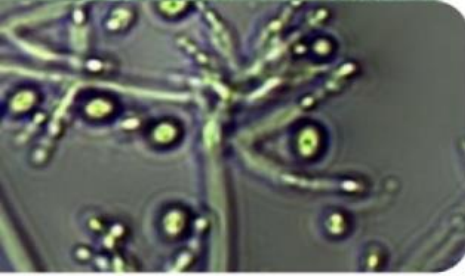
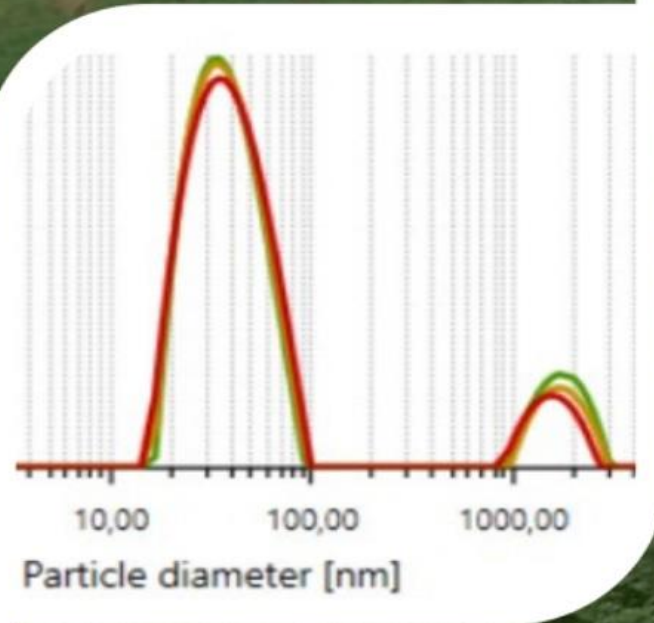
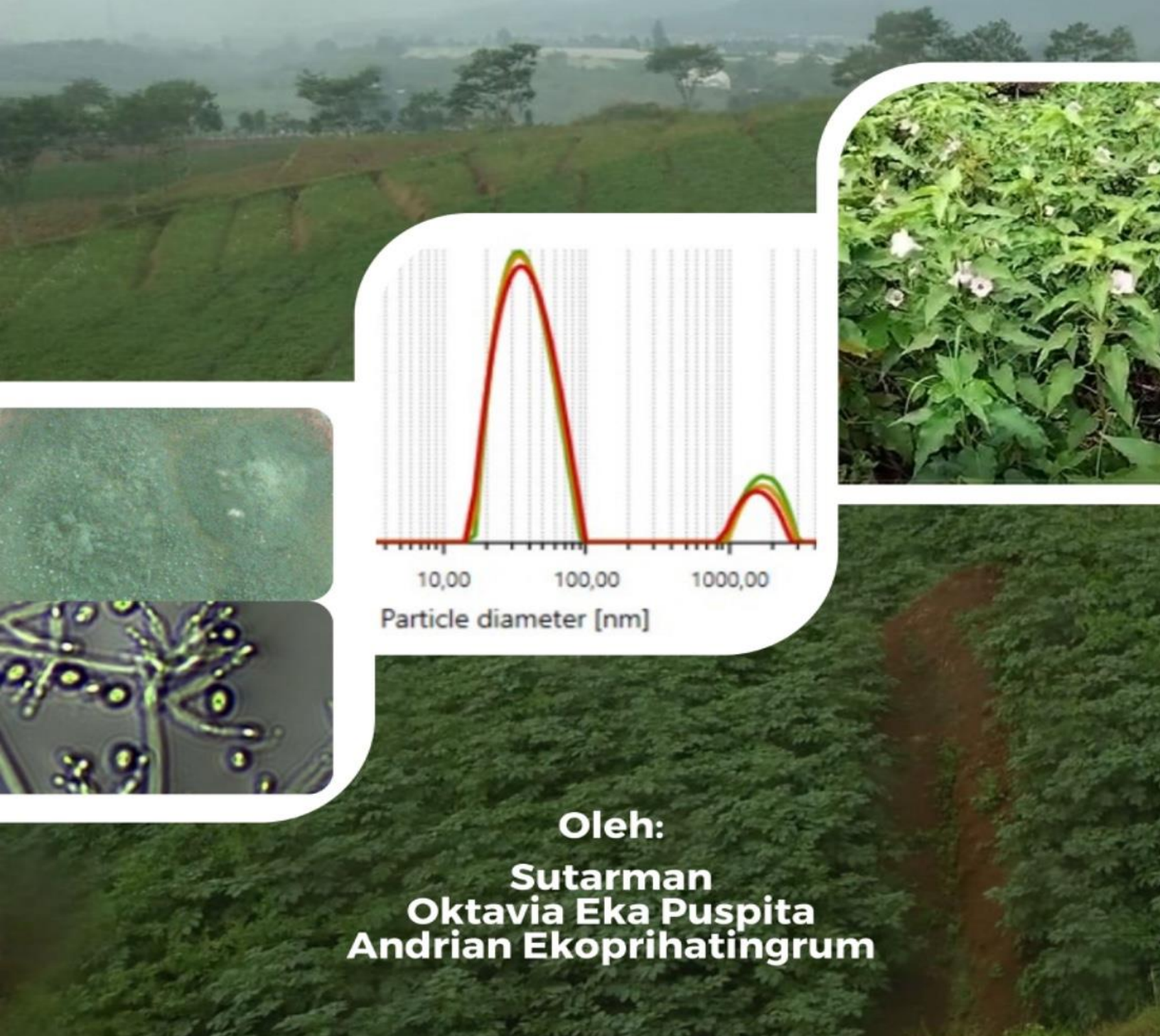


BIOPESTISIDA NANOPARTIKEL BIONOKULAN FUNGI UNTUK PERLINDUNGAN KESEHATAN TANAMAN HORTIKULTUR



Oleh:
Sutarman
Oktavia Eka Puspita
Andrian Ekoprihatingrum

Biopestisida Nanopartikel BioinokulanFungi Untuk Perlindungan
Kesehatan Tanaman Hortikultur

Oleh

Sutarman
Oktavia Eka Puspita
Andriani Eko Prihatiningrum



Anggota APPTI Nomor : 002.018.1.09.2017
Anggota IKAPI Nomor : 218/Anggota Luar Biasa/JTI/2019

Diterbitkan oleh
UMSIDA PRESS
Jl. Mojopahit 666 B Sidoarjo
ISBN: 978-623-464-108-0
Copyright©2024
Authors
All rights reserved

Biopestisida Nanopartikel Bioinokulan Fungi Untuk Perlindungan Kesehatan Tanaman Hortikultur

Penulis: Sutarman; Oktavia Eka Puspita; Andriani Eko Prihatiningrum

ISBN: 978-623-464-108-0

Editor: Prof. Dr. Ir. Dyah Roeswitawati, MS

Copy Editor: Dyah Satiti

Design Sampul dan Tata Letak: Wiwit Wahyu Wijayanti

Penerbit: UMSIDA Press

Redaksi: Universitas Muhammadiyah Sidoarjo Jl. Mojopahit No

666B Sidoarjo, Jawa Timur

Cetakan Pertama, Desember 2024

Hak Cipta © 2024 Sutarman; Oktavia Eka Puspita; Andriani Eko Prihatiningrum

Pernyataan Lisensi Creative Commons Attribution (CC BY)

Buku ini dilisensikan di bawah Creative Commons AttributionShareAlike 4.0 International License (CC BY). Lisensi ini memungkinkan Anda untuk:

Membagikan — menyalin dan mendistribusikan buku ini dalam bentuk apapun atau format apapun.

Menyesuaikan — mengubah, mengubah, dan membangun karya turunan dari buku ini.

Namun, ada beberapa persyaratan yang harus Anda penuhi dalam penggunaan buku ini:

Atribusi — Anda harus memberikan atribusi yang sesuai, memberikan informasi yang cukup tentang penulis, judul buku, dan lisensi, serta menyertakan tautan ke lisensi CC BY.

Penggunaan yang Adil — Anda tidak boleh menggunakan buku ini untuk tujuan yang melanggar hukum atau melanggar hak-hak pihak lain.

Dengan menerima dan menggunakan buku ini, Anda menyetujui untuk mematuhi persyaratan lisensi CC BY sebagaimana diuraikan di atas.

Catatan: Pernyataan hak cipta dan lisensi ini berlaku untuk buku ini secara keseluruhan, termasuk semua konten yang terkandung di dalamnya, kecuali disebutkan sebaliknya. Hak cipta dari website, aplikasi, atau halaman eksternal yang dijadikan contoh, dipegang dan dimiliki oleh sumber aslinya.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas tersusunnya Buku dengan judul: “Biopestisida Nanopartikel Bioinokulan Fungi untuk Perlindungan Kesehatan Tanaman Hortikultur” yang merupakan salah satu luaran penelitian hibah Kemendikbudristek dalam skema Penelitian Terapan 2024.

Buku ini disusun berdasarkan kajian referensi yang bersumber pada hasil riset yang terpublikasi dalam berbagai artikel jurnal Internasional relevan terkait. Materi dalam buku ini dapat digunakan sebagai bahan ajar dan kajian dalam mata kuliah Manajemen Budidaya Tanaman Hortikultur, Pengelolaan Hamavdan Penyakit Tanaman, dan mata kuliah lain yang relevan baik pada Prodi Agroteknologi maupun prodi lain dengan keminatan yang relevan. Rerfeensi dalam buku ini dapat ditelusuri dan dimanfaatkan bagi kebutuhan riset dosen,tugas akhir mahasiswa, dan bahan ajar mata kuliah lain.

Sustansi kajian dalam buku ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan pemerhati, pembelajar, periset, dan pemangku kepentingan lainnya dalam partisipasi menjawab tantangan anomali iklim sebagai dampak pemanasan global sekaligus upaya mewujudkan ketahanan pangan Nasional.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada: Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Kemendikbudristek RI atas hibah Peneilitian Terapan 2024. Penghargaan juga diberikan kepada Rektor Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (UMSIDA) atas dukungan moril dan fasilitas yang disediakan bagi kelancaran penelitian danpenyusunan buku ini.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat.

Sidoarjo, Nopember 2024

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Hortikultura dan Ketahanan Pangan	1
1.2 Permasalahan Efektivitas Pestisida	4
1.3 Biopestisida Nanopartikel Alternatif Cerdas	5
1.4 Tujuan	6
2. TEKNOLOGI NANOPARTIKEL	8
2.1 Prinsip Nanopartikel Pertanian	8
2.2 Sintesis Nano	10
3. FUNGI AGEN HAYATI	16
3.1 Jenis dan Karakteristik Agen Hayati Potensial Efektif	16
3.1.1 Trichoderma	16
3.1.2 Aspergillus	19
3.1.3 Entomopatogen	20
3.2 Determinasi Jenis	21
3.3 Peran Biokontrol dan Biofertilisasi	24
3.4 Nanobiofertilizer	26
4. PENGUJIAN FORMULA	29
4.1 Validasi	29
4.2 Evaluasi Respons Tanaman	33
4.3 Keunggulan Biopestisida Nanopartikel	39
5. TEKNIK PERLINDUNGAN TANAMAN HORTIKULTURA	42
5.1 Prinsip Aplikasi Biopestisida Nano	42
5.2 Aplikasi pada Tanah	44
5.3 Aplikasi pada Tajuk	47
6. PEMBAHASAN UMUM	49
6.1 Biopestisida Nano dan Bioagent	49
6.2 Nanofertilizer Meningkatkan Kesuburan Tanah dan Hasil	52
7. PENUTUP	55
DAFTAR PUSTAKA	57

DAFTAR TABEL

Halaman

3.1	Berbagai ukuran nanopartikel serta pengaruhnya terhadap jenis penyakit tanaman	26
4.1	Skala skor gejala kerusakan tanaman cabe rawit (<i>Capsicum frutescens</i>) akibat serangan penyakit tanaman pada tiap petak percobaan.....	32
4.2	Kriteria tingkat serangan hama ulat pada tanaman.....	32
4.3	Hasil uji-t pengaruh aplikasi biofertilizer/biopestisida terhadap tinggi dan jumlah cabang tanaman tiga minggu setelah tanam.....	36
4.4	Hasil uji-t pengaruh aplikasi biofertilizer/biopestisida terhadap indeks gejala busuk fusarium (<i>Fusarium rot</i>) yang disebabkan oleh <i>Fusarium oxysporum</i> dan hawar tajuk (<i>Leaf blight</i>) yang disebabkan oleh <i>Phytophthora palmivora</i> tanaman pada dua dan empat minggu setelah tanam.....	38

DAFTAR GAMBAR

Halaman

1.1	Konsumsi cabe masyarakat Indonesia 2019-2023.....	2
2.1	Ilustrasi dua pendekatan sintesis AgNPs	9
2.2	Ilustrasi sintesis hijau AgNPs dari berbagai ekstrak seperti bagian tanaman dan mikroorganisme	10
2.3	Diagram menguraikan proses biosintesis untuk nanopartikel logam menggunakan bahan biologis	12
2.4	Sintesis nanopartikel hijau, parameter metode dan aplikasi dalam pertanian berkelanjutan	15
3.1	Hasil pengamatan morfologi makroskopis dan mikroskopis <i>Trichoderma eperellum</i>	17
3.2	Morfologi koloni secara makroskopis dan jalinanhifa serta spora <i>Trichoderma esperellum</i> isolate Tc-27 agen biokontrol	18
3.3	Hasil pengamatan morfologi makroskopis dan mikroskopis <i>Aspergillus As-015</i>	19
3.4	Karakter morfologi isolat <i>Metarrhizium anipsoliae</i> Ma-05 agenmentopatogen terhadap hama	20
3.5	Penampilan morfologi <i>B. Bassiana</i> . secara makroskopis dan mikroskopis	21
3.6	Urutan nukleosida sekuens DNA isolate Tc-013 dan As-022	23
3.7	Filogenetik isolat Tc-013 dan As-022	24
3.8	Mekanisme fungsional nanobiofertilizer pada tanaman	27
4.1	Aplikasi, pengambilan, translokasi, dan biodistribusi nanofertilizer dalam sel-sel tanaman	30

4.2	Penempatan propagul pathogen pada <i>dualculture</i> dan <i>monoculture</i> untuk menguji daya hambat BNP terhadap patogen.....	31
4.3	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap tinggi tanaman cabe kecil 6 minggu setelah tanam	34
4.4	Penampilan tanaman cabe yang diberi dan tanpa aplikasi biofertilizer/ biopestisida Trichoderma pada 6 minggu setelah tanam	34
4.5	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap jumlah daun tanaman cabe kecil 6 minggu setelah tanam	35
4.6	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap indeks gejala gangguan kesehatan tanaman cabe kecil 6 minggu setelah tanam.....	35
4.7	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap pertumbuhan tunas kentang pada satu minggu setelah tanam	36
4.8	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap tinggi tanaman kentang pada tiga minggu setelah tanam	37
4.9	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap jumlah tunas/cabang tanaman kentang pada tiga minggu setelah tanam.....	37
4.10	Penampilan tanamn kentang pada tiga minggu setelah tanam	37
4.11	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap indeks penyakit busuk Fusarium tanaman kentang pada tiga minggu setelah tanam	39
4.12	Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap indeks penyakit hawar daun (leaf blight) tanaman kentang pada empat minggu setelah tanam	39
5.1	Nanopartikel ZnO (NP) meningkatkan aktivitas enzim pemobilisasi P	45

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Hortikultura dan Ketahanan Pangan

Ketahanan pangan nasional adalah kemampuan masyarakat suatu negara dalam menyediakan kebutuhan pangan dan/atau mengakses sumber bahan pangan. Dengan demikian masyarakat mampu mendapatkan bahan pangan meskipun tidak mampu memproduksinya. Dalam hal ini negara mampu mengimpor kebutuhan pangan yang tidak dapat diproduksi atau dibudidaya oleh masyarakatnya. Bahan pangan bukan hanya berasal dari produk budidaya tanaman pangan, tetapi juga tanaman hortikultura serta dari peternakan, perikanan, perkebunan, dan kehutanan. Produk hortikultur juga memegang peranan penting bagi ketahanan pangan. Kebutuhan pangan berasal dari produk hortikultur di antaranya berbagai jenis sayur-mayur dan buah-buahan

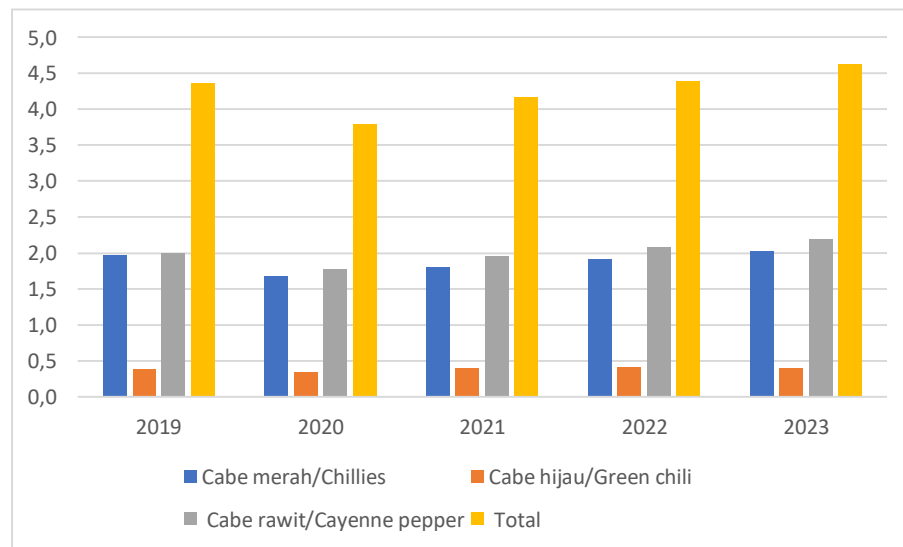
Jika mengacu pada proyeksi dalam perspektif global, Menurut FAO- Perserikatan Bangsa-Bangsa produksi pangan dunia harus ditingkatkan sebesar 50- 60% untuk memenuhi kebutuhan manusia yang populasinya mencapai sekitar 10 miliar pada tahun 2050 [1]. Melalui pengembangan potensi sumberdaya yang dimiliki, Indonesia sudah mulai mempersiapkan agar menjadi sumber pangan dunia saat usianya mencapai 100 tahun dan diproyeksikan menjadi negara maju. Oleh karenanya rencana aksi Nasional bukan hanya mempertahankan ketahanan pangan tetapi juga mengembangkannya sesuai pertumbuhan penduduk dan tuntutan masyarakat Nasional bahkan juga masyarakat dunia khususnya yang tidak memiliki sumberdaya penghasil bahan pangan.

Suatu negara yang masyarakatnya mampu membudidayakan tanaman untuk menghasilkan bahan pangan tertentu sering kali mendapat ancaman bagi ketahanan opangannya, misalnya adanya dampak kekeringan dan banjir yang berkepanjangan, tsunami, serta berbagai kendala akibat gangguan baik yang bersifat biotis maupun abiotis pada sentra-sentra produksi bahan pangan tertentu.

Beberapa komoditas hortikultur dapat memunculkan goncangan social dan ekonomi termasuk menyumbangkan inflasi. Kelangkaan cabe rawit

misalnya saja telah memunculkan spekulasi di pasar komoditas dan membulatkan keresahan masyarakat.

Salah satu komoditas hortikultur strategis yang kelangkaannya di pasar selalu memunculkan polemik dan kegaduhan social bahkan dapat berujung kepada krisis kepercayaan kepada pemerintah adalah cabe. Konsumsi cabe per kapita terhadap ketiga macam jenis cabe dan total cabe di perlihatkan pada Gambar 1.1. Data lengkap yang dipublikasikan Sekretaris Jendral Kementrian Pertanian (2024) [2] menunjukkan ketersediaan cabe perkapita pada tahun 2019 dan 2021 adalah 4,60 dan 4,69 Kg atau secara total Nasional 1.258.000 ton (2019) dan 1.296.000 ton (2021); sementara itu produksi Nasional mencapai 1.214.000 ton (2019) dan 1.264.000 ton (2021). Dari data tersebut tampak adanya import untuk memenuhi kebutuhan Nasional. Dalam kondisi normal tampak bahwa ketahanan pangan khusus dalam pemenuhan kebutuhan capai terjaga meski ada ekspor sebesar 2,5-3,6% dari volume kebutuhan. Namun demikian segenap pemangku kepentingan memiliki tekad yang sama untuk menihlkan impor bahkan dapat melakukan ekspor agar dapat meningkatkan cadangan devisa sekaligus meningkatkan kesejahteraan petani.



Gambar 1.1. Konsumsi cabe masyarakat Indonesia 2019-2023 (Kg per kapita)

Potensi kerawanan berupa ancaman ketahanan pangan juga dapat terjadi pada beberapa komoditas tanaman hortikultur lainnya. Ancaman biasanya bersifat kompleks terdiri dari yang bersifat biotis dan abiotis. Salah satu gangguan biotis yang sering ditemui adalah serangan hama dan penyakit di samping adanya penurunan tingkat kesuburan tanah lahan pertanian akibat penggunaan bahan kimia sintetis baik sebagai pupuk maupun pesisida, kemasaman tanah, peningkatan salinitas akibat endapan air irigasi dan akibat genangan air laut yang terjadi akibat rob. Penurunan kesuburan tanah tampak masif termasuk pada lahan kering yang biasa ditanami tanaman hortikultura dan lahan kering marginal yang sesungguhnya sangat potensial sebagai sumber produksi hortikultur.

Potensi produksi hortikultur sebagai penjamin ketahanan pangan sesungguhnya sangat tinggi mengingat banyak lahan potensial belum dapat dimanfaatkan secara optimal. Selain itu berbagai kendala senantiasa menunggu di hadapan kita.

