroorganisme tanah yang menguntungkan (Zhou et al., 2019).

Penelitian awal mengenai aplikasi air nanobubble dalam pertanian telah menunjukkan hasil yang menjanjikan di berbagai jenis tanaman. Beberapa studi melaporkan peningkatan signifikan dalam pertumbuhan vegetatif, perkembangan akar, dan hasil panen pada berbagai jenis tanaman yang diirigasi dengan air nanobubble (Xue et al., 2023). Efisiensi penggunaan air menjadi semakin kritis dalam konteks perubahan iklim global. Teknologi nanobubble menawarkan solusi potensial dengan meningkatkan efektivitas setiap tetes air yang digunakan dalam irigasi. Karakteristik unik air nanobubble memungkinkan penyerapan air yang lebih baik oleh tanaman, potentially mengurangi jumlah air yang dibutuhkan untuk irigasi (Pal, & Anantharaman, 2022).

Dalam aspek fisiologi tanaman, air nanobubble dapat mempengaruhi berbagai proses metabolisme. Peningkatan oksigenasi dan karakteristik fisikokimia khusus dari air nanobubble dapat mempengaruhi fotosintesis, respirasi, dan berbagai proses biokimia lainnya dalam tanaman, yang pada akhirnya berkontribusi pada pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang lebih baik (Zhang et al., 2024). Implementasi teknologi nanobubble dalam sistem pertanian modern juga sejalan dengan konsep pertanian berkelanjutan. Penggunaan air nanobubble dapat mengurangi ketergantungan pada input kimia dengan meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi dan menciptakan kondisi yang lebih baik untuk pertumbuhan tanaman secara alami (Wanget al., 2021).

Studi tentang interaksi antara air nanobubble dan mikrobiota tanah menjadi area penelitian yang menarik. Peningkatan oksigenasi dan karakteristik khusus air nanobubble dapat mempengaruhi populasi dan aktivitas mikroorganisme menguntungkan dalam tanah, yang berperan penting dalam kesehatan tanaman dan kesuburan tanah (Chen et al., 2023). Aspek ekonomi dari implementasi teknologi nanobubble juga perlu dipertimbangkan. Meskipun investasi awal untuk sistem nanobubble mungkin relatif tinggi, potensi peningkatan hasil panen dan efisiensi penggunaan sumber daya dapat memberikan pengembalian investasi yang menguntungkan dalam jangka panjang (Paradhiba et al., 2021).

Dalam konteks perubahan iklim, teknologi nanobubble dapat membantu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan. Peningkatan efisiensi penggunaan air dan nutrisi dapat membantu tanaman lebih baik dalam menghadapi kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan seperti kekeringan atau suhu ekstrem. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami mekanisme spesifik bagaimana air nanobubble mempengaruhi pertumbuhan tanaman pada tingkat seluler dan molekuler. Pemahaman ini akan membantu mengoptimalkan aplikasi teknologi nanobubble dalam berbagai kondisi dan jenis tanaman yang berbeda (Yan et al., 2023).

Standardisasi dan optimasi teknologi nanobubble untuk aplikasi pertanian masih menjadi tantangan. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan parameter optimal seperti ukuran gelembung, konsentrasi, dan metode aplikasi yang paling efektif untuk berbagai jenis tanaman dan kondisi pertumbuhan. Integrasi teknologi nanobubble dengan sistem pertanian presisi modern membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi produksi pertanian. Kombinasi dengan sensor, otomatisasi, dan analisis data dapat memaksimalkan manfaat teknologi ini dalam sistem pertanian modern (Babu & Amamcharla, 2023).

Dampak lingkungan dari penggunaan air nanobubble juga perlu dievaluasi secara komprehensif. Meskipun teknologi ini menjanjikan dari segi efisiensi penggunaan sumber daya, penelitian jangka panjang diperlukan untuk memastikan keberlanjutan dan keamanan lingkungannya. Peran air nanobubble dalam meningkatkan kualitas hasil pertanian juga menjadi fokus penelitian. Beberapa studi awal menunjukkan potensi peningkatan tidak hanya dalam kuantitas tetapi juga kualitas nutrisi dari hasil panen yang menggunakan teknologi ini (Zhao et al., 2023).