Indonesia sebagai bagian dari dunia tidak luput dari berbagai kendala dalam menjaga ketersediaan bahan pangan. Beberapa tantangan yang mengancam kegagalan dalam menyediakan kebutuhan pangan adalah menghalangi tercapainya tujuan masalah di antaranya adalah ini gangguan hama dan penyakit tanaman penghasil bahan pangan, resistensi pestisida, pemanasan global, kondisi iklim yang buruk, polusi agroekosistem dan hunian [3]. Penyakit tanaman merupakan penyebab utama kerugian ekonomi dalam budidaya tanaman penghasil bahan pangan, menyebabkan peningkatan biaya produksi, bahkan penggunaan pestisida untuk pengendaliannya telah mengancam kesehatan manusia, kesehatan lingkungan, dan keanekaragaman hayati [4]. Lonjakan kejadian serangan penyakit tanaman secara global juga telah mengancam upaya pencapaian tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) sekaligus memengaruhi kapasitas banyak negara di dunia dalam mewujudkan harapan pembangunan berkelanjutan [5]. Berbagai fakta dan hasil riset menunjukkan bahwa ketergantungan pestisida kimia sintetis toksik dalam pengendalian hama dan penyakit ternyata berdampak negatif bagi kesehatan dan menimbulkan gangguan metabolisme bagi manusia [6], berkontribusi pada meningkatnya resistensi antimikroba [7]. Untuk itu upaya untuk meningkatkan pembatasan penggunaan bahan kimia pertanian berbahaya harus menjadi prioritas [8]. Paralel dengan upaya tersebut, pencarian solusi inovatif untuk meningkatkan produktivitas pertanian) harus diutamakan agar kesenjangan antara pasokan pangan dan permintaan global dapat ditekan semaksimal mungkin dan ketergantungan pada

agrokimia konvensional makin ditekn seminimal mungkin [9-10].

Beberapa pendekatan inovatif telah muncul sebagai alternatif agrokimia konvensional untuk mengatasi penyakit tanaman dan pengganggu tanaman lainnya. Di antara pendekatan tersebut, probiotik dan mikroba pemacu pertumbuhan tanaman saat ini semakin mendapat perhatian sebagai agen pengendalian hayati yang efektif, termasuk pemanfaatan *Trichoderma* dan biopestisida lainnya.

1.2 Permasalahan Efektivitas Pestisida

Untuk mengatasi kendala gangguan hama dan penyakit tanaman sejauh ini selalu mengandalkan pestisida terutama yang bahan aktifnya berupa kimia sintetis toksik. Upaya untuk mempertahankan ketahanan pangan dengan cara ini ternyata berdampak pada penurunan daya dukung tanah dan lahan sebagai agroekosistem dalam menjaga produktivitas pertanian [11-12], memunculkan resistensi terhadap pestisida pada organisme hama dan patogen penyebab penyakit [13], di samping mengakibatkan gangguan kesehatan manusia dan pencemaran lingkungan [14].

Permasalahannya adalah bahwa aplikasi pupuk, pestisida dan bahan efektif lainnya secara konvensional seringkali tidak efektif karena berukuran besar lebih dari 100 mikrometernya yang akan dihambat oleh berbagai komponen fisik di dalam tanah bila diaplikasikan sebagai soil treatment dan di permukaan daun sebagai hasil penyemprotan [15]. Partikel yang lebih besar mempunyai kecenderungan untuk beragregasi di ruang antar-sel pada jaringan tanaman [16-17]. Performa sel-sel bioinokulan dan partikel organik biopestisida yang ditempatkan menjadi rendah menyebabkan aplikasi tidak efisien bagi target peningkatan peran perlindungan dan pendukung pertumbuhan tanaman [18].

Upaya pemecahan masalahnya adalah menciptakan bahan pembawa dan bahan pengisi dalam formulasi bioinokulan dalam ukuran nano. Nanopartikel memungkinkan bergerak melintasi simplas melalui plasmodesmata sehingga senyawa fitohormon dan metabolit yang terkandung dalam bahan yang menyertai propagul fungi agen hayati akan efektif mencapai sasarannya dan mempengaruhi respons tanaman yang positif meski dalam jumlah yang jauh lebih kecil [19-20]. Pada kondisi stress abiotik di dalam tanah mampu, nanopartikel dapat meningkatkan konsentrasi nutrisi dan ketersediaannya, meningkatkan serapan K^+ dan rasio K^+/Na^+ , meningkatkan aktivitas enzim antioksidan, serta mengurangi

kerusakan membran plasma dan klorofil daun [21-22].

Penggunaan nanopartikel bukan hanya berfokus pada pengendalian hama dan pathogen penyebab penyakit tanaman pertanian dan fasilitasi adopsi nanoteknologi hijau sebagai alternatif yang layak untuk agen antimikroba konvensional, tetapi juga bertujuan untuk meningkatkan produktivitas pertanian [23]. Penerapan nanoteknologi dan penggunaan nanomaterial hasil rekayasa di mana dengan memanfaatkan beberapa jenis logam seperti perak, tembaga, seng, titanium, karbon, dan lainnya, memiliki potensi besar dalam pengendalian dan pengelolaan kesehatan dan kesuburan tanaman [24].

Dalam rangka makin meningkatkan status formulasi pestisida nanopartikel yang ramah lingkungan, maka teknik sintesis nano diarahkan agar menghasilkan produk yang efektif pada patogen tanaman dan aman bagi organisme non-target. Pemanfaatan agen hayati baik yang memberikan efek biofertilisasi dan/atau sekaligus sebagai agen biokontrol dapat kiranya memberikan prospek yang cerah di masa mendatang.

1.3 Bioestisida Nanopartikel Alternatif Cerdas

Hasil pegujian menunjukkan bahwa nanopartikel menciptakan agregasi osmolit yang mengarah pada peningkatan adaptasi osmotik dan keseimbangan air tanaman [25], meningkatkan aktivitas fotosintesis, meningkatkan regulasi aquaporin, mengubah air intraseluler metabolisme, mengakumulasi zat terlarut yang kompatibel, mempertahankan keseimbangan ion antarsel, meningkatkan kepadatan stomata, dan menurunkan kehilangan air dari daun melalui penutupan stomata karena peningkatan akumulasi ABA [26-27]. Selain itu nanopartikel pada tanaman meningkatkan fotofosforilasi, evolusi oksigen, dan kapasitas fotosintesis; meningkatkan aktivitas enzim antioksidan; mengurangi peroksidasi lipid; dan mengembalikan distorsi ultrastruktural kloroplas dan inti [28].

Bioinokulan yang terformulasi dalam nanopartikel melibatkan interaksi makromolekul sel, protein, dan lipopolisakarida [29] yang mempengaruhi respons fisiologi tanaman baik secara langsung misalnya menyediakan nutrisi bagi tanaman maupun tidak langsung melalui induksi dihasilkannya metabolit agen hayati yang mendorong pertumbuhan [30-31], termasuk menginduksi peningkatan sintesis metabolit sekunder [32]. Hasil penelitian baru-baru ini menunjukkan bahwa nanopartikel formula agen hayati telah meningkatkan dampak positif bagi aktivitas bakteri pemacu pertumbuhan tanaman [33] khususnya terkait dengan pelibatan pertukaran ion, perubahan ekspresi gen, dan membran sel yang berpotensi meningkatkan penghambatan patogen tanaman [34-35]. Indikasi keberhasilan formula nanopartikel dan bioinokulan bakteri dalam

aplikasinya adalah peningkatan jumlah sel bakteri dan keberhasilannya mengungguli patogen dalam dalam kompetisi untuk berbagai sumber daya serta peningkatan pertumbuhan dan ketahanan tanaman terhadap patogen itu sendiri [36-37].

Penelitian lain juga menunjukkan nanopartikel (NP) dengan bioinokulan bakteridapat bergerak melintasi simplas melalui plasmodesmata dan menyediakan senyawa yang bermanfaat bagi tanaman sekaligus juga menyediakan nutrisi bagi tanaman sebagai hasil dekomposisi enzim tanaman terhadap biomassa dinding sel, membrane sel, dan berbagai komponen seluler mikroba yang mati di ruang periplasma tanaman [38-39]. Potensi ini bisa terjadi pada hifa fungi secara endofitik yang mampu menekan dan mendegradasi sel-sel mati dan propagul jamur patogen di daun dan jaringan tanaman lainnya.

Formulasi nanopartikel-bioinokulan sejauh ini lebih banyak dilakukan dengan memanfaatkan sel-sel bakteri sebagai bioinokulan. Sementara itu pemanfaatan sel-sel fungi sebagai bioinokulan yang diformulasi dengan ekstrak tumbuhan yang berpotensi sebagai bahan pestisida nabati belum banyak dilakukan. Ekstrak kerangkungan (*I. carnea*) ternyata memiliki daya hambat pada sebagai jenis fungi agen hayati, tetapi justru mendukung pertumbuhan bagi fungi yang lain khususnya *Trichoderma* [40] yang selama ini dikenal sebagai agen hayati efektif baik diaplikasikan sebagai agen biokontrol [41], maupun sebagai pupuk hayati (biofertilizer) dan pendorong pertumbuhan tanaman danmeningkatkan kualitas biologi tanah [42-43]. Fungi *Trichoderma* juga mendukung pertumbuhan koloninya pada kondisi lingkungan yang mengandung ekstrak 20%, dan dianggap setara dengan ekstrak yang terkandung di dalam kompos atau pupuk hijau kerangkungan [44]; dengan demikian kombinasi formulasi ekstrak dan/atau kompos kerangkungan dengan agen hayati *Trichoderma* berpeluang untuk dikembangkan. Formulasinya dalam bentuk nanopartikel akan lebih meningkatkan efisiensi dan efektivitas biopestisida yang dihasilkan.

1.4 Tujuan

Buku ini disusun untuk memberikan gambaran:

- (i) Potensi gangguan tanaman hortikultur sebagaipenopang ketahanan panga Nasional oleh hambatan biotikdan abiotikberupa gangguan penyait dan hama tanaman serta kesuburan tanah yang rendah akibat

degradasi kesuburan lahan

- (ii) Aplikasi pestisida baik kimia sintetis maupun biopestisida yang digunakan sebagai bagian dari mitigasi gangguan hama-penyakit dan daya dukung media tumbuh dan lahan yang sering kurang efektif dan cenderung kurang efisien;
- (iii) Pemanfaatan biopestisida nanopartikel dalam rangka mengatasi kurang-efektif dan rendah efisiensi serta mekanisme kerjanya;
- (iv) Aplikasi biopestisida nanopartikel dalam rangka memberiperlindungan bagi kesehatan dan kesuburn tanah dan lahan;
- (v) Strategi pemanfaatan biopestisida nanopartikel dalam menghadapi berbagai tantangan di masa mendatang.

BAB 2

TEKNOLOGI NANOPARTIKEL

2.1 Prinsip Nanopartikel Pertanian

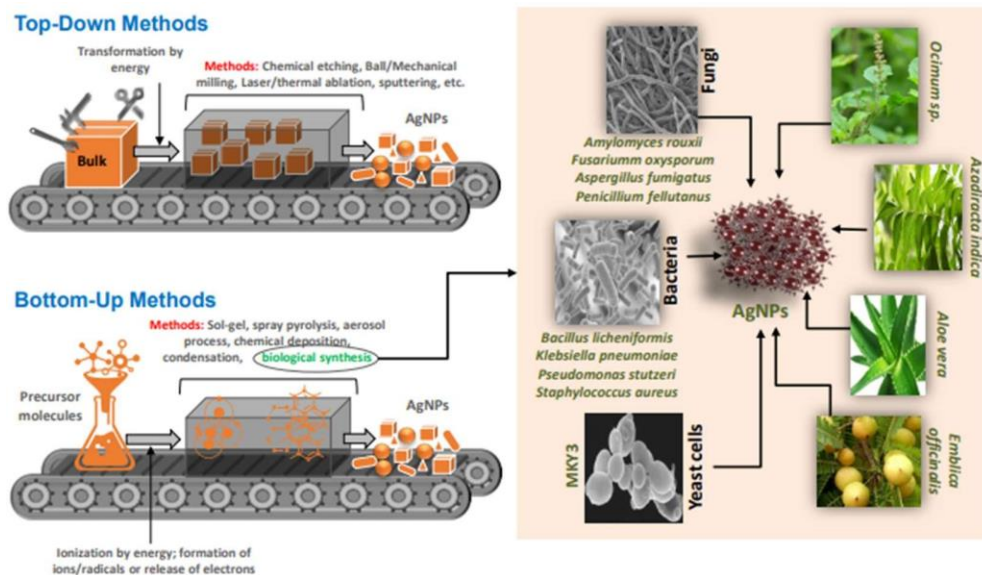
Nanofertilizer adalah nutrisi yang dienkapsulasi atau dilapisi dalam nanomaterial untuk memungkinkan pelepasan yang terkendali, dan difusi lambat selanjutnya ke dalam tanah. Penggunaan pupuk skala nano dapat membantu meminimalkan hilangnya nutrisi akibat pencucian/limpasan dan mengurangi degradasi dan volatilitasnya yang cepat, sehingga meningkatkan kualitas nutrisi dan kesuburan tanah, dan meningkatkan produktivitas tanaman dalam jangka panjang [45].

Nanofertilizer atau biopestisida nanopartikel (BNP) memiliki rasio luas permukaan total partikel terhadap total volume yang tinggi, dan kemampuan penetrasi nanofertilizer yang tinggi, nanofertilizer dapat menjadi alternatif yang cocok untuk pupuk kimia. Selain itu, penggunaan nanofertilizer, atau "nano-biofertilizer", dapat mengurangi bahaya lingkungan hingga tingkat yang besar. Beberapa laporan telah mengungkapkan bahwa nanofertilizer dapat meningkatkan hasil panen dengan merangsang perkecambahan biji, metabolisme nitrogen, fotosintesis, sintesis protein dan karbohidrat, dan toleransi terhadap stress [46].

Keuntungan lainnya adalah nanofertilizer atau biopestisida nanopartikel (BNP) yang diaplikasikan hanya perlu diberikan ke tanah atau permukaan tajuk tanaman dalam jumlah yang relatif lebih sedikit, sehingga meningkatkan kemudahan aplikasi dan mengurangi biaya transportasi. BNP maupun sintesis pupuk nano dipercaya dapat meningkatkan kesuburan tanah dan meningkatkan hasil panen.

Dalam satu hingga dua decade terakhir pemanfaatan perak (Ag) dalam pembuatan nanopartikel telah menjanjikan prospek bagi pengembangan agronanopartikel yang lebih efisien dalam ikut mendukung mewujudkan ketahanan pangan secara berkelanjutan dan ramah lingkungan. Nanopartikel (NP) untuk berbagai aplikasi biologis dan lingkungan telah menjadi salah satu atribut terpenting nanoteknologi. Karena sifat fisikokimia yang luar biasa, nanopartikel perak (AgNP) adalah NP yang paling banyak dieksplorasi dan digunakan dalam berbagai aplikasi. Selain itu, nanopartikel perak (AgNP) telah terbukti memiliki penggunaan komersial yang tinggi karena memiliki stabilitas kimia,

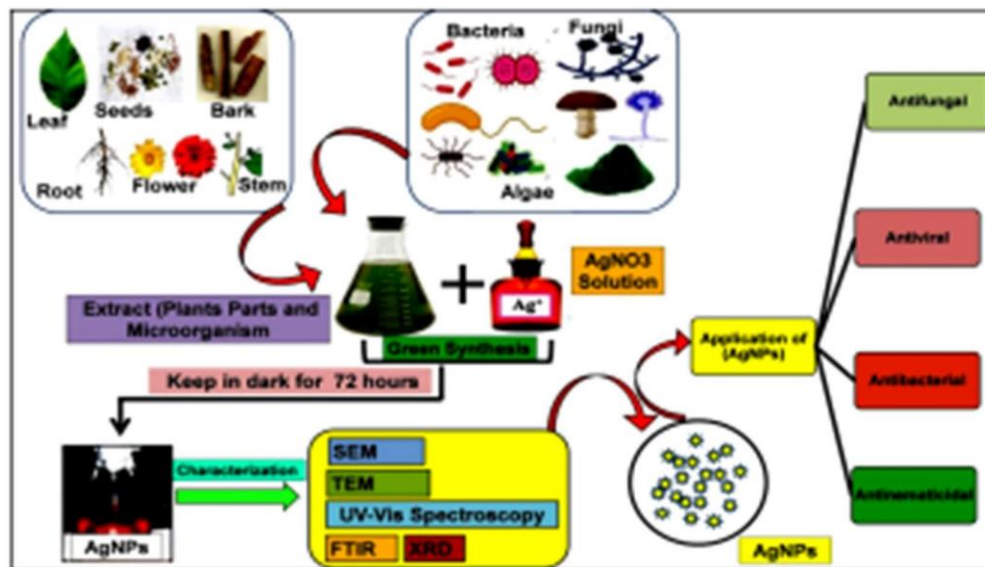
konduktivitas, aktivitas katalitik, dan potensi antimikroba yang tinggi. Meskipun beberapa metode termasuk metode kimia dan fisik telah dirancang, pendekatan biologis menggunakan organisme seperti bakteri, jamur, dan tanaman telah muncul sebagai alternatif yang ekonomis, aman, dan efektif untuk biosintesis Ag-nanopartikel. Terdapat dua pendekatan dalam sintesis AG-nanopartikel yaitu pendekatan top-down dan bottom-up seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1. Pada pendekatan top-down proses menggunakan teknik mekanik, kimia, dan elektro-ledakan, dan lainnya yang memungkinkan; sedangkan dalam pendekatan bottom-up, berbagai teknik, yaitu sintesis cairan superfisial, proses aerosol, sintesis hijau (menggunakan bakteri, alga, jamur dan tanaman atau produk biologisnya) telah digunakan. Beberapa contoh mikroba dan tanaman digunakan dalam sintesis Ag-nanopartikel sebagai sintesis biologis dalam pendekatan bottom-up.



Gambar 2.1. Ilustrasi dua pendekatan sintesis AgNPs: (i) pendekatan top-down seperti mekanik, kimia, dan elektro-ledakan, dan lainnya, dan (ii) pendekatan bottom-up, zat anorganik atau organik digunakan sebagai agen pereduksi atau pelapis [47]

Nanopartikel baik yang ditujukan sebagai pupuk, pestisida, biofertilizer, dan biopestisida saat ini sudah banyak yang memanfaatkan tumbuhan, jamur dan bakteri sebagai bahan nanomaterial seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Ekstrak yang disiapkan dengan pengenceran yang diketahui dicampur dengan larutan perak nitrat (AgNO_3) dengan

molaritas yang telah ditentukan sebelumnya dan diaduk/disimpan dalam kondisi gelap selama waktu yang ditentukan, misalnya, 72 jam. Setelah panen, AgNPs dikarakterisasi secara fisikokimia berdasarkan ukuran, bentuk, dan luas permukaan, diisi dengan teknik seperti mikroskop elektron transmisi (TEM), mikroskop elektron pemindaian (SEM), spektroskopi UV-Vis, FTIR, XRD, DLS, dan zeta-potensial, dll., dan diterapkan untuk beberapa tujuan seperti menghilangkan bakteri, jamur, virus, atau nematoda [47]. Namun demikian telah dikembangkan pula nanomaterial berasal dari ekstrak tumbuhan yang dapat berperan sebagai pupuk organik dan sebagai bahan aktif pestisida dengan proses lanjutan berupa formulasi propagul utuh agen hayati baik jamur dan bakteri contohnya dalam bentuk spora.



Gambar 2.2. Ilustrasi sintesis hijau AgNPs dari berbagai ekstrak seperti bagian tanaman (yaitu, batang, daun, bunga, kulit kayu, biji, dan akar) dan mikroorganisme [47]

2.2 Sintesis Nano

Nanoteknologi melibatkan sintesis dan aplikasi perangkat dengan mengelola dan mengendalikan bentuk dan ukurannya pada skala nanometer; dengan demikian akan memungkinkan penggunaan material berstruktur nano sebagai pupuk atau pestisida sebagai terobosan cerdas [48]. Selain itu, komposisi nanofertilizer dapat memfasilitasi penyerapan nutrisi yang efisien, pemulihan kesuburan tanah, penyerapan yang sangat tinggi, peningkatan fotosintesis, peningkatan produksi, pengurangan toksisitas tanah, penurunan frekuensi aplikasi, peningkatan kesehatan tanaman, dan pengurangan polusi lingkungan

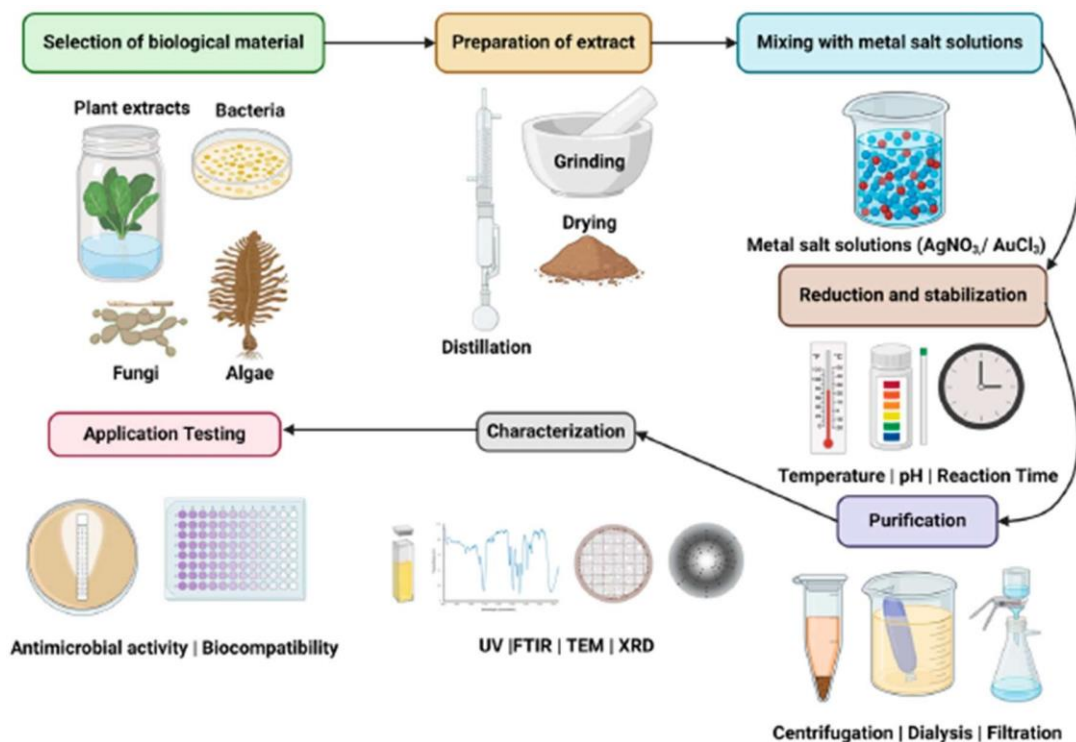
[49]. Beberapa produk nano memiliki komponen nanomaterial meliputi silika, Fe, ZnO, titanium dioksida, cerium oksida, aluminium oksida, nanorod emas, inti-kulit ZnCdSe/ZnS, inti-kulit InP/ZnS, dan titik kuantum Mn/ZnSe. Ukuran, kandungan, konsentrasi, dan sifat kimia nanomaterial, selain jenis tanaman, memiliki dampak yang signifikan terhadap efektivitasnya sebagai nanofertilizer untuk pertumbuhan tanaman. Pelepasan nutrisi ke dalam tanah terjadi ketika suspensi nanopartikel yang mengandung nanofertilizer bereaksi dengan air [50]. Untuk menghindari kehilangan nutrisi yang tidak diinginkan, nanofertilizer dapat dilapisi dengan polimer atau lapisan tipis untuk membungkus nanopartikel.

Efisiensi penggunaan nutrisi dapat ditingkatkan dengan menerapkan nanofertilizer yang memanfaatkan sifat unik nanopartikel. Nanofertilizer dapat diproduksi dengan menambahkan nutrisi secara individual atau dalam kombinasi ke adsorben dengan dimensi nano. Dalam kasus nutrisi kationik, nutrisi target dimuat sebagaimana adanya, sedangkan nutrisi anionik dimuat setelah penyesuaian permukaan untuk membuat nanomaterial menggunakan metode fisik dan kimia [51]. Pembungkusan pupuk dan/atau pestisida dalam nanopartikel, dapat dilakukan cara alternative sebagai berikut, yaitu: (i) nutrisi dapat disediakan sebagai partikel atau emulsi skala nano; (ii) nutrisi atau bahan aktif pestisida dapat dilapisi dengan lapisan polimer tipis; atau (iii) nutrisi atau bahan aktif pestisida dapat ditutup dalam material berpori nano [52]. Produk hasil pembuatan fertilizer atau pestisida nano haruslah berupa materi dengan ukuran partikel 1–100 nm saat penggunaan dalam pengukuran, pembuatan model untuk prakiraan virtual, dan manipulasi materi skala nano [53].

Biofabrikasi Nanopartikel dilakukan dengan menggunakan proses biologis telah menerima banyak perhatian karena meningkatnya kebutuhan dan permintaan untuk teknologi sintesis nanofertilizer yang ramah lingkungan, efisien, dan tidak beracun [54].

Pupuk nano yang diproduksi dari nanomaterial organik dan anorganik bervariasi tergantung pada metode fisik atau kimia yang digunakan. Oksida logam, seperti AgO, MgO, ZnO, dan TiO₂, adalah nanomaterial anorganik, sedangkan lipid, dan polimer misalnya adalah nanomaterial organik [55]. Sementara itu bahan pembawa dapat dipilih dari bahan yang dapat terurai secara hayati, secara alami, dan aman bagi pertanian, seperti kitosan, digunakan dalam bahan kimia pupuk alternatif yang disebut nanopartikel polimer, di mana polimer adalah kation, sedangkan kitosan adalah anion dan berperan sebagai pembawa pestisida atau fertilizer nano [56].

Pembuatan agronanopartikel untuk menghasilkan antimikroba, larvasida, serta pengatur dan penginduksi pertumbuhan tanaman dapat dilakukan dengan memanfaatkan ekstrak bagian tubuh organisme baik mikroba maupun tumbuhan [57]. Secara skematis diagram proses pembuatan nanopartikel dengan menggunakan ekstrak organisme ditunjukkan pada Gambar 2.3 [58]. Karakteristik agronanopartikel yang dihasilkan akan tergantung pada kendala proses ekstrak, serta respons garam logam, pH, durasi reaksi, suhu, dan konsentrasi garam logam relatif terhadap ekstrak tanaman [59].



Gambar 2.3. Diagram menguraikan proses biosintesis untuk nanopartikel logam menggunakan bahan biologis. Dimulai dengan pemilihan ekstrak tanaman, bakteri, jamur, atau alga, bahan-bahan tersebut diproses menjadi ekstrak. Ekstrak-ekstrak ini dicampur dengan larutan garam logam, yang memfasilitasi reduksi dan stabilisasi nanopartikel dalam kondisi tertentu. Nanopartikel kemudian dimurnikan dan dikarakterisasi menggunakan berbagai teknik sebelum menjalani pengujian aplikasi biomedis untuk aktivitas antimikroba dan biokompatibilitas [58]

Mengingat antarfase pertumbuhan organisme berbeda dalam karakteristik biomasnya, maka perlu dicari dan ditentukan fase organisme yang terbaik agar menghasilkan produknanopartikel yang optimal. Bakteri *Bacillus* sp yang diambil dari fase

stasioner pertumbuhan populasinya . terbukti menghasilkan NP dalam jumlah yang relatif besar dibandingkan dengan biomassa yang berasal dari fase lain [60]. Sementara itu pada fase stasioner, fungi mengeluarkan enzim dan senyawa kimia lain yang bermanfaat; dan berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme fase stasioner optimal untuk produksi nano partikel [61-62].

Konsentrasi prekursor dan. pH sangat menentukan ukuran anaopartikel akhir yang dihasilkan dari proses pembuatannya [63]. Nanopartikel berhasil dibuat dengan campuran AgNO₃ dan asam sitrat dengan rasio 1:4 (v/v). Namun ditemukan pula bahwa ukuran partikel Ag-nanopartikel dapat ditingkatkan selama pembentukan bioorganik dari ekstrak tanaman; prekursor pada rasio molar yang lebih besar memiliki pengaruh substansial pada struktur nanopartikel, sementara itu tingkat pH yang berbeda memengaruhi produksi nanokristal CdS oleh spesies *Brevibacterium* [64].

Sintesis hijau Nanopartikel

Penggunaan nanopartikel (NP) atau nanomaterial (NM) dalam sintesis nanopartikel secara tergantung pada jenis, bentuk, ukuran, dan korona biologis nanopartikel yang mengelilinginya. Sintesis kimia dan fisik mengendalikan dan menghasilkan nanopartikel monodispersi, di samping berpotensi dihasilkannya produk sampingan yang berbahaya dan beracun serta penempelan bahan kimia yang berlebihan pada permukaan NP. Keterbatasan ini telah mengarah pada pengembangan alternatif berkelanjutan yang disebut nanoteknologi hijau, di mana dalam proses pembuatannya berfokus pada sumber daya biologis atau metodologi hijau untuk produksi NP. Metodologi hijau telah dilakukan dalam satu dekade terakhir ini adalah sintesis beberapa nanopartikel logam termasuk emas dan perak [65]. Tujuan utama pendekatan hijau adalah untuk meningkatkan aktivitas NP dan mengurangi dampaknya terhadap kesehatan dan lingkungan. Sintesis hijau mencakup sintesis NP menggunakan tanaman atau bagian-bagiannya serta menggunakan berbagai mikroorganisme, termasuk bakteri [66], jamur [67], dan ragi [68]. Sintesis hijau telah dianggap sebagai proses yang cepat dan mudah serta menghasilkan nanopartikel yang stabil dan biokompatibel. Penggunaan tanaman dalam melakukan sintesis nanopartikel membutuhkan waktu yang cepat mulai dari beberapa detik hingga beberapa jam, sementara itu jika menggunakan bakteri mem butuhkan waktu 24–48 jam. Sejauh ini, banyak tanaman telah dilaporkan menghasilkan

nanopartikel logam, seperti *Panax ginseng* [69], *Rhodiola rosea* [70], *Cannabis sativa* [71], buah Rowan dan ginseng Siberia [72]. Sintesis yang dimediasi tanaman telah menjadi cara yang menjanjikan untuk produksi massal nanopartikel, ramah lingkungan, hemat biaya, mudah ditingkatkan, dan tidak memerlukan suhu tinggi atau sumber daya energi khusus (misalnya, gelombang ultrasonik). Komponen yang bertanggung jawab untuk reduksi logam dalam mikroorganisme adalah enzim, protein, dan metabolit sekunder, sedangkan pada tanaman, termasuk flavonoid, terpenoid, fenol, karbohidrat, saponin, dan steroid. Komponen biologis yang disebutkan di atas membantu reduksi dan membentuk lapisan di sekeliling nanopartikel individu yang disebut "lapisan penutup" atau "korona biologis." Korona biologis yang terbentuk di sekitar nanopartikel mengandung komponen biologis yang dilepaskan dari tanaman atau mikroorganisme dalam ekstrak atau media kultur yang digunakan untuk sintesis. Lapisan penutup ini menawarkan stabilitas jangka panjang nanopartikel dalam larutan berair, melindungi nanopartikel dari penggumpalan, dan yang terpenting, memainkan peran utama dalam interaksi nanopartikel hijau dengan sel [73]. Hal ini membantu nanopartikel untuk meresap dengan mudah ke dalam sel tumbuhan, bakteri, atau jamur dan organel sel.

Sintesis hijau dalam pembentukan struktur nanopartikel dipengaruhi oleh sumber sintesis, suhu, pH, konsentrasi garam, dan waktu yang digunakan untuk sintesis, yang tentunya akan mempengaruhi tujuan dan target pemanfaatan aktivitasnya (Gambar 2.4) [74]. Waktu reaksi dan suhu sangat penting untuk sintesis nanopartikel, yang menentukan bentuk, ukuran, dan stabilitas nanopartikel. Pada suhu tinggi, 70–90 °C, sintesis hijau terjadi dengan sangat cepat [72]. Sementara itu pH berperan besar dalam menentukan ukuran dan bentuk nanopartikel; nanopartikel besar membentuk lebih sedikit gugus fungsional yang melekat pada lapisan korona pada pH asam [75].



Gambar 2.4. Sintesis nanopartikel hijau, parameter metode dan aplikasi dalam pertanian berkelanjutan [74]

BAB 3

FUNGI AGEN HAYATI

3.1 Jenis dan Karakteristik Agen hayati Potensial Efektif

Dalam dua hingga tiga decade belakangan ini banyak penelitian yang mengeksplorasi dan menguji potensi organisme agen hayati yang sudah dilaksanakan. Pengujian efektivitas juga telah dilakukan pada berbagai tanaman pangan, sayuran, dan tanaman keras dalam membantu pertumbuhan dan memberi perlindungan tanaman. Dua jenis mikroorganisme yang banyak dimanfaatkan sejauh ini adalah dari jenis bakteri dan jamur.

Selain bakteri bintil akar dari genus *Rhizobium* (filum Proteobacteria) yang biasa menginfeksi perakaran tanaman polong-polongan dan bakteri genus *Frankia* (filum Actinobacteria) pada tanaman keras, berbagai bakteri baik yang bersifat simbiotik maupun non simbiotik juga telah teruji perannya dalam membantu penyediaan tempat tumbuh dan nutrisi bagi tanaman.

Dari jenis jamur juga telah banyak diteliti perannya dalam membantu tanaman baik langsung maupun tidak langsung. Berbagai penelitian sudah masuk taraf hilirisasi menghasilkan produk yang dapat diaplikasikan pada berbagai kondisi lahan pertanian.

Salah satu jenis jamur yang paling banyak diteliti efektivitasnya ketika dipalikasi pada berbagai tanaman, *Trichoderma* merupakan genus yang menjanjikan bagi pemanfaatannya di masa depan. Jenis ini yang memiliki prospek sebagai agen hayati biofertilizer adalah *Aspergillus*. Sementara itu beberapa jenis jamur juga telah dimanfaatkan perannya dalam menekan dan mengendalikan beberapa jenis hama adalah jamur entomopatogen seperti *Metarrhizium* dan *Beauveria*.

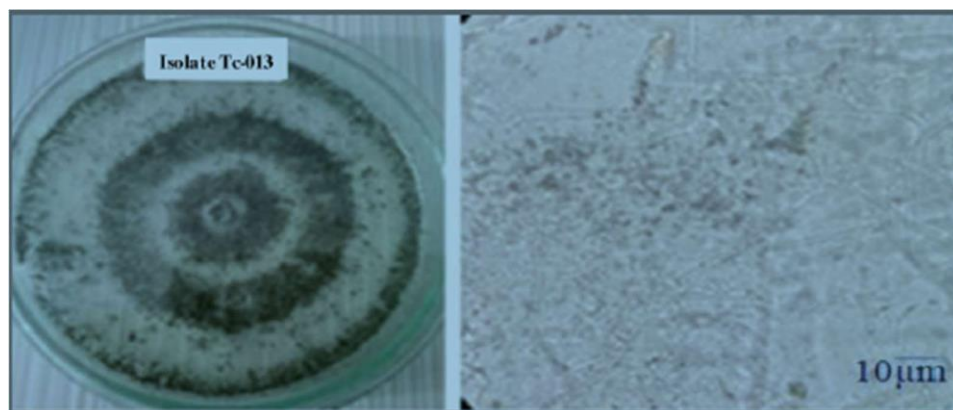
3.1.1 Trichoderma

Trichoderma adalah salah satu genera fungi yang cenderung cosmopolitan meliputi hampir sekitar 100 spesies yang tersebar di seluruh dunia. Fungi ini memiliki konidisi berwarna hijau hingga tidak memunculkan citra berwarna. Konidioforanya ada yang bercabang secara lateral, ada yang sedikit bahkan tidak bercabang, Memiliki fialid yang

muncul di verticil terminal sederhana secara tunggal dan tidak berwarna seperti halnya hifa. Bentuk, ukuran, dan tekstur fialid, konidiogfor, dan spora/konidia menjadi dasar dalam identifikasi dan determinasi jenis atau spesies fungi ini. Namun sejak digunakannya marka molekular sebagai teknik determinasi jenis, maka seringkali kesimpulan yang diperoleh dari pengamatan morfologi mikroskopis ini menjadi kurang memiliki kepastian yang tinggi. Secara morfologi mungkin satu isolate yang diperiksa mirip dengan yang sudah ditemukan dan dikenal selama ini, namun setelah dilakukan determinasi berbasis hasil sekuensing DNA ternyata sesuai dengan jenis lain yang bahkan tidak pernah kita prediksi sebelumnya.

Bukan hanya berdasarkan morfologis, bahkan meski secara fisiologi dan perilaku memiliki kemiripan, secara molecular yang berbasis pada hasil sekuensing DNA mungkin berbeda atau mungkin mirip (tingkat kemiripan 100% pada sekuen dengan panjang pasangan basa tertentu) dengan jenis lain yang secara morfologi berbeda.

Di Indoensia telah ditemukan berbagai spesies *Trichoderma*, di antara yang ditemukan dari hutan pinus di Jawa Timur dan berpotensi sebagai *biofertilizer* yang sudah terdeterminasi sebagai *T. esperellum* (Gambar 3.1)

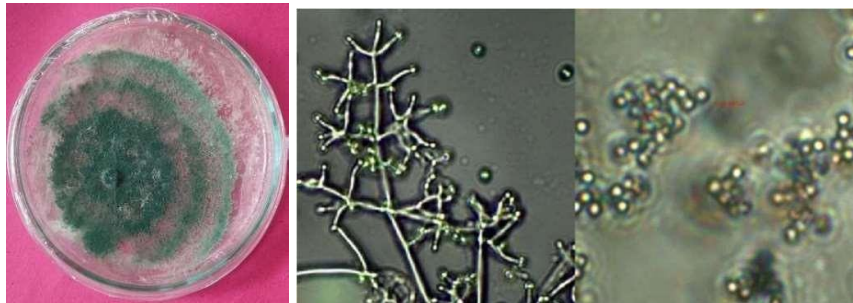


Gambar 3.1. Hasil pengamatan morfologi makroskopis dan mikroskopis *Trichoderma eperellum* [76]

Status *Trichoderma* bukan hanya sebagai fungi tanah (*soil borne fungi*) tetapi juga banyak dikenal sebagai endofit yang terdeposit di jaringan

tanaman baik di perakaran, batang dan daun. Sebagai endofit fungi ini dalam aktivitasnya dengan memanfaatkan bahan organik sisa atau ekskresi tanaman dapat menginduksi ketahanan taaman terhadap serangan patogen dan secara langsung menekan berbagai fungi pathogen seperti *Phytophthora palmivora* penyebab hawar daun bibit kakao secara *in vitro* dan *in vivo* [77], *Fusarium oxysporum* dan *Colletotrichum* spp. [78].

Hasil isolasi dan pengujian terhadap fungi *Trichoderma* telah dilakukan baik skalala boratorium maupun di rumah kaca dan di lapang, dan menunjukkan potensi tinggisebagai agen biocontrol dan layak diformulasi dalam bioferilizer/biopestiida nano (BNP) dengan penampilan morfologis seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Morfologi koloni secara makroskopis dan jalinan hifa serta spora *Trichoderma esperellum* isolate Tc-27 agen bioKontrol [76].

Jika diperbandingkan secara morfologi di antara kedua isolate fungi ini (Gambar 3.1 dan 3.2), terdapat perbedaan yang nyata. Warna koloni berbeda, isolate pada Gambar 3.2 lebih hijau dibandingkan yang lain meski ditumbuhkan pada media yang sama. Pola pertumbuhan koloni relative serupa meski terdapat perbedaan ketebalan lingkaran miselium. Sementara itu ukuran vialid relative tidaksamanamun berada dalam suatu kisaran yang ditemui pula kisaran dimensi pada beberapafungi *Trichoderma* lainnya. Ukuran diameter fialid berkisar di antara 7,0-8,0 μ m, konidiospora hialin di antara 2,7-3,2 μ m berbentuk membulat atau oval.

3.1.2 Aspergillus

Seperti halnya *Trichoderma*, *Aspergillus* (Gambar 3.3) juga berifat kosmopolitan dan memiliki banyak varian/starin dengan karakteristik yang bervariasi juga. *Aspergillus* memiliki banyak manfaat di bidang pertanian karena fungi ini mampu mendegradasi bahan organik tanah [79-80], menghasilkan asam organik yang dapat mengkelat logam dari oksida [81], meningkatkan jumlah fosfat terlarut di dalam tanah [82], dan meningkatkan oksidasi biologis unsur belerang [83]. Dengan demikian *Aspergillus* berpotensi sebagai agen hayati biofertilizer yang berpotensi meningkatkan pertumbuhan dan kesehatan tanaman.



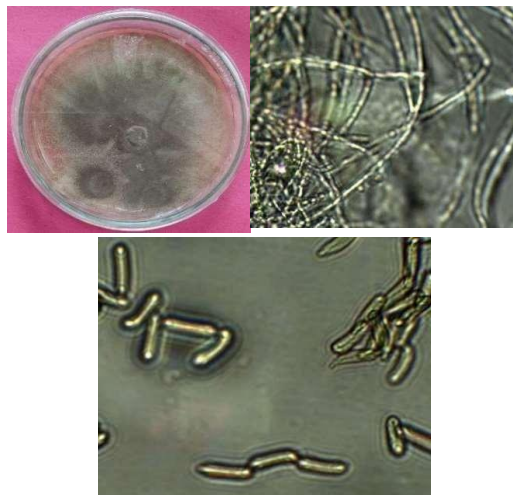
Gambar 3.3. Hasil pengamatan morfologi makroskopis (kiri) dan mikroskopis *Aspergillus* As-015 (kanan) [76]

Berbeda dengan *Trichoderma* yang dikenal sebagai agen biocontrol di samping memiliki kemampuan biofertilisasi yang tinggipula, maka *Aspergillus* relative memiliki salah satu dari kedua peran penting dalam perlindungan kesehatan dan pertumbuhan tanaman, yaitu digunakan sebagai bioagent biofertilizer. Pemanfaatan peranya dalam membantu memberikan nutrisi bagi tanaman ternyata memiliki potensi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik. Di masa depan bioagent ini dapat dikembangkan bagi upaya perlindungan tanaman padi dari gangguan fungi patogen penting pada tanaman padi dan tanaman hortikultur terutama dalam menghadapi cekaman fungi *Pyricularia oryzae*, *Cercospora* spp., *Helminthosporium*, dan penyebab busuk pangkal batang (*Rhizoctonia solani*).

3.1.3 Entomopatogen

Dari banyak genus fungi, ada beberapa spesies fungi yang dikelompokkan sebagai entomopatogen karena kemampuannya dalam memparasitasi hama yang menyerang tanaman. Penggunaan fungi ini sebagai bahan aktif biopestisida merupakan salah satu cara untuk meminimalisir penggunaan insektisida kimia dalam rangka melaksanakan pendalian serangga hama khususnya fase larva dari ordoLepidoptera dan Orthoptera. Meskipun fakta menunjukkan bahwa isolate fungi entomopatogen biasanya spesifik geografis yang memungkinkan tidak selalu efektif di berbagai lokasi yang berbeda [84], namun pemanfaatan funi entomopatogen ini memberikan proses cerah asal aspek spesifik lokasidan karakteristik fisik dan bioekologi yang berbeda-beda dipertimbangkan [85], sehingga pengujian-pengujian efektivitas perlu dilakukan sebelum rekomendasi diberikan.

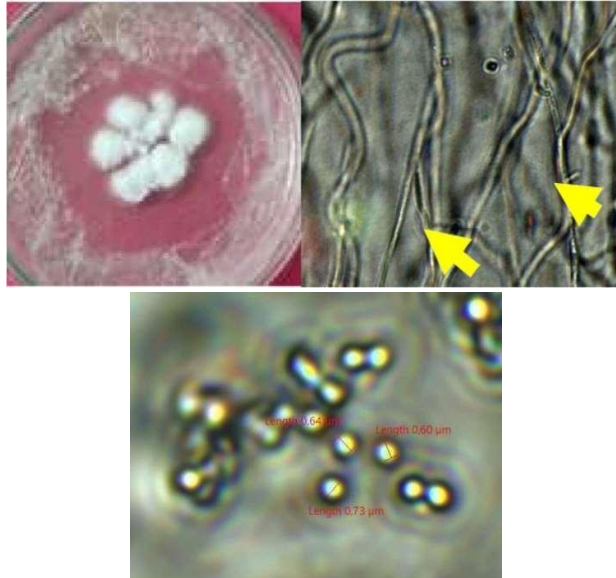
Secara morfologi tampilan makroskopis dan mikroskopis fungi ini ditunjukkan pada Gambar 3.4. Koloni fungi *Aspergillus* berwarna hijau kecoklatan. hifa bersekat (panah kanan) dan bercabang (panah kiri) berukuran rata-rata $2,34\pm 0,29 \mu\text{m}$. Spora hialin berbentuk batang dengan ukuran rata-rata $6,13.\pm 0,97 \times 2,39.\pm 0,52 \mu\text{m}$



Gambar 3.4. Karakter morfologi isolat *Metarrhizium anisopliae* Ma-05 agen entomopatogen terhadap hama [86]

Sementara itu fungi *Beauveria bassiana* yang juga dikenal sebagai fungi entomopatogen efektif memiliki penampilan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Koloni *B. bassiana* pada media *PDA-clhoramphenicol* secara konsisten menunjukkan warna

anyaman miselium putih dengan bagian tepi bertekstur halus seperti kapas. Hifa hialin $1,65 \pm 0,05 \mu\text{m}$ bersekat dan memiliki percabangan. Spora berbentuk oval atau membulat hialin rata-rata $2,87 \pm 0,33 \mu\text{m}$ diameternya.