Adopsi teknologi nanobubble dalam skala komersial memerlukan pertimbangan berbagai faktor termasuk infrastruktur, pelatihan operator, dan sistem pendukung teknis. Pengembangan ekosistem pendukung ini penting untuk memastikan implementasi yang sukses dalam skala besar. Transfer teknologi dan pengembangan kapasitas menjadi aspek penting dalam memperluas penggunaan teknologi nanobubble. Kolaborasi antara peneliti, industri, dan petani diperlukan untuk mengoptimalkan adopsi teknologi ini dalam berbagai konteks pertanian (Roy & Swamy, 2024).

Evaluasi efektivitas penggunaan air nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman menjadi krusial untuk memvalidasi potensi teknologi ini sebagai solusi untuk tantangan pertanian modern. Penelitian sistematis dengan metodologi yang ketat diperlukan untuk mengukur dan mendokumentasikan manfaat spesifik dari aplikasi teknologi ini dalam berbagai kondisi pertanian (Ali & Dahlhaus, 2022). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan air nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, dengan fokus pada parameter pertumbuhan spesifik dan mekanisme yang mendasarinya.

METODE

Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini mengadopsi pendekatan studi kepustakaan yang mengedepankan proses pengumpulan data melalui penelaahan sumber-sumber literatur. Dalam prosesnya, peneliti melakukan eksplorasi dan investigasi mendalam terhadap objek penelitian dengan memanfaatkan informasi yang termuat dalam berbagai sumber akademik, khususnya jurnal ilmiah. Sebagai bentuk kajian literatur, penelitian ini melibatkan analisis komprehensif dan evaluasi kritis terhadap konsep, gagasan, dan temuan yang ada dalam publikasi akademis. Tujuan utamanya adalah menghasilkan sumbangsih pemikiran, baik secara teoretis maupun metodologis, yang selaras dengan subjek penelitian. Dalam hal pengumpulan data, penelitian ini bersandar pada data sekunder, yang diperoleh bukan melalui pengamatan langsung di lapangan, melainkan dari hasil riset terdahulu. Adapun sumber data sekunder yang digunakan mencakup artikel dan jurnal yang membahas tentang efektifitas penggunaan air Nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman (Putra et al., 2023).

Metode Penelitian

Metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini mengikuti beberapa tahapan sistematis, meliputi pengkajian literatur, penentuan judul, penyaringan abstrak, pemilihan naskah lengkap, dan penyusunan mini-review. Pencarian artikel dilaksanakan melalui platform Google Scholar dengan menggunakan frasa kunci " efektifitas penggunaan air Nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman ", dibatasi pada publikasi yang terbit antara tahun 2023 sampai 2024. Artikel yang sesuai dengan parameter pencarian kemudian dikumpulkan untuk ditelaah secara mendalam.

Tinjauan literatur ini secara khusus menggunakan dokumen yang tersedia dalam format PDF dengan akses penuh dan telah melewati proses peer review dalam jurnal ilmiah. Adapun kriteria pemilihan sumber dibatasi pada artikel berbahasa Indonesia dan Inggris yang berfokus pada efektifitas penggunaan air Nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Literature review ini dilakukan untuk mengetahui tentang efektifitas penggunaan air Nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan teknik pengumpulan literatur yang sudah ada mengenai efektifitas penggunaan air Nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman. Literatur yang terkumpul dianalisis dengan tabel Critical Appraisal untuk menjawab tujuan dari pengukuran dan dibandingkan dengan hasil pengukuran sederhana. Terdapat 8 literatur yang membahas tentang penggunaan air Nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, semua jurnal tersebut adalah jurnal nasional yang dilakukan pencarian diportal google scholar dengan mengetik kata kunci “penggunaan air Nanobubble dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman” yang kemudian dianalisis menggunakan analisis critical appraisal untuk menganalisis dari inti jurnal dan hasil studi. Berikut ini adalah tabel analisis critical appraisal dari 8 jurnal:

Tabel 1. Hasil Review

Nama dan Tahun	Judul	Metode	Hasil
Putri & Razak, 2024	Pengaruh Pupuk Organik Cair (POC) Teknologi Nano Dari Limbah Perut Ikan Tuna Mata Besar (<i>Thunnus obesus</i>) Terhadap Pertumbuhan Tanaman Cabai Merah (<i>Capsicum annum L.</i>)	Metode yang digunakan dalam penelitian adalah rancangan acak lengkap (RAL) dengan 5 perlakuan dan 5 pengulangan.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian pupuk organik cair teknologi nano dari limbah ikan Tuna Mata Besar berpengaruh terhadap semua parameter pengamatan. Konsentrasi optimal dari semua parameter pengamatan adalah 100 ml POC/polibag.
Afiah & Fevria, 2024)	Pengaruh POC Teknologi Nano terhadap Pertumbuhan Bayam Merah (<i>Amaranthus tricolor L.</i>) yang Dibudidayakan secara Hidroponik	Metode yang digunakan adalah rancangan acak lengkap (RAL) dengan 3 perlakuan dan 5 kali ulangan	Hasil yang diperoleh dari pengaruh POC nanoteknologi terhadap pertumbuhan tanaman bayam merah dapat dilihat dari rata-rata tinggi tanaman P1 yaitu 18,74 cm, rata-rata jumlah daun 35,2 (helai), berat basah 15,84 g, berat kering 1,4 g. Aplikasi pupuk organik cair nanoteknologi memberikan hasil yang berbeda nyata terhadap pertumbuhan tanaman bayam.
Faradila et al., 2023	The Growth of the Red Lactus (<i>Lactuca sativa L.</i> var. <i>Crispa</i>) After Using Nano Technology Liquid Organic Fertilizer Hydroponically cultivated	Metode yang digunakan dalam penelitian adalah rancangan acak lengkap (RAL) dengan 5 perlakuan dan 4 pengulangan.	Pemberian pupuk organik cair teknologi nano terhadap pertumbuhan selada merah (<i>Lactuca sativa L.</i> var. <i>Crispa</i>) yang dibudidayakan secara hidroponik mempengaruhi pertumbuhan tinggi tanaman, luas daun, jumlah daun, berat basah dan berat kering.
Putri et al., 2023	The Effect of Nano Technology Liquid Organic Fertilizer on The Growth of Red Spinach (<i>Amaranthus tricolor L.</i>) Cultivated Hydroponic	Penelitian ini dilakukan dengan metode RAL (Rancangan Acak Lengkap) yang terdiri dari 6 perlakuan dan 4 kali ulangan	Hasil penelitian ini adalah penggunaan pupuk organik cair dengan teknologi nano berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman bayam merah, hal ini terlihat pada tanaman tertinggi pada P4 dengan tinggi tanaman 37,20 cm dengan rata-rata jumlah daun tertinggi pada P4, Kontrol dan P1 dengan jumlah daun 28 helai, rata-rata luas permukaan daun tertinggi yaitu 19,95 cm ² pada P3, rata-rata berat basah tertinggi yaitu 2,85 g pada kontrol, rata-rata berat kering tertinggi pada P1. 0,67 g
Fevria et al., 2023	Application of Nanotechnology Liquid Organic Fertilizer in Sustainable Hydroponic Cultivation for Urban	Metode yang digunakan adalah metode multidimensional scaling (MDS).	Hasil pemetaan hidroponik menunjukkan terdapat 22 pembudidaya hidroponik dengan total akumulasi produksi sebanyak 10.000 lubang tanam/bulan yang selanjutnya didistribusikan ke swalayan

	Food Security		skala besar di Kota Padang dengan berbagai jenis sayuran hidroponik.
Antara et al., 2023	Analysis of the Effect of Providing MNBs Organic Liquid Fertilizer on the Growth of Pueraria Javanica Plants in Coal Mining Areas.	Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimen dengan rancangan penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) 4 x 6.	Hasil penelitian ini adalah pemberian larutan NPK dan Micro Nano Bubbles (MNBs) terbukti dapat membantu mempercepat pertumbuhan batang, jumlah daun, jumlah cabang daun, panjang akar dan meningkatkan biomassa tanaman Kacang Ruji (<i>Pueraria Javanica</i>) pada media tanam dengan lapisan tanah atas minimal.
Marcelino et al., 2023	Nanobubble technology applications in environmental and agricultural systems: Opportunities and challenges	Metode yang digunakan adalah metode kualitatif.	Minat terhadap beragam aplikasi teknologi nanobubble terus meningkat. Mengingat sifat fisikokimianya yang unik, seperti ukuran yang sangat kecil ($< 1 \mu\text{m}$), muatan permukaan, dan tekanan internal yang tinggi, nanobubble (NB) dapat memberikan peluang baru dalam bidang rekayasa lingkungan (termasuk remediasi lingkungan, pengolahan air, fermentasi aerobik, pencernaan anaerobik, dan produksi biomassa alga), dan pertanian (termasuk agronomi, hortikultura, akuakultur, akuaponik, bioponik, dan hidroponik).
Roisiah & Fevria, 2023	The Effect of Nano Technology Liquid Organic Fertilizer on the Growth of Kailan (<i>Brassica oleraceae var. alboglabra</i>) Grown	Penelitian ini dilakukan dengan metode RAL (Rancangan Acak Lengkap) yang terdiri dari 6 perlakuan dan 4 kali ulangan	Hasil penelitian ini yaitu pengaruh penggunaan pupuk organik cair teknologi nano terhadap pertumbuhan tanaman kailan dapat dilihat pada tanaman tertinggi yaitu pada P1 dengan tinggi tanaman 23,10 cm, jumlah daun terbanyak pada P2 yaitu 12,50 helai, luas daun terbanyak pada P1 dengan luas 17.6000 cm ² , berat basah tertinggi pada P1 yaitu 11,84 g, dan berat kering tertinggi pada P1 yaitu 1,06 g. Penggunaan pupuk organik cair dengan teknologi nano memberikan pengaruh terhadap pertumbuhan tanaman kailan yang dibudidayakan secara hidroponik.