Gambar 3.5. Penampilan morfologi *B. Bassiana*. secara makroskopis (kiri atas) dan mikroskopis berupa hifa(kanan atas) yang bersekat dan ada percabangan (tanda panah), serta spora hialin $2,87 \pm 0,33 \mu\text{m}$ (bawah)[87]

3.2 Determinas Jenis

Kesamaan morfologi baik secara makroskopis dalam bentuk koloni di cawan petri maupun mikroskopis dalam bentuk hifa, percabanagn hifa, fialid, konidiofor, dan spora serta aktivitas dan fisiologisnya di antara isolate dan antarspesies mikroorganisme belumbisa dijadikan ukuran pasti dalam pengelompokkan dan determinasi jenis. Kesalahan dalam penentuan jenis tertentu akan berpengaruh dalam penanganan isolate bahkan ketika kita ingin memanfaatkannya sebagai agen hayati biofertilizer dan atau biopestisida. Untuk itu diperlukan metode lain yang memiliki ketelitian yang lebih tinggi dan diakui di ranah ilmiah baik dalam kesepakatan ahli maupun dalam komunikasi ilmiah lainnya. Metode tersebut adalah yang memanfaatkan ipteks biologi molekular.

Dalam hal ini diuraikan metode yang memanfaatkan marka molecular tersebut untuk mendeterminasi dua macam isolate fungi yang dikembangkan oleh Laboratorium Mikrobiologi dan Bioteknologi UMSIDA yaitu *Trichoderma* Tc-013 (Gambar 3.1) dan *Aspergillus* As-022 (Gambar 3.3).

Dua isolate fungi hasil screening dari lahan di Desa Seloliman Kecamatan Trawas Kabupaten Mojokerto yaitu *Trichoderma* Tc-013 dan *Aspergillus* As-22 (koleksi Laboratorium Mikrobiologi and Biotechnology Universitas Muhammadiyah Sidoarjo) digunakan dalam kegiatan determinasi jenis berbasis marka molekuler. Kedua isolate diperbanyak dalam media PDA-chloramphenicol dan diinkubasi selama 10 hari dan diamati secara makroskopis bentuk koloninya, Selanjutnya dicuplik dari cawan berisi biakan dan diolah ke permukaan objek glass untuk diamati bentuk dan dimensi hifa dan sporanya untuk mengidentifikasinya.

Miselium dari masing-masing isolate dalam cawan petri ambil sebanyak 50 mg dan dimasukkan ke dalam 200 µl dH₂O dalam tabung BashingBead™, kemudian isolasi DNA dilakukan sesuai dengan prosedur standart Quick-DNA Fungal/Bacterial Miniprep Kit™ nomor katalog D6005. Selanjutnya sampel di amplifikasi dengan menggunakan primer Forward ITS 1 5'-TCC GTA GGT GAA CCT GCG G-3' dan Primer reverse ITS 4 5' TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC-3'. Siklus yang digunakan pradenaturasi 95°C selama 5 menit yang diikuti denaturasi 95°C, annealing 60 °C, dan elongasi 72 °C masing-masing selama 1 menit. Elongasi akhir (post elongasi) 72 °C, selama 5 menit. Siklus yang digunakan adalah 40 siklus [76].

Sekuensing atas potongan DNA hasil PCR dilakukan dengan menggunakan metode Sanger sequencing dengan PCR product dikirim pada komersial DNA sequencing service (1st Base; Singapore) menggunakan mesin ABI 3730XL sequencer. Selanjutnya susunan nukleotida yang diperoleh (Gambar 3.6) dibandingkan terhadap gen bank dengan menggunakan program Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) yang tersedia pada National Center for Biotechnology Information (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) [88]. Urutan homolog diperoleh dari NCBI Gene Bank direkonstruksi dengan perangkat lunak MEGA 7 [89] dengan metode Neighbor Joining sehingga dihasilkan pohon filogenetik.

Urutan potongan DNA *Trichoderma* kode isolate Tc-013

```
ACCTGCGGAGGGATCATTACCGAGTTTACAACCTCCCAAACCCAATGTGAACGTTACCA  
AACTGTTGCCTCGGCGGGGTACGCCCGGGTGCCTCGCAGCCCCGGAACCAGGCGCC  
CGCCGGAGGAACCAACCAAACCTCTTTCTGTAGTCCCCTCGCGGACGTATTTCTTACAG  
CTCTGAGCAAAAATTCAAAATGAATCAAACTTTCAACAACGGATCTCTTGTTCTGG  
CATCGATGAAGAACGCAGCGAAATGCGATAAGTAATGTGAATTGCAGAATTCAGTGA  
ATCATCGAATCTTTGAACGCACATTGCGCCCGCCAGTATTCTGGCGGGCATGCCTGTCC  
GAGCGTCATTTCAACCCTCGAACCCTCCGGGGGATCGGCGTTGGGGATCGGGACCCC  
TCACACGGGTGCCGGCCCCGAAATACAGTGGCGGTCTCGCCGCAGCCTCTCCTGCGCA  
GTAGTTTGCACAACCTCGCACCGGGAGCGCGGCGCTCCACGTCCGTAAAACACCCAAC  
TTTCTGAAATGTTGACCTCGGATCAGGTAGGAATACCCGCTGAACTTAAGCATATCA
```

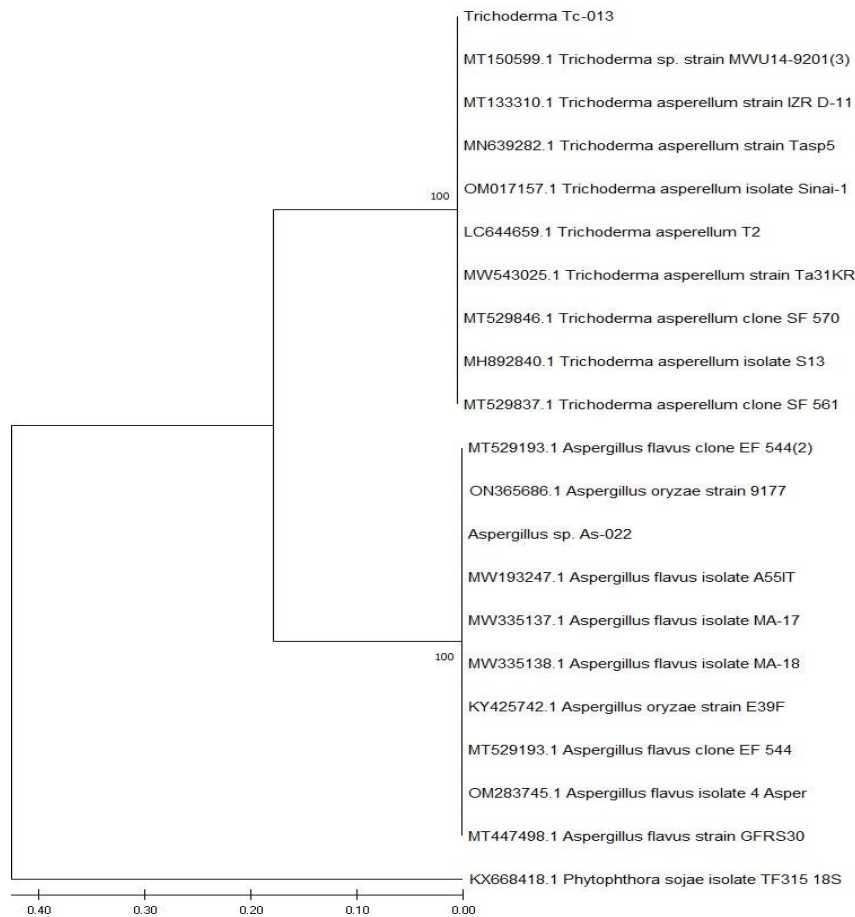
Urutan DNA *Aspergillus* kode isolat As-022

```
GTTCTAGCGAGCCCAACCTCCCACCCGTGTTTACTGTACCTTAGTTGCTTCGGCGGGCC  
CGCCATTCATGGCCGCCGGGGGCTCTCAGCCCCGGGCCCGCGCCCGCGGAGACACCA  
CGAACTCTGTCTGATCTAGTGAAGTCTGAGTTGATTGTATCGCAATCAGTTAAAACCTT  
CAACAATGGATCTCTTGTTCCGGCATCGATGAAGAACGCAGCGAAATGCGATAACTA  
GTGTGAATTGCAGAATTCCGTGAATCATCGAGTCTTTGAACGCACATTGCGCCCCCTG  
GTATTCCGGGGGGCATGCCTGTCCGAGCGTCATTGCTGCCCATCAAGCACGGCTTGTG  
TGTTGGGTGCTGTCCTCCCTCTCCGGGGGGGACGGGCCCAAAGGCAGCGGCGGCACCG  
CGTCCGATCCTCGAGCGTATGGGGCTTTGTACCCGCTCTGTAGGCCCGGCCGCGCTT  
GCCGAACGCAAATCAATCTTTTCCAGGTTGACCTCGGATCAGGTAGGGATACCCGCTG  
AACTTAAGCATATCAATAAGCGGAGG
```

Gambar 3.6. Urutan nukleosida sekuens DNA isolate Tc-013 dan As-022 [76]

Dalam proses pencocokan susunan nukleotida pada sekuens DNA, menurut Brock et al. (2009) suatu spesies dikatakan sama jika ITS Homologi urutan rDNA organisme memiliki kesamaan 97% [90]. Dengan demikian pada pencocokan dengan koleksi yang terdapat pada BLAST, kesamaan di bawah 97% diabaikan dan diprioritaskan dengan kesamaan 100%.

Hasil pencarian melalui pensejajaran kemiripan dengan menggunakan BLAST (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) menunjukkan sekuens Tc-013 memiliki kemiripannya 100% dengan *Trichoderma asperellum* (Sequence ID: MT133310.1). Sementara itu isolate As-022 ada kemiripan dengan *Aspergillus oryzae* (Sequence ID: MH56933331.1) dan *Aspergillus flavus* (Sequence ID: KX067855.1) dengan kemiripan 100% pada panjang urutan nukleotida 557. Hasil rekonstruksi dengan perangkat lunak MEGA 7 [89] dengan metode Neighbor Joining diperoleh pohon filogenetik seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Filogenetik isolat Tc-013 dan As-022 [76]

3.3 Peran Biokontrol dan Biofertilasi

Fungi *Trichoderma* memiliki keunggulan dibandingkan dengan berbagai agen hayati lainnya, mengingat karakter mengunggulkannya, di antaranya [91-92]:

- (i) Berperilaku sebagai mikorparasi baik di dalam tanah maupun di tajuk menekan dan mengendalikan pathogen penyebab penyakit tanaman;
- (ii) Kompetitor yang kuat dalam niche-na baik di rhizosfer maupun di bagian tanaman lainnya khususnya sebagai endofit;
- (iii) Menghasilkan berbagai senawa ekstraselular yang bersifat sebagai fitohormon dan enzim yang dapat membantu pertumbuhan tanaman [93-94];

- (iv) Mendegradasi bahan organik sehingga hasil mineralisasinya bermanfaat sebagai nutrisi tanaman [95].

Kontak langsung maupun tidak langsung Fungi *Trichoderma* dengan fungi pathogen akan menyebabkan tertekan dan terhambatnya pertumbuhan pathogen. Enzim kitinase yang dilepaskan *Trichoderma* sp. akan memaserasi dinding sel pathogen [96-98]. Sementara itu fungi *Aspergillus* sp. juga memiliki kemampuan menghasilkan senyawa alkaloid dan toksin yang dapat menekan aktivitas biologis pathogen [99] serta menghasilkan enzim-enzim yang mendegradasi lignoselulosa dan bahan organik sehingga dihasilkan nutrisi bagi tanaman [100-101].

Fungi entomopatogen *M. anipsoliae* dan *B. bassiana* terbukti efektif mengendalikan berbagai hama ulat termasuk efektif menginaktivasi ulat *P. xylostella* efektif [102] dan larva *Ephestia kuehniella* [103-104]. Enzim hidrolitik yang dihasilkan fungi entomopatogen ini yang berperan dalam mendegradasi kutikula larva [105]. Sementara itu fungi entomopatogen ini juga mampu sebagai endofit pada jaringan daun sesudah diaplikasikan melalui penyemprotan di permukaan daun [106]. Fungi *B. bassiana* yang jatuh ke dalam tanah setelah penyemprotan akan terdisposisi pada tubuh ulat di dalam tanah dan melakukan imampu melakukan infeksi pada tubuh larva bahkan dapat menginfeksi nematoda [107-108].

T. esperellum juga mampu bersinergi dengan *B. bassiana* dalam kehidupan bersama secara *in vitro* [109], sementara itu sinergi fungi entomopatogen ini dengan *T. hamatum* mampu menekan larva *Spodoptera littoralis* [110]. Di lain pihak *B. bassiana* juga dapat menginduksi pertumbuhan tanaman tomat [112] dan melon [113] di samping menekan hama dan menurunkan intensitas serangan hama [114].

Penggunaan fungi entomopatogen memiliki prospek yang menjanjikan mengingat kemampuannya untuk menginfeksi dan menyebabkan kematian serangga serta menghasilkan senyawa ekstraseluler yang berguna [115-116]. Fungi entomopatogen mampu mengkolonisasi rizosfer dan menghasilkan metabolit yang dapat merangsang pertumbuhan tanaman [117-118].

Pemanfaatan agen hayati fungi Trichoderma, Asergillus, dan entomopatogen sebagai bioagent yang diformulasi dalam biopestisida dan biofeertilizer nano akan lebih meningkatkan efektivitas melebihi efektivitas yang dihasilkan nanopartikel dalam mengendalikan berbagai penyakit seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Berbagai ukuran nanopartikel serta pengaruhnya terhadap jenis penyakit tanaman [47]

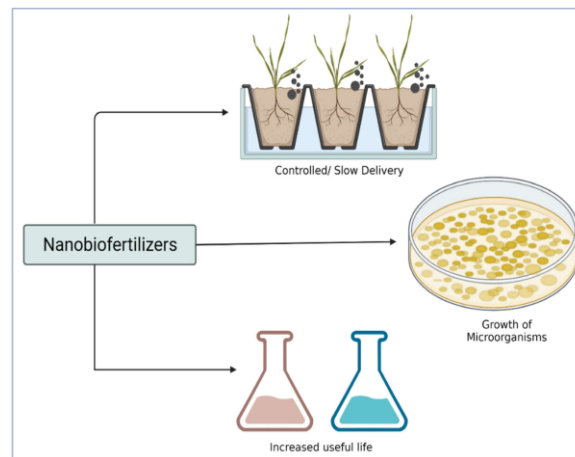
Nanoparticles	Size (nm)	Pathogen	Effect
AgNPs	50.6	<i>Helminthosporium rostratum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>F. oxysporum</i> and <i>Alternaria alternata</i>	Effectively mitigated the mycelial growth
AgNPs	10–12	<i>F. chlamyosporum</i> and <i>Aspergillus flavus</i>	Suppressed the growth of pathogens
OT-AgNPs	5–61	<i>F. oxysporum</i> , <i>A. niger</i> , and <i>A. flavus</i>	Antifungal ability
AgNPs	15	<i>Candida albicans</i>	Suppressed the growth of pathogens
AgNPs	25.6	<i>A. terreus</i> Thom	Retardation in fungus growth and biomass
AA-AgNPs and SD-AgNPs	8–52 and 5–45	<i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> and <i>F. oxysporum</i>	Highly antifungal effect against pathogens
AgNPs	-	<i>F. oxysporum</i>	Antifungal activity
AgCSs	-	<i>Aspergillus</i> sp.	Abnormal spore germination and distorted hyphae
AgNPs	47	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Controlled black anther infection during storage of cut orchid flowers
MC-AgNPs and PG-AgNPs	5–29 and 5–53	<i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> and <i>F. oxysporum</i>	Inhibitory action
AgNPs		<i>A. fumigates</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>Trichophyton rubrum</i> , <i>C. albicans</i> , and <i>Penicillium</i> sp.	Inhibition of fungal growth and biofilm
AgNPs	100	<i>M. phaseolina</i> , <i>S. sclerotiorum</i> , and <i>D. longicolla</i>	Inhibited the growth of fungi

Nanoparticles	Size (nm)	Pathogen	Effect
AgNPs	50.6	<i>Helminthosporium rostratum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>F. oxysporum</i> and <i>Alternaria alternata</i>	Effectively mitigated the mycelial growth
AgNPs	10–12	<i>F. chlamyosporum</i> and <i>Aspergillus flavus</i>	Suppressed the growth of pathogens
OT-AgNPs	5–61	<i>F. oxysporum</i> , <i>A. niger</i> , and <i>A. flavus</i>	Antifungal ability
AgNPs	15	<i>Candida albicans</i>	Suppressed the growth of pathogens
AgNPs	25.6	<i>A. terreus</i> Thom	Retardation in fungus growth and biomass
AA-AgNPs and SD-AgNPs	8–52 and 5–45	<i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> and <i>F. oxysporum</i>	Highly antifungal effect against pathogens
AgNPs	-	<i>F. oxysporum</i>	Antifungal activity
AgCSs	-	<i>Aspergillus</i> sp.	Abnormal spore germination and distorted hyphae
AgNPs	47	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Controlled black anther infection during storage of cut orchid flowers
MC-AgNPs and PG-AgNPs	5–29 and 5–53	<i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> and <i>F. oxysporum</i>	Inhibitory action
AgNPs		<i>A. fumigates</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>Trichophyton rubrum</i> , <i>C. albicans</i> , and <i>Penicillium</i> sp.	Inhibition of fungal growth and biofilm
AgNPs	100	<i>M. phaseolina</i> , <i>S. sclerotiorum</i> , and <i>D. longicolla</i>	Inhibited the growth of fungi

3.4 Nanobiofertilizer

Biofertilizer adalah formulasi yang meningkatkan produktivitas tanah dengan kombinasi satu atau lebih mikroorganisme dengan memperbaiki nitrogen atmosfer, mensintesis zat pemacu pertumbuhan, dan melarutkan fosfor [119], Oleh karena itu kombinasi biofertilizer dan nanostruktur dapat disebut sebagai nanobiofertilizer [120].

Interaksi antara NP dan mikroorganisme, umur panjang biofertilizer, dan transportasinya adalah tiga aspek terpenting dari nanobiofertilizer (Gambar 3.8). Meskipun tiga kategori mikroorganisme—rhizobacteria pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR), rhizobacteria pengikat nitrogen, dan jamur mikoriza arbuskular—dapat digunakan untuk nanobiofertilizer, hanya PGPR yang telah digunakan sebagai biofertilizer.



Gambar 3.8. Mekanisme fungsional nanobiofertilizer pada tanaman. Ilustrasi yang menggambarkan keuntungan utama nanobiofertilizer [121]

Nanofertilizer dalam Hidroponik. Saat ini, banyak tanaman dan hasil bumi dibudidayakan menggunakan hidroponik karena keterbatasan lahan. Penggunaan nanofertilizer untuk pertumbuhan tanaman yang ditanam secara hidroponik bukanlah hal yang baru. Tanaman yang ditanam secara hidroponik menunjukkan jejak NP magnetik pada akar, batang, dan daunnya, sedangkan tanaman yang tumbuh di tanah atau pasir tidak menunjukkan sinyal seperti itu, yang menunjukkan tidak adanya penyerapan partikel. Tanaman menunjukkan peningkatan aktivitas spesifik enzim katalase dan peroksidase sebagai respons terhadap paparan nanaopartikel; dan peningkatan konsentrasi NP tidak berpengaruh pada perkecambahan, namun, pemanjangan akar terstimulasi secara signifikan [122]. Hasil percobaan aplikasi pupuk nano-silikon, pupuk nano-lengkap, dan atonik dalam lingkungan terkendali dapat memaksimalkan produksi tanaman barley pakan ternak yang ditanam secara hidroponik [123]. Tanaman mentimun yang ditumbuhkan pada media nanopartikel lengkap secara hidroponik dengan penambahan N menunjukkan peningkatan biomassa akar dan pucuk, sehingga mendorong proses fabrikasi perangkat yang hemat biaya [124]. Di lain pihak pengelolaan stres garam yang biasa terjadi dapat memberikan hasil yang

memuaskan melalui penggunaan nanofertilizer berupa Nano-K₂SO₄, di mana berpengaruh terhadap peningkatan bobot kering pucuk, tinggi tanaman, jumlah bunga, jumlah anakan, panjang akar, berat segar akar, dan bobot kering akar [125].

BAB 4

PENGUJIAN FORMULA

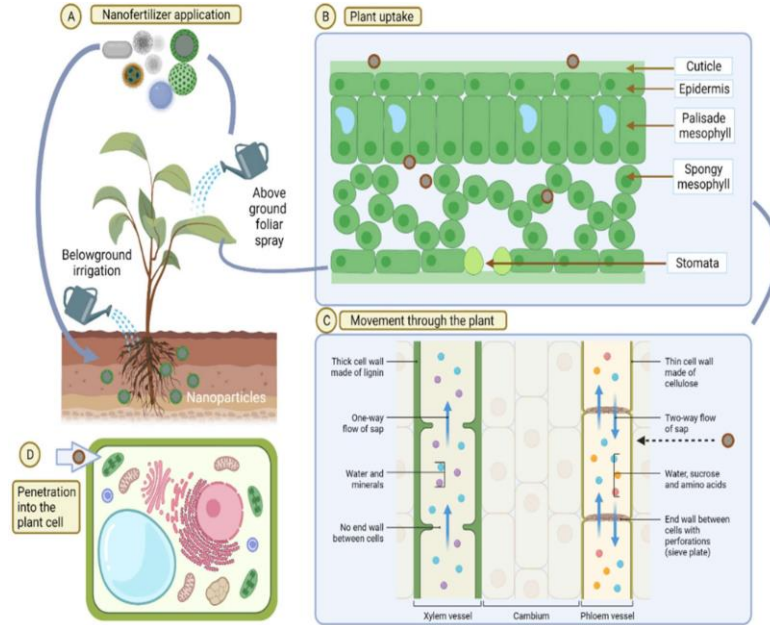
4.1 Validasi

Formula biopestisida nano harus mendapatkan kepastian terkait efektivitasnya dalam membantu memberikan perlindungan kesehatan tanaman dan kesuburan tanah media tumbuh yang mendukung kehidupan tanaman hingga produksinya. Untuk itu maka perlu dilakukan rangkaian kegiatan pengujian yang dapat memvalidasi efektivitas biopestisida nano tersebut.

Pengaruh nanomaterial pada tanaman bergantung pada interaksi antara sifat intrinsik dan ekstrinsik nanopartikel. Bukan hanya interaksi antara bahan aktif dengan bahan pembawa (carrier agent) dan bahan pengisi (inert agent), tetapi juga permukaan target dan iklimnya serta berbagai factor yang dapat mempengaruhi cara bekerja dan efektivitasnya. Jenis target atau tanaman yang akan diekspos biopestisida nano akan memberikan respons yang berbeda. Benih yang terpapar nanopartikel TiO₂ akan memberikan respons berbeda-beda di antara jenis-jenis tanaman, beberapa di antaranya memacu perkecambahan tetapi jenis-jenis yang lain justru melambat [126]. Sementara itu efek nanofertilizer yang diaplikasikan ke dalam tanah akan memunculkan agregasi bahkan dapat memunculkan nanotoksitas di dalam tanah, mengingat nanopartikel dalam agregat ini akan dipengaruhi oleh porositas tanah, granularitas tanah, kandungan organik tanah, biota tanah, pH, nutrisi dan mineral, serta berbagai kondisi tanah lainnya [119]. Dengan demikian kiranya sebelum dilakukan pengujian efektivitas selama periode tanam atau selama musim tanam dan yang berjangka Panjang, perlu dilakukan penelitian pendahuluan agar hasil validasi dapat memberikan rekomendasi yang sesuai dan bermanfaat dan mendukung pencpIn pertanian yang berkelanjutan [127].

Sebagai bahan pertimbangan dalam melaksanakan pengujian validasi efektivitas biopestisida nano, kiranya perlu difahami bagai proses mulai dari aplikasi, translokasi, dan biodistribusi terjadi pada aplikasi biopestisida nano. Proses penyerapan biasanya melibatkan perjalanan nutrisi dari tanah menuju permukaan akar, pengangkutan ion melalui membran sel permukaan akar, pengangkutan ion secara radial ke dalam pembuluh xilem akar, pengangkutan di dalam xilem, dan distribusi ion di bagian tanaman di atas tanah (Gambar3). Penelitian terkini berfokus pada penentuan total penyerapan nutrisi dari waktu ke waktu,

serta penyerapan nutrisi oleh akar tertentu dan laju pertumbuhannya.



Gambar 4.1. Aplikasi, pengambilan, translokasi, dan biodistribusi nanofertilizer dalam sel-sel tanaman [121]

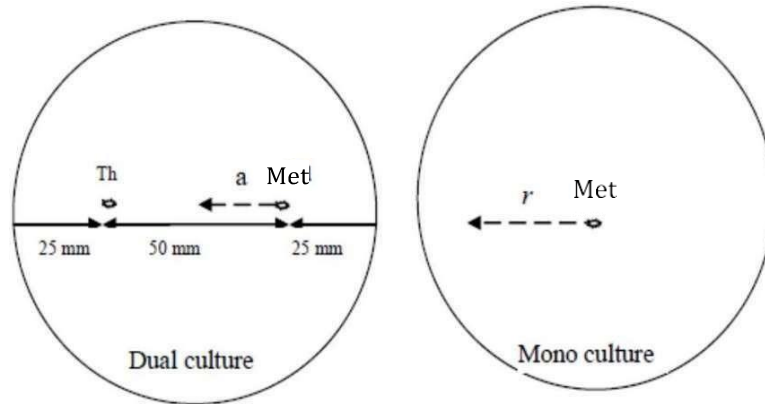
Nanopartikel yang terdispersi pada permukaan daun diawali dengan penempelan pada kutikula daun yang diikuti penetrasi dinding sel tipis yang tersusun atas selulosa. Selanjutnya artikelmasuk ke dalam sitoplasma dan dapat tersebar ke sal-sel berikutnya melalui pori-pori di ujung dinding sel yang biasa biasa sebagai penghubung antarsel dalam jaringan floem. Sementara itu dengan mekanisme serupananopartikel dapat masuk melalui sel-se akar dan terdistribusi melalui sel-sel pada jaringan xylem.

Pengujian in vitro

Sebagai langkah awal pengujian dalam rangkaian riset terapan untuk mendapatkan biopestisida nano partikel yang layak diaplikasikan dalam budidaya tanaman adalah uji in vitro. Dalam hal ini pengujian dilakukan dengan menempatkan propagule pathogen pada media yang sudah diberikan media yang mengandung biopestisida nanopartikel. Kosentrasi yang digunakan menggunakan pendekatan pada suatu level konsentrasu aplikasi di lapang, dalam hal ini dapat di antara 0,1-1,0% atau di luar kisaran tersebut tergantung pada tujuan dan informasi yang diharapkan.

Patogen dapat ditumbuhkan sebagai *mono culture* adalah dengan menempatannay pada media netrak misalnya PDA-kloremfenikol; semnatar itu

propagulpatogen juga ditumbuhkan pada media yang mengandung biopestisida nanopartikel (BNP) mengcu pada percobaan yang biasa dilakukan untuk uji daya hambat agen hayati atau ekstrak yang diberikan ke dalam media dual culture (Gambar 4.2) [90]. Pada pengujian ini ingin diketahui daya hambat biopestisida nanopartikel terhadap pathogen, Untuk itu diperlukan waktu untuk melihat seberapa kuat daya hambat BNP terhadap pathogen. Pengamatan dilakukan dengan mengukur pertumbuhan jari-jari koloni tiap 24 jam selama empat hari inkubasi.



Gambar 4.2 Penempatan propagul pathogen pada dualculture dan monoculture untuk menguji daya hambat BNP terhadap pathogen

Prosentasi penghambatan BNP terhadap pertumbuhan koloni patoegn diukur dengan rumus (1) [128]:

$$DH = ((r-a)r^{-1}) \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

dengan ketentuan: DH = Porsentase penghambatan pertumbuhan pathogen oleh BNP, r = jejari pertumbuhan koloni pathogen pada media *monoculture*, dan a = jejari pertumbuhan koloni *pathogen* pada media dalam *dual culture*.

Pengujian Lapang.

Pengujian dilakukan dengan mengaplikasikan BN [pada kondisi sesungguhnya pertanaman di lapang. Pengujian dilakukan dimulai saat perkecambahan dan saat tanaman mengalami usia kritis dan fase produksi tanaman. Pada kentang periode kritisnya adaah saat perkecambahan dan bibit atau tanaman muda yang rawan terserang *Fusarium oxysoprium* dengan gejala serangan kelayuan dan kematian bibit. Halyang sama juga pada tanaman cabe dan berbagai tanaman hortikutur lainnya.

BNP yang terbuat dari ekstrak tumbuhan liar kerangkongan (*Ipomea carnea*) dengan ukuran partikel 42 nanometer dan didalamnya terkandung spora bioagent

Trichoderma esperellum dicoba pada bibit dan tanaman kentang dan cabe. Propagul bioagent dengan kepadatan spora 10^6 CFU.gr⁻¹ yang terformulasi dalam BNP diaplikasikan ke dalam tanah media tanam dengan konsentrasi 1,0% dan dosis 50 ml per bibit dan diaplikasikan pada tajuk tanaman muda hingga tanaman dewasa dengan dosis 50-100 ml per tanaman. Pengamatan dilakukan terhadap indeks serangan penyakit yang berbahaya bagi kedua macam tanaman mulai fase bibit hingga tanaman muda, juga pengamatan pertumbuhan tanaman dan produksinya.

$$IS = \left[\sum_{k=0}^{nk} (ni) / (n.k) \right] 100\% \dots\dots\dots(1)$$

dengan ketentuan *IS*=Indeks serangan atau intensitas gangguan peyakit (%), *i* = nilai numerik (skor) tanaman yang menunjukkan gejala yang sesuai baik pada serangan penyakit (Tabel 4.1) atau serangan hama (Tabel 4.2), *ni* = jumlah tanaman yang memiliki skor *i*, *N* = jumlah tanaman yang diamati per satuan percobaan, dan *k* = skor gejala tertinggi.

Tabel 4.1. Skala skor gejala kerusakan tanaman cabe rawit (*Capsicum frutescens*) akibat serangan penyakit tanaman pada tiap petak percobaan

Skor	Gejala kerusakan
0	Tidak ada gejala (sehat)
1	Sebanyak 1-25% tanaman menunjukkan adanya gejala infeksi
2	Sebanyak 25-50% tanaman menunjukkan adanya gejala infeksi atau hingga 25% layu
3	Sebanyak 50-75 tanaman menunjukkan adanya gejala infeksi atau hingga 50% layu
4	Lebih dari 75% tanaman menunjukkan adanya gejala infeksi atau hingga 75% atau lebih layu dan mengalami kematian

Tabel 4.2. Kriteria tingkat serangan hama ulat pada tanaman

Skor	Gejala kerusakan
0	Tanaman sehat, tidak ada daun yang dirusak oleh ulat
1	Sekitar 10-20 % luas daun hilang dimakan dan/atau dirusak oleh ulat
2	Sekitar >20-40% luas daun hilang dimakan dan/atau dirusak oleh ulat
3	Sekitar antara 40-70% luas daun hilang dimakan dan/atau dirusak oleh ulat
4	Lebih dari 70% luas daun hilang dimakan dan/atau dirusak oleh ulat atau tanaman mengalami kematian
5	Tanaman sehat, tidak ada daun yang dirusak oleh ulat

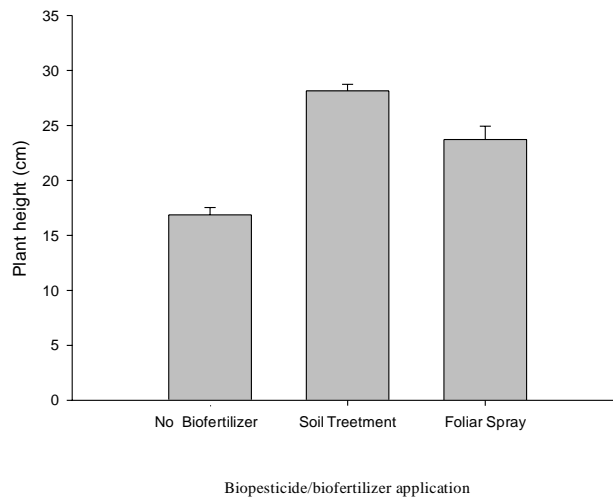
4.2 Evaluasi Respons Tanaman

Upaya menanggulangi serangan hama dan penyakit serta perkembangannya tidak hanya ditujukan pada fase pertumbuhan dan produksi tanaman, tetapi juga fase benih dan tingkat kesuburan tanah media tanam. Keberhasilan dalam perlindungan fase benih akan menjadi jaminan keberhasilan fase kehidupan tanaman berikutnya. Banyak kasus di mana meski ada gangguan di fase perkecambahan dan fase pertumbuhan benih, namun kerugian pada fase berikutnya dan fase produksi dapat diabaikan. Saat ini sudah banyak beredar pestisida yang diaplikasikan secara seed treatment untuk melindungi benih dari gangguan hama dan patogen penyebab penyakit (*damping off*). Namun demikian fakta di lapangan perlakuan benih sering kali mengalami kegagalan atau setidaknya banyak investasi yang harus dikeluarkan untuk tindakan perlindungan tahap awal pertumbuhan tanaman. Untuk itu dalam pengujian BNP perlu dilakukan pada semua fase kehidupan tanaman, sehingga dapat diketahui fase apa saja yang memang layak bagi aplikasi BNP yang diuji tersebut di masa mendatang.

Respons Tanaman Cabe

Dalam pengujian diambil bentuk cair/emulsi diaplikasikan dengan konsentrasi 1% dan disemprotkan pada tajuk secara periodik. Variabel yang diamati: penambahan indeks penyakit (indikasi ketahanan tanaman), pertumbuhan tanaman, dan produksi.

Hasil pengamatan terhadap pertumbuhan tinggi tanaman cabe rawit menunjukkan bahwa biopestisida/biofertilizer bioagent *Trichoderma* berpengaruh sangat nyata ($p < 0.01$) terhadap pertumbuhan tinggi tanaman (Gambar 4.3). Aplikasi sebagai pemupukan pada awal penanaman dan penyemprotan tajuk dapat meningkatkan tinggi tanaman masing-masing 66,9% dan 40,7%. Perbandingan penampilan tanaman di antara ketiga perlakuan ditunjukkan pada Gambar 4.4.

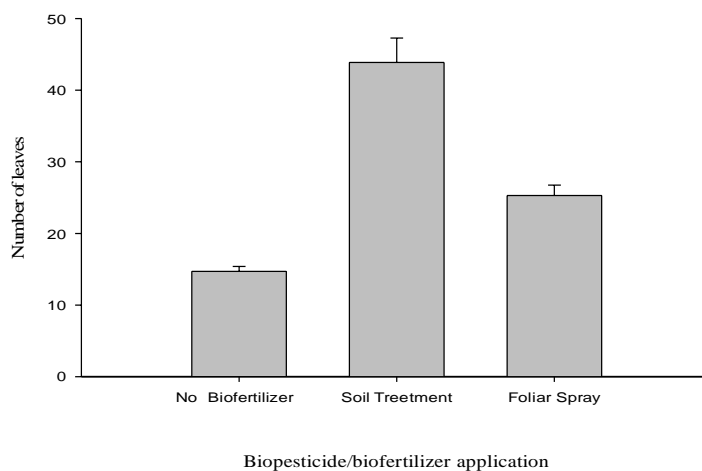


Gambar 4.3. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer *Trichoderma* terhadap tinggi tanaman cabe kecil 6 minggu setelah tanam



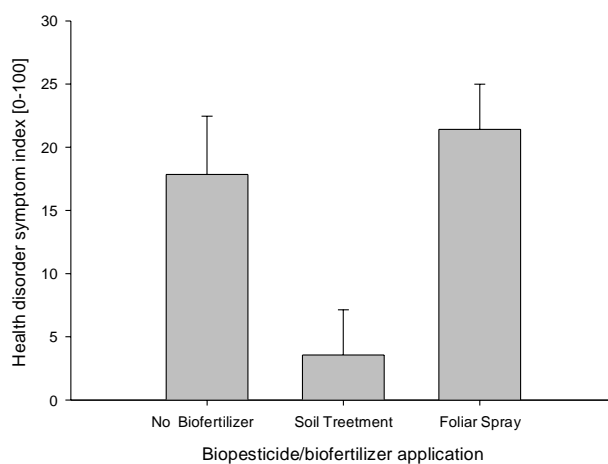
Gambar 4.4. Penampilan tanaman cabe yang diberi dan tanpa aplikasi biofertilizer/ biopestisida *Trichoderma* pada 6 minggu setelah tanam

Hasil pengamatan terhadap jumlah daun tanaman cabe rawit menunjukkan bahwa biopestisida/biofertilizer bioagent *Trichoderma* berpengaruh sangat nyata ($p < 0.01$) terhadap jumlah daun tanaman pada enam minggu setelah tanam (Gambar 4.5). Aplikasi sebagai pemupukan pada awal penanaman dan penyemprotan tajuk dapat meningkatkan jumlah daun tanaman masing-masing 198,1% dan 71,8%.



Gambar 4.5. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap jumlah daun tanaman cabe kecil 6 minggu setelah tanam

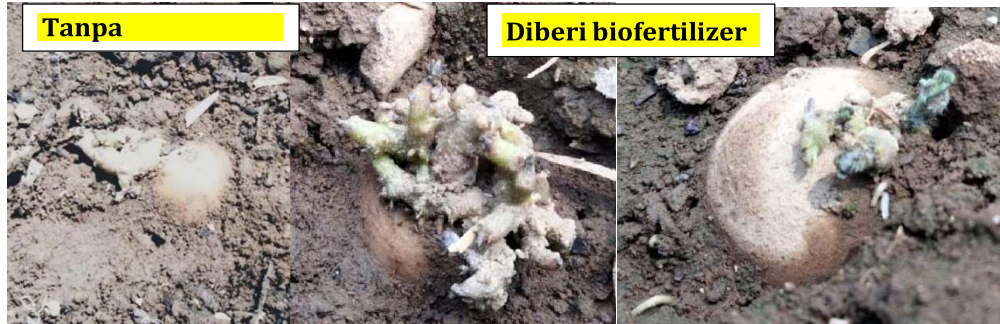
Biopestisida bioagen Trichoderma ini juga efektif berpengaruh menjaga kesehatan tanaman secara nyata ($p < 0.05$) (Gambar 4.6). Aplikasi sebagai soil treatment mampu menekan gangguan penyakit menunjukkan hingga 80%.



Gambar 4.6. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap indeks gejala gangguan kesehatan tanaman cabe kecil 6 minggu setelah tanam

Respons Tanaman Kentang (*Solanum tuberosum* L.)

Aplikasi biopestisida/biofertilizer bioagen Trichoderma menunjukkan pertumbuhan tunas yang lebih pesat dibandingkan dengan tanpa aplikasi. Saat astu minggu setelah tanam, sebagian besar calon tunas belum muncul padaperlakuan tanpa biofertilizer; sementara yang diberi biofertilizer memperlihatkan pertumbuhan tunas yang massif baik diwujudkan dalam percabangan tunas maupun pertumbuhan bakal daun (Gambar 4.7).



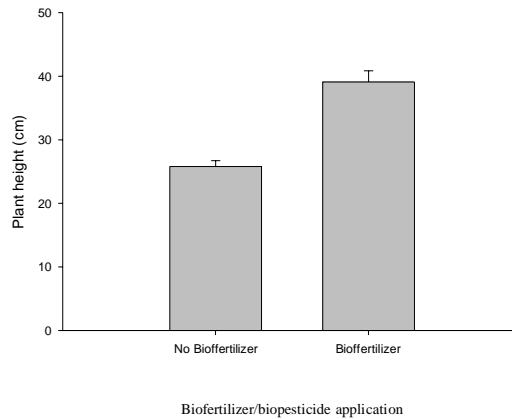
Gambar 4.7. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap pertumbuhan tunas kentang pada satu minggu setelah tanam.

Berdasarkan uji-t diketahui bahwa aplikasi biopestisida/biofertilizer bioagent Trichoderma berpengaruh sangat nyata ($p < 0.01$) terhadap pertumbuhan tinggi dan jumlah cabang tanaman kentang pada tinggaminggu setelah tanam (Tabel 4.3).

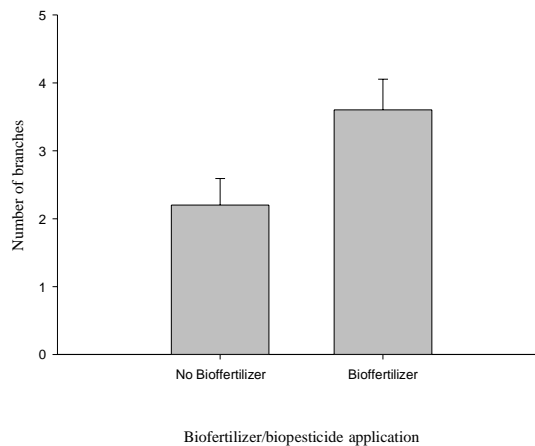
Tabel 4.3. Hasil uji-t pengaruh aplikasi biofertilizer/biopestisida terhadap tinggi dan jumlah cabang tanaman tiga minggu setelah tanam

	Plant height		Number of leaves	
	<i>Biofertilizer</i>	<i>No Biofertilizer</i>	<i>Biofertilizer</i>	<i>No Biofertilizer</i>
Mean	39,1	25,8	3,6	2,2
Variance	30,54444444	8,177777778	2,044444444	1,511111111
Observations	10	10	10	10
Df	18		18	
t Stat	6,75882971		2,34787138	
P(T<=t) one-tail	1,23734E-06		0,0152563	
t Critical one-tail	1,734063607		1,73406361	

Pemberian biofertilizer meningkatkan tinggi tanaman (Gambar 4.8) sebesar 51,6% dan jumlah cabang tanaman kentang (Gambar 4.9) sebesar 63,6% pada saat umur tanaman mencapai tiga minggu setelah tanam.



Gambar 4.8. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer *Trichoderma* terhadap tinggi tanaman kentang pada tiga minggu setelah tanam.



Gambar 4.9. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer *Trichoderma* terhadap jumlah tunas/cabang tanaman kentang pada tiga minggu setelah tanam.

Perbedaan penampilan tanaman saat umur tiga minggu setelah tanam diperlihatkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Penampilan tanaman kentang pada tiga minggu setelah tanam. Kiri: tanaman tanpa biofertilizer, kanan: tanaman yang diberi biopestisida/biofertilizer *Trichoderma*

Respons Kesehatan tanaman

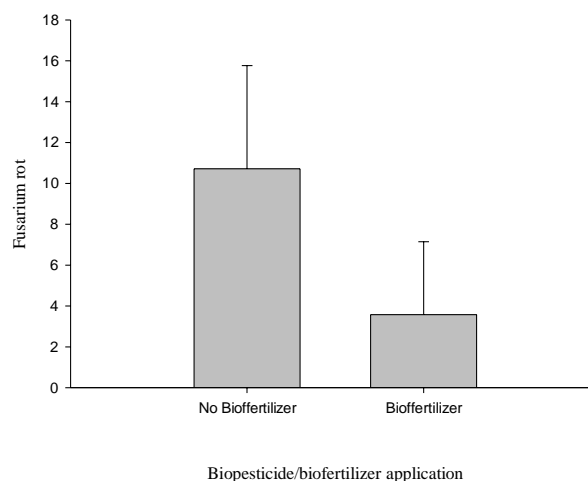
Pada tingkat kecambah kentang khususnya pada pengamatan sekitar satu minggu setelah tanam tampak adanya perbedaan yang signifikan ($p < 0,01$) di mana benih yang ditanam ada media yang sudah diberi biopestisida menunjukkan rata-rata bebas gangguan pathogen soil borne *Fusarium oxysporum* yang bersifat indigenus dilahan pertanaman. Sementara itu hawar tajuk yang disebabkan oleh *Phytophthora palmivora* mulai terdeteksi pada empat minggu setelah tanam.