PEMBAHASAN

Karakteristik Air NanoBubble

Air nanobubble merupakan inovasi teknologi yang mengandung gelembung berukuran nano (1-100 nanometer) yang terdispersi dalam media air. Gelembung nano ini memiliki muatan permukaan negatif yang tinggi, mempengaruhi tegangan permukaan air dan meningkatkan kemampuan penetrasinya. Struktur molekul air di sekitar gelembung nano mengalami modifikasi, menciptakan karakteristik hidrofobik-hidrofilik yang unik (Caurasia, 2023). Stabilitas gelembung nano menjadi keunggulan utama teknologi ini dibandingkan gelembung konvensional. Dengan waktu tinggal dalam air mencapai beberapa minggu hingga bulan, stabilitas ini dicapai karena tekanan internal yang tinggi dan gaya tegangan permukaan yang kuat. Ukuran nano mengurangi kecenderungan gelembung untuk bergabung atau mengapung, memungkinkan distribusi lebih merata dalam sistem (Kyzas et al., 2021).

Kandungan oksigen terlarut dalam air nanobubble mencapai level beberapa kali lipat lebih tinggi dari titik jenuh normal air. Pelepasan oksigen terjadi secara gradual saat gelembung pecah, menciptakan suplai oksigen berkelanjutan. Tingginya kandungan oksigen terlarut ini mendukung proses biologis seperti pertumbuhan akar dan aktivitas mikroorganisme dalam rizosfer (Pal et al., 2022). Karakteristik unik air nanobubble menjadikannya potensial untuk berbagai aplikasi, terutama di bidang pertanian. Kemampuannya meningkatkan oksigenasi, penetrasi yang efektif, dan stabilitas jangka panjang memberikan keunggulan signifikan dibanding sistem irigasi konvensional. Sifat-sifat ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi penggunaan air dan nutrisi dalam sistem pertanian modern (Khan et al., 2020).

Pengaruh Air Nanobubble pada Pertumbuhan Vegetatif



Air nanobubble memberikan pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman melalui beberapa mekanisme. Peningkatan oksigenasi di zona perakaran merangsang perkembangan sistem akar yang lebih baik, yang secara langsung mendukung pertumbuhan bagian atas tanaman. Tinggi tanaman menunjukkan peningkatan yang lebih cepat karena pembelahan dan pemanjangan sel yang optimal, didukung oleh penyerapan nutrisi yang lebih efisien. Perkembangan daun juga menunjukkan respons positif terhadap aplikasi air nanobubble. Jumlah daun meningkat secara signifikan, disertai dengan peningkatan luas daun yang lebih besar. Hal ini terjadi karena peningkatan aktivitas fotosintesis dan metabolisme tanaman yang didukung oleh ketersediaan oksigen dan nutrisi yang optimal. Daun yang terbentuk juga menunjukkan warna hijau yang lebih pekat, mengindikasikan kandungan klorofil yang lebih tinggi (Wu et al., 2019).

Diameter batang tanaman yang diirigasi dengan air nanobubble menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik. Peningkatan ini terkait dengan translokasi nutrisi dan fotosintat yang lebih efisien dari akar ke seluruh bagian tanaman. Batang yang lebih kokoh ini memberikan dukungan struktural yang lebih baik untuk pertumbuhan tanaman secara keseluruhan. Biomassa tanaman mengalami peningkatan substansial dengan penggunaan air nanobubble, tercermin dari berat basah dan berat kering yang lebih tinggi. Peningkatan ini merupakan hasil kumulatif dari pertumbuhan yang lebih baik pada semua parameter vegetatif, didukung oleh efisiensi fotosintesis yang lebih tinggi dan metabolisme yang optimal. Distribusi biomassa antara akar dan tajuk juga menunjukkan keseimbangan yang lebih baik, mengindikasikan pertumbuhan tanaman yang sehat dan proporsional (Bian et al., 2024).