Berdasarkan uji-t diketahui bahwa aplikasi biopestisida/biofertilizer bioagent *Trichoderma* belum berpengaruh nyata terhadap penurunan layu *Fusarium*, namun berpengaruh sangat nyata ($p < 0,01$) terhadap penurunan indeks gejala hawar tajuk tanaman kentang (Tabel 4.4).

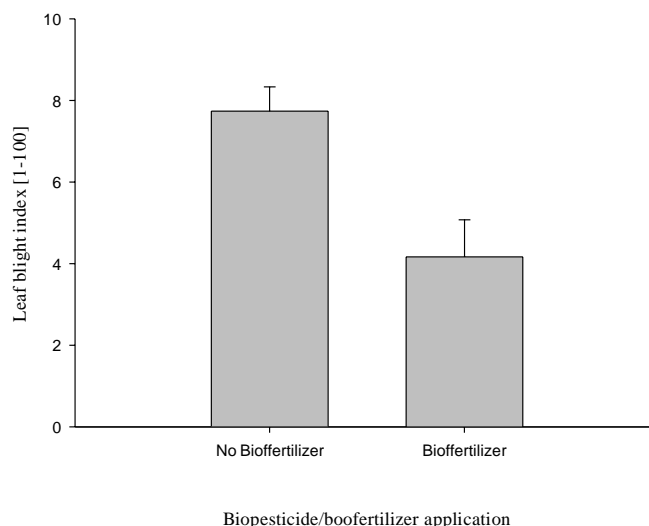
Tabel 4.4. Hasil uji-t pengaruh aplikasi biofertilizer/biopestisida terhadap indeks gejala busuk fusarium (*Fusarium rot*) yang disebabkan oleh *Fusarium oxysporum* dan hawar tajuk (*Leaf blight*) yang disebabkan oleh *Phytophthora palmivora* tanaman pada dua dan empat minggu setelah tanam

	<i>Fusarium rot</i>		<i>Leaf blight</i>	
	<i>Biofertilizer</i>	<i>No Biofertilizer</i>	<i>Biofertilizer</i>	<i>No Biofertilizer</i>
Mean	10,71428571	3,571428571	7,738095238	4,166666667
Variance	178,5714286	89,28571429	2,48015873	5,787037037
Observations	7	7	7	7
Df	12		12	
t Stat	1,154700538		3,286335345	
P(T<=t) one-tail	0,135344997		0,003251663	
t Critical one-tail	1,782287556		1,782287556	

Pemberian biopestisida/biofertilizer meskipun belum berpengaruh nyata (Gambar 4.11) berdasarkan uji-t namun dapat menurunkan gangguan pathogen pembusuk umbi bibit ini hingga 66,1%. Sementara itu pengaruhnya sangat nyata ($p < 0,01$) terhadap penurunan gejala hawar daun (Gambar 4.12) dan aplikasinya dapat menurunkan indeks gejala hingga 46,2%.



Gambar 4.11. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap indeks penyakit busuk Fusarium tanaman kentang pada tiga minggu setelah tanam.



Gambar 4.12. Pengaruh aplikasi biopestisida/biofertilizer Trichoderma terhadap indeks penyakit hawar daun (leaf blight) tanaman kentang pada empat minggu setelah tanam.

4.3 Keunggulan Biopestisida Nanopartikel

Sesuai dengan definisi “pestisida” maka BNP sebagai bahan yang dimanfaatkan untuk dapat mengendalikan penyakit dan hama (OPT atau organisme pengganggu tanaman), bukan hanya ditujukan pada penekanan terhadap aktivitas jasad pengganggu, tetapi juga menciptakan kondisi yang membuat OPT tidak mampu melakukan aktivitasnya yang merugikan tanaman. Kondisi ini dapat berupa penciptaan kondisi yang nyaman bagi tanaman dalam memperoleh nutrisi dari dalam tanah. Untuk itu BNP juga bertindak sebagai nanofertilizer dan BNP yang diperkaya dengan penambahan bioagent Trichoderma juga

dapat bersifat sebagai pestisida hayati sekaligus pupuk hayati (biofertilizer). Tanaman yang sehat karena terpenuhi segala kebutuhan yang diperoleh dari rhizosfer justru akan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan OPT. Dengan demikian juga BNP yang diuji memiliki kapasitas sebagai nanofertilizer yang efeknya justru lebih unggul dibandingkan dengan pupuk kimia sintetis yang selama ini lebih banyak digunakan dalam masyarakat petani.

BNP sebagai nanofertilizer tidak bersifat toksik dan tidak membahayakan kesehatan manusia serta aman bagi lingkungan dibandingkan pupuk konvensional; bahkan nanofertilizer meningkatkan kesuburan tanah, kualitas tanaman, dan hasil panen serta meningkatkan efisiensi dalam biaya produksi [129]. Fakta ini juga ditunjukkan pada hasil penelitian yang membuktikan nanofertilizer kalsium fosfat amorf secara substansial menghemat biaya produksi dan berpotensi untuk digunakan oleh petani kecil dalam meningkatkan produksi tanamannya [130]. Jika dibandingkan dengan pupuk kimia yang terbuat dari senyawa anorganik telah digunakan oleh petani dalam jumlah besar untuk meningkatkan hasil panen [131], maka BNP memberikan alternatif yang menjanjikan. Pupuk kimia berfungsi lebih cepat daripada pupuk organik karena langsung larut dalam air, dapat ditemukan dalam bentuk butiran atau cair, dan lebih murah. Namun, karena beberapa bahan kimia yang tidak larut hadir dalam pupuk P, termasuk mono-amonium fosfat, diammonium fosfat, dan tiga superfosfat, maka senyawa-senyawa ini mendorong kelarutan pupuk fosfat menjadi meningkat [132]. Bahan pembawa dan bahan pengisi BNP yang diuji merupakan bahan organik yang ketika diaplikasikan ke dalam tanah akan dirombak oleh mikroorganisme tanah, sehingga melepaskan nutrisi penting. Di samping itu bahan organik akan berperan dalam meningkatkan tekstur tanah, meningkatkan aktivitas bakteri dan jamur tanah, dan menyimpan air untuk jangka waktu yang lebih lama, dengan demikian bahan organik ini lebih ramah lingkungan [133]. Unsur-unsur makro yang diperlukan tanaman seperti N, P, dan K bila dikonsumsi dalam jumlah yang cukup secara tidak langsung akan berpengaruh dalam melindungi tanaman dari hama dan penyakit. Namun demikian pelepasan unsur-unsur makro dan mikro dari BNP relative lebih lambat dibandingkan dengan pupuk kimia. Dalam jangka menengah dan Panjang aplikasi BNP sebagai biofertilizer merupakan alternatif yang sangat baik bagi penggunaan pupuk sintetis karena mereka meningkatkan kualitas tanah dan mengandung nutrisi penting yang diperlukan untuk kesuburan dan produktivitas tanaman, juga murah, terbarukan, dan ramah lingkungan [134].

Di dalam tanah selalu dijumpai beberapa mikroorganismepenting dan bermanfaat bagi tanaman seperti Azotobacter, Anabaena, dan Rhizobium, yang terlibat dalam fiksasi N, dan Pseudomonas spp., yang berfungsi sebagai bakteri pelarut fosfat, bertindak sebagai biofertilizer dengan membantu tanaman dalam penyerapan dan penyerapan nutrisi [135]. BNP memberikan pengaruh positif bagi kehidupan mikroorganisme tanah tersebut. Berbagai bakteri dan di dalam rhizosfer akan menghasilkan beberapa jenis senyawa bioaktif, asam organik, vitamin, hormon pertumbuhan, dan senyawa antagonis, sehingga melindungi tanaman dari penyakit, selain memperbaiki nitrogen, dan meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman [136].

BAB 5

TEKNIK PERLINDUNGAN TANAMAN HORTIKULTURA

5.1 Prinsip Aplikasi Biopestisida Nano

Biopestisida nano memiliki dua macam kelompok bahan aktif yaitu ekstrak tumbuhan yang dikenal sebagai pestisida nabati dan kelompok agen hayati yang biasa disebut sebagai pestisida hayati. Untuk itu maka teknik penanganannya berbeda di antara keduanya mengingat di satu pihak adalah menangani benda mati yaitu senyawa organik dalam bentuk pestisida nabati, dan di pihaklain adalah menangani makhluk hidup pada pestisida hayati.

Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam aplikasi biopestisida bagi kegiatan perlindungan tanaman, yaitu:

- (i) Konsentrasi aplikasi harus mengikuti rekomendasi. Biasanya pestisida dirancang untuk diencerkan mulai dari 40 kali (konsentrasi 2,5%) hingga 200 kali (0,5%). Rekomendasi disusun berdasarkan pengujian lapang yang menunjukkan tingkat konsenrasi yang idrekmondasikan tersebut efektif sesuai yang ditargetkan. Konsentrasi yang tinggi dapat berdampak pada peusakan jaringan daun, tetapi konsentrasi yang terlampau rendah selain tidak efektif juga menjadi tidak efisien;
- (ii) Dosis aplikasi harus sesuai rekomendasi. Dosis adalah banyaknya bahan yang diaplikasikan agar memberikan efek pengendalian seperti yang ditargetkan. Sepertinya halnya pada konsentrasi, kelebihan dan terlalu rendahnya dosis juga akan berdampak pada rendahnya efektivitas. Rekomensi dosis aplikasi biasanya didasarkan pada indikasi tersebar dan tercakupnya permukaan semprot oleh doplet. Menetesnya suspensi yang disemprotakan dari permukaan daun juga merupakan salah satu indicator penggunaan dosis yang berlebihan;
- (iii) Frekuensi aplikasi. Berapa kali dilakukan penyemprotan selama periode tanam

selalu didasarkan pada hasil pengujian di lapang. Penyemprotan pestisida nanopartikel bisa dilakukan sebagaimana pestisida konvensional pada umumnya. Penyemprotan dapat dilakukan tiap dua minggu atau dimulai ketika tajuk sudah berkembang optimal dan diulang beberapa kali hingga menjelang panen. Untuk aplikasi di tanah baik yang diharapkan memberi efek biofertilisasi maupun biocontrol tergantung pada jenis tanamannya. Pada tanaman sayuran dan hortikultur yang berumur pendek, aplikasi lewat tanah dilakukan sekali saat olah tanah atau saat tanam atau ditanam beberapa saat sebelum tanam. Pada tanaman keras dapat diulang tiap enam bulan atau pemberian dilakukan saat di pertengahan pertumbuhan vegetative atau saat menjelang kemunculan bunga.

- (iv) Khusus pada pestisida nano yang diformulasi dengan bioagent jamur kondisi penyimpanan harus menjadi perhatian serius. Pestisida yang sudah diencerkan (suspensi aplikasi) harus segera disemprotkan hingga habis. Penyimpanan suspensi aplikasi yang tidak habis akan merusak propagule agen hayati yang terkandung di dalamnya. Konsentrasi yang rendah pada suspensi akan mendorong seluruh spora berkecambah dan hifa bertumbuh untuk kemudian mengalami kematian, sehingga penggunaan pada beberapa hari berikutnya akan tidak efektif. Hifa jamur akan bertahan rata-rata sekitar satu minggu, ketika terjadi persaingan antara hifa dan nutrisi terbatas, maka sebagian besar hifa mengalami kematian dan tidak mampu bertumbuh. Hal ini berbeda pada formula yang konsentrasinya tinggi jauh melampaui konsentrasi isi sel. Pada kondisi seperti ini sel khususnya spora akan bertahan untuk tidak berkecambah atau menghentikan laju metabolismenya dan seperti dorman selama penyimpanan. Spora akan berkecambah ketika pestisida diencerkan untuk disemprotkan untuk selanjutnya melaksanakan aktivitas hidupnya memberimanfaat bagi tanaman dan kehidupan biologi di dalam tanah.
- (v) Biopestisida harus disimpan di bawah suhu kamar (26-30°C) untuk mencegah terjadinya perubahan kimia bahan aktifnya. Khusus untuk pestisida hayati harus dicegah terpapar kondisi lingkungan fisik dengan dinamika fluktuasi yang tinggi dan jangan terpapar sinar matahari.
- (vi) Sebaiknya aplikasi biopestisida nano jangan campur dengan penyemprotan pestisida kimia baik secara bersamaan atau berdekatan waktunya. Hal ini

untuk menghindari efek langsung bahan kimia pada pestisida sintetik terhadap bahan aktif biopestisida atau pestisida hayati. Jika memang terpaksa, maka sebaiknya diberi jeda waktu yang cukup jauh misalnya paling pendek satu minggu.

- (vii) Aplikasi sebaiknya dilakukan pagi atau sore hari. Penyemprotan yang dilakukan menjelang siang hari terancam terjadinya kerusakan bahan aktif akibat intensitas penerangan dan suhu yang tinggi. Aplikasi pagi hari memberikan waktu yang cukup bagi bahan aktif biopestisida agar dapat terserap dan terdisposisi dengan baik pada permukaan epidermis jaringan tanaman yang disemprot. Aplikasi pada sore hari dapat memberikan efektivitas yang optimal mengingat waktu yang diberikan untuk proses predisposisi bahan menjadi lebih lama.

5.2 Aplikasi pada Tanah

Aplikasi pada tanah biopestisida nano (BNP) bertujuan memberikan efek pemupukan yang dapat memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman sekaligus memberi perlindungan bagi kesehatan tanaman dengan cara membuat tanaman tahan dan toleran terhadap gangguan, efek penekanan terhadap jasad pengganggu, menetralkan gangguan abiotik di perakaran baik fisik maupun kimia. Dengan demikian prinsip-prinsip bagaimana nutrisi dapat membantu tanaman menjadi fokus kajian.

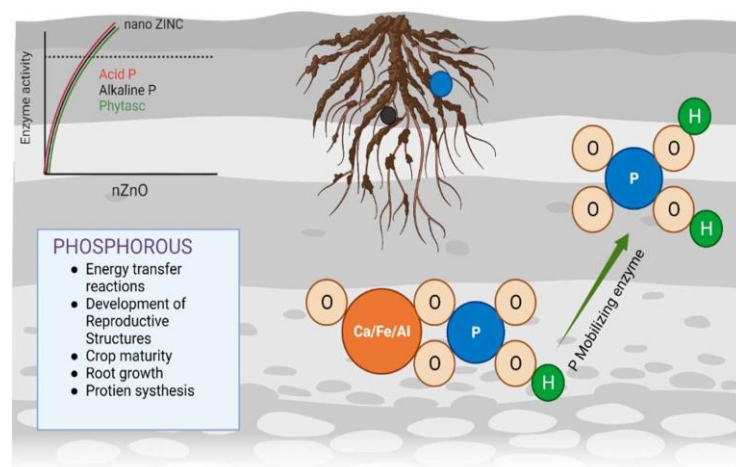
Nanofertilizer Makronutrien

Nanofertilizer makronutrien merupakan kombinasi nanomaterial dan unsur-unsur hara makro seperti N, K, P, Ca, Mg, dan S yang memungkinkan pengiriman berbagai nutrisi tersebut dapat dipertukarkan ke membran sel akar tanaman dalam jumlah yang tepat [137]. Nanofertilizer berbasis makronutrien terdiri dari satu atau lebih nutrisi yang dikapsulasi dalam nanomaterial tertentu. Pemanfaatan NPK dalam pertanian kemungkinan akan meningkat di tahun-tahun mendatang. Oleh karena itu, penelitian perlu dilakukan untuk mengembangkan pupuk baru dengan efisiensi hara tinggi yang ramah lingkungan guna menggantikan pupuk mikronutrien konvensional [138].

Saat ini telah dikembangkan nanofertilizer majemuk N dengan menggunakan NP hidroksiapatit berlapis urea sebagai sumber N dan P yang kaya dengan kompatibilitas kimia

yang baik, memungkinkan pengiriman terarah dan pelepasan berlangsung lambat [139]. Penggunaan pupuk nanopartikel majemuk menjadi penting untuk mengantisipasi rendahnya kinerja mikroorganisme pemobilisasi P di dalam tanah sebagai konsekuensi rendahnya karbon organik tanah, yang membatasi pasokan energi bagi mikroorganisme pemobilisasi P, dan tingginya penguapan air dari permukaan tanah [140].

Kasus yang paling umum terjadi di mana meskipun P tersedia di dalam tanah berada pada jumlah yang cukup bagi tanaman, namun ketersediaan P di dalam tanah bagi pemenuhan kebutuhan tanaman sesuai kapasitas tukar kation yang dimilikinya seringkali rendah. Untuk mengatasi ini nanofertilizer-Zn digunakan untuk meningkatkan efisiensi konversi P total menjadi P yang tersedia bagi tanaman. Enzim seperti fosfatase dan fitase membutuhkan Zn sebagai kofaktor. Penambahan ZnO NP meningkatkan aktivitas enzim ini dan penyerapan P sebesar 11% pada kacang-kacangan dan sereal (Gambar 5.1).



Gambar 5.1. Nanopartikel ZnO (NP) meningkatkan aktivitas enzim pemobilisasi P [121]

Pupuk Nano Mikronutrien

Beberapa logam termasuk Seng (Zn) adalah kofaktor struktural atau regulator untuk berbagai enzim dan protein yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman dan terlibat dalam respons pertahanan terhadap patogen berbahaya, regulasi auksin, sintesis karbohidrat, dan metabolisme protein [140]. Sementara itu Boron (B) tidak hanya terlibat dalam biosintesis dinding sel dan lignifikasinya pada tanaman, tetapi juga memainkan peran penting dalam pertumbuhan tanaman dan proses fisiologis lainnya [141]. Oleh karena itu, pemberian Zn dan B dalam jumlah yang tepat sangat penting untuk mencapai produksi maksimum dengan tanaman hortikultura berkualitas tinggi. Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa

penggunaan nanopartikel Silika meningkatkan pertumbuhan bibit dan mengaktifkan enzim antioksidan untuk melawan stres biotik dan abiotik, di mana nanofertilizer ini akan meningkatkan penyerapan kalium dan mengurangi penyerapan natrium [121] pada lahan salin.

Tahapan dalam aplikasi nanofertilizer dan biopestisida nano adalah meliputi:

- (i) Melakukan pra aplikasi berupa pengkondisian lahan berupa dan waktu aplikasi. Sebaiknya tanah sudah siap tanam atau berada pada akhir fase pengolahan tanah, Sementara itu gulma sebaiknya sudah dibersihkan dari lahan untuk optimalisasi efek aplikasi. Waktu aplikasi sebaiknya dilakukan pagi hari sebelum matahari menerpa tajuk atau sebelum pukul 07-08.00 (WIB) dan yang terbaik sore hari ketika cahaya matahari mulai meninggalkan pertanaman atau sesudah pukul 15.00 (WIB);
- (ii) Melaksanakan *Seed Treatment*, khususnya untuk melindungi benih. Umbi kentang yang digunakan sebagai bibit rawan menyimpan propagule patogen pembusuk yang akan muncul ketika awal pertunasan dari umbi dan saat kemunculan tajuk. Aplikasi BNP-bioagent *Trichoderma* sebaiknya dilaksanakan sesaat menjelang tanam. Aplikasi bisa dilakukan di bedeng persemaian untuk cabe dan berbagai tanaman hortikultur lainnya;
- (iii) Aplikasi BNP-bioagent juga dapat dilakukan sebagai bagian dari upaya pemeliharaan dan mengantisipasi kemunculan gangguan penyakit di pertanaman. Tidak harus eksekusi aplikasi didasarkan pada hasil monitoring yang menunjukkan potensi kemunculan gangguan, tapi dapat diberikan dengan pertimbangan bahwa agen hayati yang terformulasi dalam biopestisida nano atau fertilizer nano diberikan untuk memberikan efek dukungan bagi pertumbuhan tanaman sebagai respons pasca penyerapan senyawa metabolit sekunder yang diekspresikan agen hayati;
- (iv) Sangat dimungkinkan aplikasi biopestisida nano atau fertilizer

nano pada fase menjelang dan pasca panen dengan tujuan untuk memberikan perlindungan produk/hasil panen dari infeksi pathogen yang terbawa darilahan hingga ke tempat penyimpanan. Perlindungan seperti ini sangat diperlukan untuk mencegah penyebaran pathogen penyebab patek pada buah cabe yang disebabkan oleh *Colletotrichum* atau busuk pada benih dan umbi bawang merah oleh *Fusarium oxysporum* dan berbagai mikroba patogenik lainnya.

5.3 Aplikasi pada Tajuk

Aplikasi biopestisida nano atau fertilizer nano pada tajuk dilakukan dengan melakukan penyemprotan dengan indikator kecukupannya adalah terbasahnya seluruh permukaan tajuk yang ditargetkan oleh droplet semprota. Dengan pengenceran hingga konsentrasi 1,0%, maka sesungguhnya bioagent yang terkandung dalam droplet berada pada kepadatan propagule yang potensial untuk menyebabkan terhambatnya aktivitas pathogen dan munculnya efek menguntungkan misalnya dalam bentuk perubahan fisiologis dan pertumbuhan jaringan pada tunas. Untuk bioagent *Trichoderma* dalam tiap milliliter suspensi yang terdeposisi mengandung 10^4 CFU.mL⁻¹ konidiospora aktif.

Beberapa hal yang menjadi pertimbangan dalam aplikasi pada bagian tajuk tanaman adalah sebagai berikut:

- (i) Seperti halnya pada perlakuan tanah, sebelum dilakukan penyemprotan tajuk sebaiknya dilakukan pengkondisian pertanaman, di antaranya dilakukan pembersihan tajuk dari bagian-bagian yang rusak dan mati, pembersihan gulma untuk menciptakan optimalisasi efek aplikasi, serta memilih waktu aplikasi yang tepat dan aman yaitu pagi hari sebelum pukul 07-08.00 (WIB) atau sore hari sesudah pukul 15.00 (WIB);
- (ii) Aplikasi BNP-bioagent pada permukaan daun memerlukan

kepastian predisposisi propagule agen hayati di permukaan tubuh tanaman; formula sebaiknya sudah mengandung surfactant untuk mengatasi kendala perbedaan tegangan permukaan yang tinggi yang dapat mencegah jatuhnya droplet dengan sempurna sehingga propagule agen hayati dapat memulai aktivitasnya di atas epidermis sel permukaan tanaman dengan baik;

- (iii) Seperti halnya pada aplikasi ke dalam tanah, aplikasi pada bagian tubuh tanaman khususnya pada bagian tanaman yang panen (buah, daun, batang) dapat terlindungi dari gangguan pathogen *soil borne* di tempat penyimpanan dan selama distribusi, termasuk memberi perlindungan bagi produk atau hasil panen dari gangguan mikroba kontaminan pembusuk yang akan menurunkan daya tahan bahan dan penurunan kualitas.

BAB 6 PEMBAHASAN UMUM

6.1 Biopestisida Nano dan Bioagent

Formulasi bioagent *Trichoderma* dalam emulsi ekstrak tumbuhan liar (*Ipomea carnea*) berukuran 42 nanometer tidak mengubah dimensi partikel bahan pembawa dan bahan pengisi. Ada dua mekanisme yang bekerja yaitu yang berasal dari aktivitas enzim dan bahan aktif yang terkandung dalam ekstrak tumbuhan yang dapat berpengaruh baik langsung maupun tidak langsung terhadap kehidupan tanaman.

Aktivitas *Trichoderma* yang diaplikasikan ke dalam tanah di antaranya menghasilkan: (i) senyawa ekstraseluler enzimatis yang berperan mendegradasi bahan organik dan hasil mineralisasinya adalah nutrisi yang diperlukan tanaman untuk pertumbuhan dan produksi [142], dan (ii) senyawa yang berperan sebagai “fitohormon” yang setelah diserap tanaman akan memacu pertumbuhan tanaman [143], dan (iii) toksin dan enzim kitinolitik yang memunculkan efek mikoparasit dan biocontrol bagi jasad pengganggu tanaman khususnya di perakaran dan pangkal batang [144]. Respons tanaman terhadap ketiga peran bioagent tersebut selain akan meningkatkan kualitas pertumbuhan juga menginduksi ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik seperti gangguan penyakit dan hama bahkan memberi perlindungan yang komprehensif bagi tanaman.

Baik aplikasi melalui tanah sebagai soil treatment maupun lewat penyemprotan tajuk, bioagent akan mengembangkan kemampuan dirinya mulai beberapa saat setelah terdisposisi di permukaan daun dan di antara agregat tanah hingga beberapa waktu berikutnya. Kemampuannya memanfaatkan sumberdaya secara cepat dan kompetitif terhadap mikroba lain termasuk patogen, menyebabkan efek perlindungan kesehatan bioagent terhadap tanaman teramati secara nyata. Pada pengujian yang diaplikasikan pada tanaman kentang dan cabe terbukti bahwa aktifitas bioagent efektif memberi perlindungan mulai dari fase perkecambah, bibit

dan tanaman muda, hingga tanaman dewasa yang siap berproduksi.

Mengacu pada bukti-bukti, termasuk hasil pengujian BNP pada tanaman hortikultur, dapat direkomendasikan bahwa penggunaan senyawa-senyawa agrokimia dalam pertanian berkelanjutan harus diminimalkan, dan hendaknya diciptakan sistem pemberian nutrisi tanaman yang efektif dan tidak berbahaya bagi lingkungan. Pernyataan ini sangat sesuai diimplementasikan pada sebagian besar tanah lahan tropis dan subtropis yang cenderung bersifat asam di mana bioagent dapat dimanfaatkan bagi penyediaan P melalui pelepasan P tidak terlarut sehingga penyerapan fosfat meningkat secara signifikan [145]. Aplikasi BNP-bioagent ini merupakan salah satu metode mutakhir yang memanfaatkan teknik nanoteknologi dan nanoengineering untuk meningkatkan produktivitas tanaman [146]. Teknologi alternatif ini sangat cocok dikembangkan di negara-negara berkembang dengan sumber daya batuan fosfat asli yang melimpah, di mana batuan fosfat diproses secara industri, dan penggunaan batuan fosfat yang tepat sebagai sumber P dapat berkontribusi pada pembangunan global [147]. Dalam konteks ketersediaan P yang rendah di banyak lahan di Indonesia dan berbagai kawasan tropis, penggunaan BNP-bioagent sangat penting dalam mendukung pengelolaan P lahan dan budidaya tanaman hortikultur berkelanjutan yang berdampak pada optimalisasi penggunaan lahan, meminimalkan erosi, menjaga kualitas tanah, efisiensi pemupukan dan pemberi sumberdaya bagi kebutuhan tanaman [148]. Khusus bagi manfaat perlindungan tanaman, aplikasi BNP diproyeksikan dapat memberikan kesiapan petani dalam mengantisipasi gangguan ketersediaan pupuk dan fluktuasi harga input untuk pertanian terutama pupuk dan pestisida.

Ukuran partikel BNP-bioagent seperti halnya pada umumnya pestisida dan pupuk nano yang berukuran di bawah 100 nanometer (nanopartikel) ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan dan distribusinya. Meski potensi penggunaannya tampak besar, namun penggunaan nanomaterial untuk memberikan nutrisi penting ke tanaman melalui sistem pengiriman berbasis nanoteknologi masih baru dan memerlukan penelitian lebih lanjut [149]. Beberapa pertimbangan terkait penelitian terapan dan pengembangan teknologi nano bagi pupuk dan pestisida (biopestisida nano), yaitu:

- (i) Pupuk nano N dan P mungkin menerima lebih banyak perhatian karena tingkat aplikasinya yang tinggi dan masalah ketersediaan. Investigasi dapat membandingkan Ca-NP dari CaCO_3 dengan yang dari sumber Ca lainnya, seperti

- CaSO₄ atau CaCl₂, atau dapat membandingkan beberapa nutrisi, seperti Ca- dan N-NP, menggunakan Ca (NO₃)₂ yang larut sebagai kontrol;
- (ii) dalam kasus mikronutrien, studi mendalam dapat dilakukan untuk mengklarifikasi dampak variabel yang memengaruhi ketersediaannya dalam kondisi lapangan. Membandingkan nilainya dengan pupuk tradisional untuk biofortifikasi dan teknik aplikasi (menggunakan fertigasi) dengan pupuk mikronutrien yang tersedia secara komersial adalah pilihan lain. Karena masalah utama dengan jenis pupuk ini adalah nano-toksitas, dosis optimal untuk setiap tanaman (tanpa efek samping apa pun) harus ditentukan;
 - (iii) saat ini, tidak ada bukti konklusif yang mendukung kemampuan pupuk berbasis nanocarrier untuk meningkatkan FUE melalui peningkatan transfer nutrisi ke dalam jaringan atau sel tanaman atau untuk menurunkan bahaya lingkungan yang terkait dengan penggunaan pupuk konvensional. Ada peluang untuk menemukan nanomaterial spesifik, seperti SiO₂-NPs, Fe₂O₃-NPs, dan CNTs, yang lebih murah dan lebih efektif daripada pembawa yang dapat diakses sebelumnya, seperti zeolit. Perkembangan ini akan membantu penyerapan zat aktif secara bertahap dan akan meminimalkan jumlah masukan yang dibutuhkan dan limbah yang dihasilkan. Selain itu, desain nanocarrier dapat memungkinkannya untuk bertindak sebagai jangkar bagi akar tanaman atau bagi bahan organik dan struktur tanah di sekitarnya. Memahami interaksi kimia dan konformasi antara struktur skala nano pengiriman dan struktur serta bahan tanah yang ditargetkan diperlukan untuk mencapai hal ini;
 - (iv) telah ditetapkan secara meyakinkan bahwa NP/nanomaterial yang berbeda pada konsentrasi tinggi berbahaya bagi pertumbuhan tanaman, yang pada akhirnya bergantung pada ukuran partikelnya. Oleh karena itu, titik pemeriksaan dapat dikembangkan dalam penyelidikan di masa mendatang untuk menentukan konsentrasi yang diperlukan dan untuk lebih memahami mekanisme yang mendasari peningkatan pertumbuhan dan produktivitas tanaman pangan karena penerapan nanofertilizer. Namun, nanoteknologi mungkin dapat mengendalikan pelepasan agrokimia yang berkelanjutan dan pengiriman makromolekul yang ditargetkan ke lokasi, seperti pupuk dan pestisida, sehingga meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit, penggunaan nutrisi yang efisien, dan peningkatan pertumbuhan tanaman. Selain itu, teknik modern lainnya, seperti

sistem navigasi berbasis satelit, termasuk penginderaan jarak jauh, sistem penentuan posisi global, sistem informasi geografis, dan teknologi informasi, dapat digunakan untuk memastikan bahwa tanaman dan tanah menerima nutrisi yang tepat untuk produktivitas optimal [150-151].

6.2 Nanofertilizer Meningkatkan Kesuburan Tanah dan Hasil

Penggunaan BNP-biagent yang sudah diuji dan memberikan dampak positif bagi peningkatan pertumbuhan tanaman tampak menunjukkan suatu peran penting materi nano bahan aktifnya yang direspons oleh tanaman yang mencerminkan efek biofertilisasi bagi tanaman. Dalam hal ini bukan saja nutrisi esensial makro seperti N, P, K, Ca, Mg, dan S, tetapi juga berbagai nutrisi esensial mikro atau *trace element* makin tersedia bagi pemenuhan kebutuhan tanaman sebagai efek aplikasi BNP. Kondisi ini tentu menjadi alternatif penting di masa depan bagi penggunaan pupuk tradisional dan/atau pupuk konvensional yang selalu berbasis bahan kimia sintetis [152].

Pupuk tradisional dan konvensional seringkali diaplikasikan dalam jumlah besar, sementara itu efisiensi penyerapannya rendah. Kasus seperti ini sering dijumpai pada pemberian pupuk N dan P baik sebagai pupuk tunggal (urea dan TSP) atau dalam bentuk majemuk (NPK) dengan berbagai varian komposisi. Rendahnya efisiensi penyerapan nutrisi yang diikuti pula oleh perubahan cepat bentuk-bentuk persenyawaan kimia yang tidak dapat digunakan oleh tanaman, sudah tentu akan berdampak negatif pada tanah dan lingkungan, di antaranya adalah munculnya emisi gas rumah kaca yang berbahaya dan peningkatan laju eutrofikasi pada badan air dan lahan [153].

Nanofertilizer melepaskan nutrisi secara bertahap, yang dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi tanpa efek samping terkait. Nanofertilizer ini dibuat untuk memberikan nutrisi secara perlahan dalam jangka waktu yang lama dan untuk mengurangi kehilangan nutrisi secara signifikan, sehingga memastikan keamanan lingkungan. Pupuk tradisional/konvensional yang biasanya berbasis senyawa kimia sintetis toksik tidak hanya mahal tetapi juga dapat berbahaya bagi manusia dan lingkungan, sedangkan nanofertilizer memainkan peran penting dalam menjaga kesuburan tanah dan meningkatkan hasil panen. Nanofertilizer meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui metode aplikasi langsung maupun melalui daun. Penggunaan nanofertilizer merupakan alternatif terbaik untuk mencegah eutrofikasi yang biasa terjadi pada aplikasi pupuk kimia

konvensional serta meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi dalam pertanian [154]. Ketika nanofertilizer diaplikasikan ke tanah, agregasi terjadi terlebih dahulu sebagai respons komponen anorganik dan organik tanah dalam bentuk efek modifikasi nanomaterial pada nanofertilizer, sehingga terjadi peningkatan ukuran pori-pori tanah yang berdampak positif pada mobilitas nanopartikel NP dan aktivitas mikroorganisme tanah [155].

Dengan demikian nanofertilizer dalam BNP-biagent dapat meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi, dimana nutrisi akan terikat pada nano-absorben yang diaplikasikan sendiri atau dalam kombinasi dengan unsur-unsur anorganik, sehingga pelepasan nutrisinano-fertilizer akan berada pada tingkat yang lebih lambat daripada pupuk konvensional. Pendekatan ini akan meminimalkan pencucian nutrisi ke dalam air tanah dan meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi. Untuk mencapai efisiensi yang cukup besar dalam mewujudkan dan mempertahankan ketahanan pangan, baik sektor tanaman pangan maupun hortikultura, maka pilihan nanofertilizer akan menjadi lebih prioritas dibandingkan pupuk kimia.

Pada kasus lain di tanah yang kekurangan Zn, penambahan ZnO-nanopartikel ke pupuk lain meningkatkan produktivitas tanaman serta memberikan efek positif pada bakteri rizosfer dengan merangsang pembentukan metabolit sekunder yang meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan mendorong kolonisasi permukaan akar [156]. Penggunaan nanomaterial yang tinggi, tanaman mampu menyerap nutrisi dan bahan kimia esensial secara efektif dan memberikan alternatif yang kuat dibandingkan menggunakan pupuk kimia konvensional [157-158].

Beberapa faktor baik yang intrinsik maupun ekstrinsik pada tanaman sangat bergantung pada penyerapan, pengangkutan, dan akumulasi nanofertilizer, serta rute paparan. Faktor intrinsik utama yang menentukan kemanjuran NP adalah lapisan permukaan dan ukuran partikel, sedangkan faktor ekstrinsik yang sangat memengaruhi potensi aplikasi nanofertilizer pada tanaman meliputi tekstur tanah, pH tanah, dan bahan organik [159]. Penyerapan nanofertilizer melalui akar dan daun secara signifikan memengaruhi perilaku, bioavailabilitas, dan penyerapannya pada tanaman [160]. Mereka mengendalikan aksesibilitas nutrisi pada tanaman dengan memperlambat dan mengendalikan mekanisme pelepasan, yang menguntungkan bagi petani [161]. Nanofertilizer harus disintesis sesuai dengan kebutuhan nutrisi oleh tanaman yang diusulkan, dan biosensor harus ditambahkan ke pupuk canggih terbaru, yang akan mengendalikan pasokan nutrisi sesuai dengan

kebutuhan nutrisi dalam tanah dan kondisi periode pertumbuhan tanaman [162].

Nanopartikel dapat secara efektif memberikan mikronutrien seperti Zn dan Fe, serta Fe, Cu, Mn, Mo bahkan N, P, dan K untuk tanaman selama pertumbuhan tanaman dan menghasilkan produksi buah-buahan dan sayuran [163]. Selain itu nanopartikel memiliki sifat yang sangat tahan, tidak mudah terdegradasi, serta terakumulasi secara perlahan di dalam tanah [164]. Sementara itu selalu mengandalkan pada penggunaan urea, herbisida, dan pestisida dalam budidaya tanaman ternyata membahayakan kapasitas tanah dalam memanfaatkan pupuk dan membahayakan kesehatan tanah [165]. Dalam hal ini pada konsentrasi tertentu, urea, herbisida, dan pestisida akan berperilaku serupa dengan polutan beracun dan menjadi berbahaya bagi lingkungan dan manusia. Penambahan nanopartikel karbon (hingga 200 mg kg⁻¹) ke dalam tanah yang sudah terjenuhi oleh pemberian urea, herbisida, dan pestisida, akan meningkatkan aktivitas enzim urease, dehidrogenase, dan fosfatase sekaligus meningkatkan kemampuan tanah untuk menyimpan nutrisi seperti amonium N, nitrat N, dan P tersedia [166-167].

Nanofertilizer telah dikategorikan sebagai nanofertilizer makronutrien dan mikronutrien berdasarkan kandungan nutrisinya. Selain itu, nanobiofertilizer (nanomaterial yang dikombinasikan dengan mikroorganisme) muncul sebagai pendekatan alternatif [168].

BAB 7

PENUTUP

Produksi tanaman hortikultur khususnya yang bernilai strategis memiliki potensi ancaman yang serius dan dapat berdampak bagi stabilitas sosial-politik. Upaya penyediaan komoditas hortikultur sebagai salah satu penyokong ketahanan pangan nasional selalu mendapat tantangan baik berupa hambatan biotik khususnya gangguan hama dan penyakit maupun hambatan abiotik berupa curah hujan tinggi atau banjir, kekeringan, lutas gunung berapi, polutan, serta reaksi tanah dan penurunan kesuburan lahan. Mengatasi seluruh hambatan seraya menekan penggunaan bahan tidak ramah lingkungan namun efektif dan efisien merupakan tindakan yang menjadi prioritas dalam pembangunan pertanian khususnya pada system budidaya tanaman hortikultu sebagai pengahara pengadaan bahan pangan Nasional.

Aplikasi pestisida baik kimia sintetis maupn biopestisida merupakan suatu keniscayaan yang harus selalu ada dalam tiap tindakan budidaya. Meski fakta menunjukkan keberhasilan, namun fakta menunjukkan sebagain tindakan pengendalian yang mengandalkaa pestisida sebabagi bagian dari mitigasi gangguan hama-penyakit dan penurunan daya dukung media tumbuh dan lahan kurang efektif dan cenderung kurang efisien; Salah satu penyebab utamanya adalah ketidakmampuan bahan aktif pestisida secara efektif mendisposisi dan mempengaruhi target akibat besarnya ukuran droplet dan partikel yang diaplikasikan baik ke dalamtanah maupun ke permukaan tajuk tanaman.

Dimensi berukuran sangat kecil pada partikel bahan aktif akan menghasilkan mekanisme disposisi dan penetrasi yang mampu mengatasi kendala fisik baik di dalam agregat tanah maupun permukaan daun. Penciptaan biopesisida dengan bahan pembawa, bahan pengisi dan sekaligus mengandung bahan aktif dari ekstrak tanaman dan bahan lain baik organik dan anorganik dengan ukuran di bawah 100 nanometer akan memberi peluang peningkatan efektivitas dan efisiensi dalam aplikasinya. Formulasi bioagent dalam biopestisida nano akan menghasilkan manfaat

ganda yang dapat menjadikannya sebagai pestisida sekaligus fertilizer.

Aplikasi biopestisida nanopartikel baik dengan bahan aktif bagian dari ekstrak tumbuhan atau yang dikombinasikan dengan bioagent fungi efektif akan memberikan perlindungan kesehatan tanaman serta kesuburan tanah dan lahan. Kombinasi dua bahan aktif yang berbeda secara fisik ini memerlukan pengujian mulai di bagian hulu hingga hilir. Di fase hulu, pengujian formulasi harus dilakukan untuk memastikan tidak adanya perubahan orientasi molekul dan dimensi partikel menjadi lebih besar sehingga tidak lagi berstatus sebagai nanopartikel. Pengujian di tingkat hilir adalah menentukan efektivitasnya ketika diaplikasikan di lapang pada tanaman. Hasil pengujian yang ideal adalah efektifnya bahan aktif yang berasal dari ekstrak tumbuhan dan bahan aktif yang berupa bioagent. Hasil yang terbaik juga memunculkan efek sinergi dari kombinasi kedua macam bahan akti tersebut dalam membri perlindungan tanaman.

Strategi pemanfaatan biopestisida nanopartikel adalah: monitoring status kesehatan dan gangguan pada kehidupan pertanaman sejak pra tanam hingga menjelang panen sebagai dasar penentuan tindakan pengendalian, memprioritaskan aplikasi biopestisida nanopartikel baik yang bersifat memberikan perlindungan sebelum kemunculan gangguan maupun ketika gangguan sudah muncul, selalu menekan semaksimal mungkin factor-faktor yang dapat menghambat kinerja dan menggagalkan efektivitas bahan aktif biopestisida nano, serta selalu melakukan evaluasi atas kegiatan pemanfaatan biopestisida nano.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L., & Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7), 494-501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>
- [2] Pusat Data dan Informasi Pertanian. 2024. Statistik Konsumsi Pangan Tahun 2023. Sekretaris Jenderal Kementerian Pertanian. Jakarta.
- [3] Moulick, R.G.; Das, S.; Debnath, N.; Bandyopadhyay, K. Potential use of nanotechnology in sustainable and ‘smart’ agriculture: Advancements made in the last decade. *Plant Biotechnol. Rep.* **2020**, 14, 505–513.]
- [4] Chhipa, H. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environ. Chem. Lett.* **2017**, 15, 15–22.
- [5] Chi-Wei Huang, Chitsan Lin, Minh Ky Nguyen, Adnan Hussain, Xuan-Thanh Bui, Huu Hao Ngo. A review of biosensor for environmental monitoring: principle, application, and corresponding achievement of sustainable development goals *Bioengineered*. 2023 Dec;14(1):58-80. doi: 10.1080/21655979.2022.2095089.
- [6] Bhardwaj, A.K.; Arya, G.; Kumar, R.; Hamed, L.; Pirasteh-Anosheh, H.; Jasrotia, P.; Kashyap, P.L.; Singh, G.P. Switching to nanonutrients for sustaining agroecosystems and environment: The challenges and benefits in moving up from ionic to particle feeding. *J. Nanobiotechnol.* 2022, 20, 19.
- [7] An, C.; Sun, C.; Li, N.; Huang, B.; Jiang, J.; Shen, Y.; Wang, C.; Zhao, X.; Cui, B.; Wang, C.; et al. Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: Strategies towards sustainable agriculture. *J. Nanobiotechnol.* 2022, 20, 11.
- [8] Barkha Devi, Ranjita Devi, Shrijana Pradhan, Nazung Lepcha. 2022. Theory at a glance: Health belief models in predicting health behaviors. *J.Bio.Innov11(2)*, pp: 410-421, 2022. <https://doi.org/10.46344/JBINO.2022.v11i02.13>
- [9] Rajput, V.D.; Singh, A.; Minkina, T.; Rawat, S.; Mandzhieva, S.; Sushkova, S.; Shuvaeva, V.; Nazarenko, O.; Rajput, P.; Komariah; et al. Nano-enabled products: Challenges and opportunities for sustainable agriculture. *Plants* **2021**, 10, 2727.
- [10] Khan, S.T.; Adil, S.F.; Shaik, M.R.; Alkathlan, H.Z.; Khan, M.; Khan, M. Engineered nanomaterials in soil: Their impact on soil microbiome and plant health. *Plants* **2022**, 11, 109.
- [11] Itelima, J.U., W. J. Bang, M. D. Sila, I. A. Onyimba & O. J. Egbere. 2018. A Review: Biofertilizer; A Key Player in Enhancing Soil Fertility and Crop Productivity. *J Microbiol.* 2 (1): 74–83.
- [12] Van Bruggen A.H.C., He M.M., Shin K., Mai V., Jeong