Efek Air Nanobubble pada Sistem Perakaran

Air nanobubble memberikan pengaruh signifikan terhadap morfologi dan pertumbuhan sistem perakaran tanaman. Ketersediaan oksigen yang tinggi di zona perakaran memicu pembentukan akar lateral dan rambut akar yang lebih banyak, menghasilkan peningkatan panjang akar total. Sistem perakaran yang berkembang lebih ekstensif ini meningkatkan kemampuan tanaman dalam mengeksplorasi volume tanah yang lebih besar untuk penyerapan air dan nutrisi. Volume akar tanaman yang diirigasi dengan air nanobubble menunjukkan peningkatan substansial dibandingkan dengan irigasi konvensional. Peningkatan ini terkait dengan percabangan akar yang lebih intensif dan pembentukan jaringan akar yang lebih padat. Volume akar yang lebih besar ini berkontribusi pada peningkatan kapasitas penyerapan dan stabilitas tanaman secara keseluruhan (Bram et al., 2022).

Biomassa akar mengalami peningkatan signifikan sebagai respons terhadap air nanobubble. Hal ini terlihat dari berat kering akar yang lebih tinggi, menunjukkan akumulasi bahan organik yang lebih efisien dalam jaringan akar. Peningkatan biomassa ini mencerminkan perkembangan struktural yang lebih baik dan kapasitas fungsional sistem perakaran yang lebih tinggi. Densitas akar dalam profil tanah juga menunjukkan peningkatan dengan penggunaan air nanobubble. Distribusi akar yang lebih merata dalam volume tanah mengoptimalkan efisiensi penyerapan air dan nutrisi. Peningkatan densitas akar ini juga berkontribusi pada perbaikan struktur tanah dan peningkatan aktivitas mikroorganisme rizosfer, yang pada gilirannya mendukung pertumbuhan tanaman secara keseluruhan (Huang et al., 2023).

Respons Fisiologis Tanaman

Penggunaan air nanobubble mempengaruhi laju fotosintesis tanaman secara signifikan. Ketersediaan oksigen yang tinggi di zona perakaran meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi, yang secara langsung mendukung pembentukan klorofil dan aktivitas fotosintesis. Peningkatan ini terlihat dari tingkat asimilasi karbon yang lebih tinggi dan produksi biomassa yang lebih efisien. Konduktansi stomata tanaman menunjukkan perubahan positif dengan aplikasi air nanobubble. Regulasi pembukaan dan penutupan stomata menjadi lebih efisien, memungkinkan pertukaran gas yang optimal antara daun dan atmosfer. Peningkatan konduktansi stomata ini berkontribusi pada peningkatan laju fotosintesis dan efisiensi penggunaan air yang lebih baik (Dahrazma et al., 2019).

Kandungan klorofil dalam daun mengalami peningkatan dengan penggunaan air nanobubble. Hal ini terlihat dari warna daun yang lebih hijau dan pengukuran konsentrasi klorofil yang lebih tinggi. Peningkatan kandungan klorofil ini berkorelasi langsung dengan kapasitas fotosintesis yang lebih besar dan produksi biomassa yang lebih tinggi. Efisiensi penggunaan air menunjukkan peningkatan substansial pada tanaman yang diirigasi dengan air nanobubble. Karakteristik unik air nanobubble memungkinkan penyerapan air yang lebih efektif oleh akar, sementara regulasi stomata yang lebih baik mengurangi kehilangan air melalui transpirasi. Kombinasi ini menghasilkan rasio biomassa yang dihasilkan per unit air yang digunakan menjadi lebih tinggi (Khan et al., 2022).

Perbandingan Penggunaan Air NanoBubble Dengan Metode Konvensional

Efisiensi penggunaan air menunjukkan perbedaan signifikan antara sistem nanobubble dan konvensional. Air nanobubble memungkinkan penyerapan air yang lebih efektif oleh akar tanaman, dengan peningkatan efisiensi hingga 30-40% dibandingkan irigasi konvensional. Gelembung nano memfasilitasi penetrasi air yang lebih baik ke dalam jaringan tanaman dan distribusi yang lebih merata dalam zona perakaran. Tingkat pertumbuhan tanaman menunjukkan keunggulan sistem nanobubble dibanding metode konvensional. Parameter pertumbuhan seperti tinggi tanaman, biomassa, dan perkembangan akar menunjukkan peningkatan 20-35%. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan oksigen yang lebih tinggi dan penyerapan nutrisi yang lebih efisien dalam sistem nanobubble (Syabana et al., 2024).

Analisis biaya-manfaat mengungkapkan bahwa meskipun investasi awal sistem nanobubble lebih tinggi, penghematan jangka panjang dalam penggunaan air dan peningkatan produktivitas memberikan nilai ekonomi yang lebih baik. Periode pengembalian investasi berkisar antara 2-3 tahun, tergantung pada skala operasi dan jenis tanaman. Aspek keberlanjutan sistem menunjukkan keunggulan air nanobubble dalam hal dampak lingkungan. Pengurangan penggunaan air, minimalisasi limpasan, dan potensi pengurangan penggunaan pupuk kimia memberikan kontribusi positif terhadap keberlanjutan lingkungan. Sistem nanobubble juga menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap variasi kondisi lingkungan dibanding sistem konvensional (Singh et al., 2024).

KESIMPULAN

Hasil dari penelitian ini mengemukakan bahwa Air nanobubble merupakan inovasi teknologi yang menghadirkan gelembung berukuran 1-100 nanometer dalam media udara. Teknologi ini memiliki keunggulan berupa muatan permukaan negatif yang tinggi, stabilitas jangka panjang hingga berminggu-minggu, dan kemampuan meningkatkan kadar oksigen terlarut secara signifikan. Karakteristik uniknya mencakup modifikasi struktur molekul udara yang menciptakan sifat hidrofobik-hidrofilik, serta distribusi gelembung yang lebih merata karena ukurannya yang nano mengurangi kecenderungan penggabungan atau pengapungan. Pelepasan oksigen yang bertahap mendukung proses biologis seperti pertumbuhan akar dan aktivitas mikroorganisme. Dengan berbagai keunggulan tersebut, air nanobubble memiliki potensi besar dalam penerapan pertanian modern, terutama dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi dibandingkan sistem irigasi konvensional. Adapun keterbatasan penulisan ini berupa, data dalam penelitian ini hanya berdasarkan referensi yang penulis peroleh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada para dosen di lingkungan Universitas Negeri Padang, terkhusus Program Studi Ilmu Lingkungan, sekolah pascasarjana yang telah banyak memberikan masukan, saran dan bimbingannya, sehingga terselesaikan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, B., & Dahlhaus, P. (2022). The role of FAIR data towards sustainable agricultural performance: a systematic literature review. *Agriculture*, 12(2), 309. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020309>
- Antara, Y., Razak, A., Umar, I., Gusman, M., & Efendi, N. (2023). Analysis of the Effect of Providing MNBs Organic Liquid Fertilizer on the Growth of Pueraria Javanica Plants in Coal Mining Areas. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(11), 10317-10329.
- Afiah, A., & Fevria, R. (2024). Pengaruh POC Teknologi Nano terhadap Pertumbuhan Bayam Merah (*Amaranthus tricolor* L.) yang Dibudidayakan secara Hidroponik. *MASALIQ*, 4(1), 332-343. <https://doi.org/10.58578/masaliq.v4i1.2543>
- Babu, K. S., & Amamcharla, J. K. (2023). Generation methods, stability, detection techniques, and applications of bulk nanobubbles in agro-food industries: A review and future perspective. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(28), 9262-9281. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2067119>
- Bian, Q., Dong, Z., Zhao, Y., Feng, Y., Fu, Y., Wang, Z., & Zhu, J. (2024). Phosphorus Supply Under Micro-Nano Bubble Water Drip Irrigation Enhances Maize Yield and Phosphorus Use Efficiency. *Plants*, 13(21), 3046. <https://doi.org/10.3390/plants13213046>
- Baram, S., Weinstein, M., Evans, J. F., Berezkin, A., Sade, Y., Ben-Hur, M., ... & Mamane, H. (2022). Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration. *Scientia Horticulturae*, 291, 110550. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110550>
- Chen, W., Bastida, F., Liu, Y., Zhou, Y., He, J., Song, P., ... & Li, Y. (2023). Nanobubble oxygenated increases crop production via soil structure improvement: The perspective of microbially mediated effects. *Agricultural Water Management*, 282, 108263. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108263>
- Chaurasia, G. (2023). Nanobubbles: an emerging science in nanotechnology. *MGM Journal of Medical Sciences*, 10(2), 327-334. DOI: https://doi.org/10.4103/mgmj.MGMJ_59_23
- Dahrazma, B., Naghedinia, A., Ghasemian Gorji, H., & Saghravani, S. F. (2019). Morphological and physiological responses of Cucumis sativus L. to water with micro-nanobubbles. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1), 181-192. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-15964-en.html>
- Faradila, N., Fevria, R., Vauzia, V., & Putri, I. L. E. . (2023). The Growth of the Red Lactus (*Lactuca sativa* L. var. Crispa) After Using Nano Technology Liquid Organic Fertilizer Hydroponically cultivated. *Jurnal Biologi Tropis*, 23(2), 68-74. <https://doi.org/10.29303/jbt.v23i2.4719>
- Fevria, R., Razak, A., Syah, N., & Kamal, E. (2023). Application of Nanotechnology Liquid Organic Fertilizer in Sustainable Hydroponic Cultivation for Urban Food Security. *Science & Technology Asia*, 295-304. Retrieved from <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/SciTechAsia/article/view/250787>
- Huang, M., Nhung, N. T. H., Wu, Y., He, C., Wang, K., Yang, S., ... & Fujita, T. (2023). Different nanobubbles mitigate cadmium toxicity and accumulation of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in hydroponic cultures. *Chemosphere*, 312, 137250. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137250>
- Khan, P., Zhu, W., Huang, F., Gao, W., & Khan, N. A. (2020). Micro-nanobubble technology and water-related application. *Water Supply*, 20(6), 2021-2035. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.121>

- Kyzas, G. Z., Mitropoulos, A. C., & Matis, K. A. (2021). From microbubbles to nanobubbles: effect on flotation. *Processes*, 9(8), 1287. <https://doi.org/10.3390/pr9081287>
- Khan, P., Wang, H., Gao, W., Huang, F., Khan, N. A., & Shakoor, N. (2022). Effects of micro-nano bubble with CO₂ treated water on the growth of Amaranth green (*Amaranthus viridis*). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(47), 72033-72044. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20896-6>
- Marcelino, K. R., Ling, L., Wongkiew, S., Nhan, H. T., Surendra, K. C., Shitanaka, T., ... & Khanal, S. K. (2023). Nanobubble technology applications in environmental and agricultural systems: Opportunities and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(14), 1378-1403. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2136931>
- Putri, R., & Razak, A. (2024). Pengaruh Pupuk Organik Cair (POC) Teknologi Nano Dari Limbah Perut Ikan Tuna Mata Besar (*Thunnus obesus*) Terhadap Pertumbuhan Tanaman Cabai Merah (*Capsicum annum* L.). *Jurnal Serambi Biologi*, 9(2), 199-207. <https://doi.org/10.24036/srmb.v9i2.353>
- Putri, F. S., Fevria, R., M, D., & Putri, I. L. E. (2023). The Effect of Nano Technology Liquid Organic Fertilizer on The Growth of Red Spinach (*Amaranthus tricolor* L.) Cultivated Hydroponic. *Jurnal Biologi Tropis*, 23(2), 491-497. <https://doi.org/10.29303/jbt.v23i2.4872>
- Pal, P., & Anantharaman, H. (2022). CO₂ nanobubbles utility for enhanced plant growth and productivity: Recent advances in agriculture. *Journal of CO₂ Utilization*, 61, 102008. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102008>
- Paradhiba, A. M., Febriyanti, F., Rahmadania, E., Yanisa, F., Adelina, F. U., & Mukti, R. C. (2021, December). Pemanfaatan Teknologi Nanobubble untuk Produksi *Anguilla* sp pada Era Society 5.0. In *Seminar Nasional Lahan Suboptimal* (Vol. 9, No. 2021, pp. 435-444). <https://conference.unsri.ac.id/index.php/lahansuboptimal/article/view/2178>
- Putra, S. E., Dewata, I., Barlian, E., Syah, N., Fatimah, S., Erianjoni, E., ... & Sholichin, M. (2023). Peran Kearifan Lokal Masyarakat Suku Mentawai dalam Upaya Mitigasi Bencana: Sistemik Review. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 10(2), 88-96. <http://dx.doi.org/10.31258/dli.10.2.p.88-96>
- Pal, P., Joshi, A., & Anantharaman, H. (2022). Nanobubble ozonation for waterbody rejuvenation at different locations in India: A holistic and sustainable approach. *Results in Engineering*, 16, 100725. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100725>
- Roisiah, Q., & Fevria, R. (2024). The Effect of Nano Technology Liquid Organic Fertilizer on the Growth of Kailan (*Brassica oleraceae* var. *alboglabra*) Grown. *Jurnal Serambi Biologi*, 8(4), 485-491. <https://doi.org/10.24036/srmb.v8i4.251>
- Raihansyah, M. Z., Kurniawan, A., Fauzi, A., Pamungkas, C. A., & Radianto, D. O. (2024). Membangun Definisi, Konsep, Manajemen Dan Pemahaman Baru Tentang Pertanian Maritim. *Stratēgo: Jurnal Manajemen Modern*, 6(2). <https://journalpedia.com/1/index.php/jmm/article/view/1155>
- Roy, S., & Swamy, N. (2024). Modern Water Treatment Methods: Exploring Public Acceptance and Socio-economic Factors Influencing Their Implementation. In *Water Management in Developing Countries and Sustainable Development* (pp. 55-77). *Singapore: Springer Nature Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8639-2_4
- Syabana, I. A., Hartini, R. S., & Kurniasari, A. (2024, November). Greenhouse Rooftop Hydroponic Integrated with Ultra Fine Bubbles Technology in Cultivating Curly Lettuce as an Effort to Realize Zero Hunger and Sustainable City. In *NaCIA (National Conference on Innovative Agriculture)* (pp. 47-53). <https://doi.org/10.25047/nacia.v2i1.255>
- Singh, E., Kumar, A., & Lo, S. L. (2024). Advancing nanobubble technology for carbon-neutral water treatment and enhanced environmental sustainability. *Environmental Research*, 118980. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118980>
- Tasya, N., & Silvia, V. (2024). Peran Inovasi Teknologi Dalam Meningkatkan Efisiensi Ekonomi Pertanian. *JSSTEK- Jurnal Studi Sains dan Teknik*, 2(1), 90-97. <https://doi.org/10.3342/jsstek.v2i1.24>
- Tama, D. P., Zahra, V., Ikhsan, Z., Najmi, L., Nelly, N., & Lina, E. C. (2024). Sosialisasi Inovasi Insektisida Botani Menggunakan Teknologi Nanobubbles Sebagai Pengendali Hama Tanaman Hortikultura. *Buletin Dharmas Andalas*, 1(2), 59-63. <https://doi.org/10.25077/bda.v1i2.17>
- Wu, Y., Lyu, T., Yue, B., Tonoli, E., Verderio, E. A., Ma, Y., & Pan, G. (2019). Enhancement of tomato plant growth and productivity in organic farming by agri-nanotechnology using nanobubble oxygation. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(39), 10823-10831. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04117>
- Wang, Y., Wang, S., Sun, J., Dai, H., Zhang, B., Xiang, W., ... & Zhang, W. (2021). Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production. *Science of the Total Environment*, 800, 149627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149627>
- Wang, X., Li, P., Ning, R., Ratul, R., Zhang, X., & Ma, J. (2023). Mechanisms on stability of bulk nanobubble and relevant applications: A review. *Journal of Cleaner Production*, 139153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139153>
- Xue, S., Gao, J., Liu, C., Marhaba, T., & Zhang, W. (2023). Unveiling the potential of nanobubbles in water: Impacts on tomato's early growth and soil properties. *Science of the Total Environment*, 903, 166499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166499>

- Yan, D., Xue, S., Zhang, Z., Xu, G., Zhang, Y., Gao, J., & Zhang, W. (2023). Air nanobubble water improves plant uptake and tolerance toward cadmium in phytoremediation. *Environmental Pollution*, 337, 122577. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122577>
- Zhao, L., Teng, M., Zhou, L., Li, Y., Sun, J., Zhang, Z., & Wu, F. (2023). Hydrogen nanobubble water: a good assistant for improving the water environment and agricultural production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(33), 12369-12371. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04582>
- Zhou, Y., Zhou, B., Xu, F., Muhammad, T., & Li, Y. (2019). Appropriate dissolved oxygen concentration and application stage of micro-nano bubble water oxygation in greenhouse crop plantation. *Agricultural Water Management*, 223, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105713>
- Zhang, F., Li, S., Wang, L., & Li, X. (2024). An Innovative Approach to Alleviate Zinc Oxide Nanoparticle Stress on Wheat through Nanobubble Irrigation. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(3), 1896. <https://doi.org/10.3390/ijms25031896>