- K.C., Finckh M.R., Morris J.G., Jr. Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Sci. Total Environ.* 2018;616:255–268. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.309.
- [13] Chechi, A., Stahlecker, J., Dowling, M. E., & Schnabel, G., 2019. Diversity in species composition and fungicide resistance profiles in *Colletotrichum* isolates from apples. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.04.002>.
- [14] Jallow MFA., Awadh, DG., Albaho, MS., Devi, VY. & Thomas, BM., 2017. Pesticide knowledge and safety practices among farm workers in Kuwait: results of a survey. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 14 (4): 340.
- [15] Arora S, Murmu G, Mukherjee K, Saha S, and Maity D. A comprehensive overview of nanotechnology in sustainable agriculture. *Journal of Biotechnology*. 2022; vol. 355, pp. 21–41.
- [16] An C, Sun C, Li N et al. Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022; vol. 20, no. 1, p. 11.
- [17] Kaur R, Bhardwaj G, Saini S, Kaur N, and Singh N. A high-performance Calix@ZnO based bifunctional nanomaterial for selective detection and degradation of toxic azinphos methyl in environmental samples. 2023; *Chemosphere*, vol. 316, article 137693.
- [18] Pavlicevic M, Abdelraheem W, Zuverza-Mena N et al. Engineered nanoparticles, natural nanoclay and biochar, as carriers of plant-growth promoting bacteria. *Nanomaterials*. 2022; vol. 12, no. 24, p. 4474.
- [19] Zand AD, Tabrizi AM, and Vaezi Heir AJB. Application of titanium dioxide nanoparticles to promote phytoremediation of Cd-polluted soil: contribution of PGPR inoculation. *Bioremediation Journal*. 2020; vol. 24, no. 2-3, pp. 171-189.
- [20] Tao C, Wang Z, Liu S, Lu N, Deng X, Xiong W, Shen Z, Zhang N, Geisen S, Li R, Shen Q, & Kowalchuk GA. Additive fungal interactions drive biocontrol of *Fusarium* wilt disease. *New Phytol.* 2023; doi: 10.1111/nph.18793.
- [21] López AC, Giorgio EM, Vereschuk ML, Zapata PD, Luna MF, & Alvarenga. *Ilex paraguariensis* hosts root-Trichoderma spp. with plant-growth-promoting traits: Characterization as biological control agents and biofertilizers. *Curr Microbiol.* 2023; 80(4):120. doi: 10.1007/s00284-023-03231-1.
- [22] Vinzant K, Rashid M, and Khodakovskaya MV. Advanced applications of sustainable and biological nano-polymers in agricultural production. *Frontiers in Plant Science*. 2023; vol. 13, article 1081165.
- [23] Ansari M, Ahmed S, Abbasi A, Hamad NA, Ali HM, Khan MT, Haq IU, Zaman QU

- (2023) Green synthesized silver nanoparticles: a novel approach for the enhanced growth and yield of tomato against early blight disease. *Microorganisms* 11(4):886. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040886>
- [24] Kumar, A., Verma, L. M., Sharma, S., and Singh, N. (2022). *Overview on Agricultural Potentials of Biogas Slurry (BGS): Applications, Challenges, and Solutions*. Springer Berlin, Heidelberg 1–41.
- [25] Gulzar ABM and Mazumder PB. Helping plants to deal with heavy metal stress: the role of nanotechnology and plant growth promoting rhizobacteria in the process of phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2022; vol. 29, no. 27, pp. 40319–40341.
- [26] Pallavi MCM, Srivastava R, Arora S, and Sharma AK. Impact assessment of silver nanoparticles on plant growth and soil bacterial diversity. *3 Biotech*, vol. 6, pp. 1– 10, 2016.
- [27] Ferrusquía-Jiménez NI, González-Arias B, Rosales A et al. Elicitation of *Bacillus cereus*-Amazcala (B.c-A) with SiO₂ nanoparticles improves its role as a plant growth-promoting bacteria (PGPB) in chili pepper plants. *Plants*. 2022; vol. 11, no. 24, p. 3445.
- [28] de Moraes ACP, Ribeiro LDS, de Camargo ER, and Lacava PT. The potential of nanomaterials associated with plant growth-promoting bacteria in agriculture. *3 Biotech*. 2021; vol. 11, no. 7, p. 318, 2021.
- [29] Das PP, Singh KR, Nagpure G et al. Plant-soil-microbes: a tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*. 2022; vol. 214, Part 1, p. 113821.
- [30] Qiu Z, Paungfoo-Lonhienne C, Ye J et al. Biofertilizers can enhance nitrogen use efficiency of sugarcane. *Environmental Microbiology*. 2022; vol. 24, no. 8, pp. 3655-3671.
- [31] Foumani FAS, Soltani MS, Zomorodi S, Jafarian S, and Khosrowshahi AA. Effect of chia seed mucilage coating containing zinc oxide nanoparticles on shelf life of chicken fillet. *Veterinary Research Forum*. 2022; vol. 13, no. 4, pp. 577-585.
- [32] Avram A, Rapuntean S, Gorea M et al. In vitro antibacterial effect of forsterite nanopowder: synthesis and characterization. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2022; vol. 29, no. 51, pp. 77097-77112.
- [33] Prasad R, Bhattacharyya A, and Nguyen QD Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in Microbiology*. 2017; vol. 8, p. 1014.
- [34] Haris M, Hussain T, Mohamed HI et al. Nanotechnology - a new frontier of nano-farming in agricultural and food production and its development. *Science of the Total Environment*. 2023; vol. 857, Part 3, article 159639, 2023.

- [35] Khan IM, Niazi S, Pasha I et al. Novel metal enhanced dual-mode fluorometric and SERS aptasensor incorporating a heterostructure nanoassembly for ultrasensitive T-2 toxin detection. *Journal of Materials Chemistry*. 2023; vol. 11, no. 2, pp. 441– 451.
- [36] Karnwal A, Kumar G, Pant G, Hossain K, Ahmad A, and Alshammari MB. Perspectives on usage of functional nanomaterials in antimicrobial therapy for antibiotic-resistant bacterial infections. *ACS Omega*. 2023; vol. 8, no. 15, pp. 13492–13508.
- [37] Akhtar N, Ilyas N, Meraj TA et al. Improvement of plant responses by nanobiofertilizer: a step towards sustainable agriculture. *Nanomaterials*. 2022; vol. 12, no. 6, p. 965.
- [38] Pereira AES, Oliveira HC, Fraceto LF, and Santaella C. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 2021; vol. 11, no. 2, p. 267.
- [39] Hao D, Lang B, Wang Y, Wang X, Liu T, & Chen J. Designing synthetic consortia of *Trichoderma* strains that improve antagonistic activities against pathogens and cucumber seedling growth. *Microb Cell Fact*. 2022; 21(1):234. doi: 10.1186/s12934-022-01959-2.
- [40] Iavicoli I, Leso V, Beezhold DH, and Shvedova AA. Nanotechnology in agriculture: opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2017; vol. 329, pp. 96-111.
- [41] Woo SL, Hermosa R, Lorito M, & Monte E. *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nat Rev Microbiol*. (2022). doi: 10.1038/s41579-022-00819-5.
- [42] Sutarman, Tjahjanti PH, Prihatiningrum AE and Miftahurrohmat A. Effect of *Trichoderma* formulated with cultivated oyster mushroom waste toward the growth and yield of shallot (*Allium ascalonicum* L.). *Afr. J. Food Agric. Nutr. Dev*. 2022; 22(10): 21743-21760. <https://doi.org/10.18697/ajfand.115.19965>.
- [43] Kabir Md.G, Wang Y, Abuhena Md., Azim F, Al-Rashid J, Rasul NM, Mandal D, & Maitra P. A bio-sustainable approach for reducing *Eucalyptus* tree-caused agricultural ecosystem hazards employing *Trichoderma* bio-sustained spores and mycorrhizal networks. *Front Microbiol*. 2023; 13:1071392. doi: 10.3389/fmicb.2022.1071392. eCollection 2022.
- [44] Sutarman, A. Miftahurrohmat, AE. Prihatiningrum and S. Arifin. Biomass Extract of *Ipomea carnea* and Its Inhibition against *Trichoderma asperellum*, E3S Web of Conferences 316, 03011 (2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131603011>
- [45] Rautela, I.; Dheer, P.; Thapliyal, P.; Shah, D.; Joshi, M.; Upadhyay, S.; Gururani, P.; Sinha, V.B.; Gaurav, N.; Sharma, M.D. Current scenario and future perspectives of

- nanotechnology in sustainable agriculture and food production. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* **2021**, *22*, 99–121.
- [46] Khan, H.A.; Naqvi, S.R.; Mehran, M.T.; Khoja, A.H.; Khan Niazi, M.B.; Juchelková, D.; Atabani, A. A performance evaluation study of nano-biochar as a potential slow-release nano-fertilizer from wheat straw residue for sustainable agriculture. *Chemosphere* **2021**, *285*, 131382.
- [47] Tariq, M.; Mohammad, K.N.; Ahmed, B.; Siddiqui, M.A.; Lee, J. Biological Synthesis of Silver Nanoparticles and Prospects in Plant Disease Management. *Molecules* **2022**, *27*, 4754. <https://doi.org/10.3390/molecules27154754>
- [48] Wang, Y.; Wang, S.; Sun, J.; Dai, H.; Zhang, B.; Xiang, W.; Hu, Z.; Li, P.; Yang, J.; Zhang, W. Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production. *Sci. Total Environ.* **2021**, *800*, 149627.
- [49] Tyagi, J.; Ahmad, S.; Malik, M. Nitrogenous fertilizers: Impact on environment sustainability, mitigation strategies, and challenges. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2022**.
- [50] Singh, H.; Sharma, A.; Bhardwaj, S.K.; Arya, S.K.; Bhardwaj, N.; Khatri, M. Recent advances in the applications of nano- agrochemicals for sustainable agricultural development. *Environ. Sci. Process. Impacts* **2021**, *23*, 213–239.
- [51] Badgar, K.; Abdalla, N.; El-Ramady, H.; Prokisch, J. Sustainable Applications of Nanofibers in Agriculture and Water Treatment: A Review. *Sustainability* **2022**, *14*, 464.
- [52] Elnahal, A.S.M.; El-Saadony, M.T.; Saad, A.M.; Desoky, E.S.M.; El-Tahan, A.M.; Rady, M.M.; AbuQamar, S.F.; El-Tarabily, K.A. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review. *Eur. J. Plant Pathol.* **2022**, *162*, 759–792.
- [53] Faridvand, S.; Amirnia, R.; Tajbakhsh, M.; El Enshasy, H.A.; Sayyed, R.Z. The effect of foliar application of magnetic water and nano-fertilizers on phytochemical and yield characteristics of fennel. *Horticulturae* **2021**, *7*, 475.
- [54] Pereira, A.D.E.S.; Oliveira, H.C.; Fraceto, L.F.; Santaella, C. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials* **2021**, *11*, 267.
- [55] Ahmed, D.F.; Isawi, H.; Badway, N.A.; Elbayaa, A.A.; Shawky, H. Graphene oxide incorporated cellulose triacetate/cellulose acetate nanocomposite membranes for forward osmosis desalination. *Arab. J. Chem.* **2021**, *14*, 102995.
- [56] Al-Juthery, H.W.A.; Lahmod, N.R.; Al-Taei, R.A.H.G. Intelligent, Nano-fertilizers: A New Technology for Improvement Nutrient Use Efficiency (Article Review). *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2021**, *735*, 012086.

- [57] Hashem, A.H.; Saied, E.; Amin, B.H.; Alotibi, F.O.; Al-Askar, A.A.; Arishi, A.A.; Elkady, F.M.; Elbahnasawy, M.A. Antifungal Activity of Biosynthesized Silver Nanoparticles (AgNPs) against Aspergilli Causing Aspergillosis: Ultrastructure Study. *J. Funct Biomater.* **2022**, *13*, 242.
- [58] Mukherjee, S.; Verma, A.; Kong, L.; Rengan, A.K.; Cahill, D.M. Advancements in Green Nanoparticle Technology: Focusing on the Treatment of Clinical Phytopathogens. *Biomolecules* **2024**, *14*, 1082. <https://doi.org/10.3390/biom14091082>
- [59] Ramkumar, V.S.; Pugazhendhi, A.; Prakash, S.; Ahila, N.K.; Vinoj, G.; Selvam, S.; Kumar, G.; Kannapiran, E.; Rajendran, R.B. Synthesis of platinum nanoparticles using seaweed *Padina gymnospora* and their catalytic activity as PVP/PtNPs nanocomposite towards biological applications. *Biomed. Pharmacother.* **2017**, *92*, 479–490.
- [60] Zhu, Y.; Mustafi, M.; Weisshaar, J.C. Biophysical Properties of *Escherichia coli* Cytoplasm in Stationary Phase by Superresolution Fluorescence Microscopy. *mBio* **2020**, *11*, e00143-20.
- [61] He, B.; Hu, Z.; Ma, L.; Li, H.; Ai, M.; Han, J.; Zeng, B. Transcriptome analysis of different growth stages of *Aspergillus oryzae* reveals dynamic changes of distinct classes of genes during growth. *BMC Microbiol.* **2018**, *18*, 12.
- [62] Abu Bakar, N.; Karsani, S.A.; Alias, S.A. Fungal survival under temperature stress: A proteomic perspective. *PeerJ* **2020**, *8*, e10423.
- [63] Perumal, K.; Ahmad, S.; Mohd-Zahid, M.H.; Wan Hanaffi, W.N.; ZA, I.; Six, J.-L.; Ferji, K.; Jaafar, J.; Boer, J.C.; Plebanski, M.; et al. Nanoparticles and Gut Microbiota in Colorectal Cancer. *Front. Nanotechnol.* **2021**, *3*, 681760.
- [64] Ghasempour, A.; Dehghan, H.; Ataee, M.; Chen, B.; Zhao, Z.; Sedighi, M.; Guo, X.; Shahbazi, M.-A. Cadmium Sulfide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Biomedical Applications. *Molecules* **2023**, *28*, 3857.
- [65] Hassanisaadi M, et al. Eco-friendly biosynthesis of silver nanoparticles using *Aloysia citrodora* leaf extract and evaluations of their bioactivities. *Mater Today Commun.* **2022**;33:104183.
- [66] Singh P, Mijakovic I. Strong antimicrobial activity of silver nanoparticles obtained by the green synthesis in *Viridibacillus* sp. extracts. *Front Microbiol.* **2022**. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.820048>.
- [67] Kapoor RT, et al. Exploration of microbial factories for synthesis of nanoparticles—a sustainable approach for bioremediation of environmental contaminants. *Front Microbiol.* **2021**;12:658294.
- [68] Singh P, et al. Biogenic silver and gold nanoparticles synthesized using red ginseng root extract, and their applications. *Artif Cells Nanomed Biotechnol.*

2016;44(3):811–6.

- [69] Singh P, et al. Green synthesis of gold and silver nanoparticles from *Cannabis sativa* (industrial hemp) and their capacity for biofilm inhibition. *Int J Nanomed*. 2018;13:3571–91.
- [70] Singh P, et al. Anti-biofilm effects of gold and silver nanoparticles synthesized by the *Rhodiola rosea* rhizome extracts. *Artif Cells Nanomed Biotechnol*. 2018;46(sup3):S886–99.
- [71] Abbai R, et al. Green synthesis of multifunctional silver and gold nanoparticles from the oriental herbal adaptogen: siberian ginseng. *Int J Nanomed*. 2016;11:3131.
- [72] Singh P, Mijakovic I. Rowan berries: a potential source for green synthesis of extremely monodisperse gold and silver nanoparticles and their antimicrobial property. *Pharmaceutics*. 2022;14(1):82.
- [73] Singh P, Kim Y-J, Zhang D, Yang D-C. Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms. *Trends Biotechnol*. 2016;34(7):588–99.
- [74] Sri Renukadevi Balusamy, Abhayraj S. Joshi, Haribalan Perumalsamy, Ivan Mijakovic and Priyanka Singh. Advancing sustainable agriculture: a critical review of smart and eco-friendly nanomaterial applications. *Journal of Nanobiotechnology (2023)* 21:372. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-02135-3>
- [75] Younis ME, Abdel-Aziz HMM, Heikal YM. Nanopriming technology enhances vigor and mitotic index of aged *Vicia faba* seeds using chemically synthesized silver nanoparticles. *S Afr J Bot*. 2019;125:393–401.
- [76] Sutarman, Prihatiningrum, A. E., & Miftahurrohmat, A. Application of trichoderma and aspergillus as biofertilizers in eco-friendly ratoon rice cultivation. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*. 2023; 13(4), 277– 287. 10.55493/5005.v13i4.4934.
- [77] Sutarman. 2017. Potensi *Trichoderma Harzianum* Sebagai Pengendali *Fusarium oxysporum* Penyebab Busuk Pangkal Batang Tanaman Cabai Merah (*Capsicum annum L.*). *Agritech*. 19(2):144–155.
- [78] Sutarman, Setiorini T, Li'aini AS, Purnomo and Rahmat A. Evaluation of *Trichoderma asperillum* effect toward anthracnose pathogen activity on red chili (*Capsicum annum L.*) as ecofriendly pesticide. *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 13, No. 4, 131-137, August 2022. DOI: <https://doi: 10.18178/ijesd.2022.13.4.1383>
- [79] Hsieh, S., Kurzai, O., and Brock, M. (2017). Persistence within dendritic cells marks an antifungal evasion and dissemination strategy of *Aspergillus terreus*. *Sci. Rep.* 7, 10590. doi: 10.1038/s41598-017-10914-w
- [80] Lopes LG, Csonka LA, Castellane JAS, Oliveira AW, Almeida-Júnior S, Furtado

- RA, Tararam C, Levy LO, Crivellenti LZ, Moretti ML, Giannini MJSM and Pires RH. (2021). Disinfectants in a hemodialysis setting: antifungal activity against *Aspergillus* and *Fusarium* planktonic and biofilm cells and the effect of commercial peracetic acid residual in mice. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 11:663741. doi: 10.3389/fcimb.2021.663741
- [81] Klaic R, Giroto AS, Guimarães GGF, Plotegher F, Ribeiro C, Zangirolami TC et al (2018) Nanocomposite of starch-phosphate rock bioactivated for environmentally- friendly fertilization. *Miner Eng* 128:230–237. <https://doi.org/10.1016/j.minereng.2018.09.002>
- [82] Klaic R, Plotegher F, Ribeiro C, Zangirolami TC, Farinas CS (2017) A novel combined mechanical-biological approach to improve rock phosphate solubilization. *Int J Miner Process* 161:50–58. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.02.009>
- [83] Majaron VF, da Silva MG, Bortoletto-Santos R, Klaic R, Giroto A, Guimaraes GGF et al (2020) Synergy between castor oil polyurethane/starch polymer coating and local acidification by *A. niger* for increasing the efficiency of nitrogen fertilization using urea granules. *Ind Crops Prod* 154:8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112717>
- [84] Cai, N., Liu, R., Yan, D., Zhang, N., Zhu, K., Zhang, D., Nong, X., Tu, X., Zhang, Z., & Wang, G.J. (2022). Bioinformatics analysis and functional characterization of the CFEM proteins of *Metarhizium anisopliae*. *Fungi (Basel)*. 8(7):661. doi: 10.3390/jof8070661
- [85] Cai, N., Nong X., Liu, R., McNeill, M.R., Wang, G., Zhang, Z., & Tu, X. (2023). The Conserved cysteine-rich secretory protein MaCFEM85 interacts with MsWAK16 to activate plant defenses. *Int J Mol Sci.* 24(4):4037. doi: 10.3390/ijms24044037
- [86] Sutarman. 2023. Eksplorasi dan Uji Potensi Penghambatan antara *Metharizium anisopliae* dan *Trichoderma* dari Lahan Hortikultura. *Agritech* 24 (2): 173-179 DOI: <http://dx.doi.org/10.30595/agritech.v25i2.17391>.
- [87] Sutarman, 2023. Pemanfaatan Fungi Agen Hayati Sebagai Mitigasi Cekaman Lingkungan dalam Budidaya Padi dan Kedele. Umsida Press. Sidoarjo
- [88] [NCBI] National Center for Biotechnology Information. (2023). *Basic Logical Alignment Search Tool*. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST>
- [89] Kumar S, Stecher G, Li M, Knyaz C, & Tamura K. (2018). MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. *Mol. Biol. Evol.* 35:1547-1549.
- [90] Sutarman, S.; Jalaluddin, A. K.; Li'aini, A. S.; Prihatiningrum, A. E. Characterizations of *trichoderma* sp. and its effect on *Ralstonia solanacearum* OF tobacco seedlings. *J Trop Plant Pests Dis* 2020, 21, 8-19. DOI: <https://doi.org/10.23960/jhptt.1218-19>
- [91] Hu X, Roberts DP, Xie L, Yu C, Li Y, Qin L, Hu L, Zhang Y & Liao X. 2016. Use of

- formulated *Trichoderma* sp. Tri-1 in combination with reduced rates of chemical pesticide for control of *Sclerotinia sclerotiorum* on oilseed rape. *Crop Protection* 79, 124-127.
- [92] Youssef, F.S.; Alshammari, E.; Ashour, M.L. (2021). Bioactive alkaloids from genus *Aspergillus*: Mechanistic interpretation of their antimicrobial and potential SARS-CoV-2 inhibitory activity using molecular modelling. *Int. J. Mol. Sci.* 2, 1866. <https://doi.org/10.3390/ijms22041866>
- [93] Shang, J., Liu, B., & Xu, Z. (2020). Efficacy of *Trichoderma asperellum* TC01 against anthracnose and growth promotion of *Camellia sinensis* seedlings. *Biol. Control*. pp. 143, 104205. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1049964419307066>
- [94] Yuan Xianfu, Shan Hong, Wu Xiong, Waseem Raza, Zongzhuan Shen, Beibei Wang, Rong Li, Yunze Ruan, Qirong Shen, and Francisco Dini-Andreote. 2021. Development of fungal-mediated soil suppressiveness against *Fusarium* wilt disease via plant residue manipulation. *Microbiome*. 9: 200. doi: [10.1186/s40168-021-01133-7](https://doi.org/10.1186/s40168-021-01133-7)
- [95] Chongyuan Zhang, Weiwei Wang, Ming Xue, Zhen Liu, Qinman Zhang, Jumei Hou, Mengyu Xing, Rui Wang, and Tong Liu. 2021. The Combination of a Biocontrol agent *Trichoderma asperellum* SC012 and Hymexazol Reduces the Effective Fungicide Dose to Control *Fusarium* Wilt in Cowpea. *J Fungi (Basel)*. 2021 Sep; 7(9): 685. doi: [10.3390/jof7090685](https://doi.org/10.3390/jof7090685)
- [96] Sutarman, Miftahurrohmat, A., Nurmalasari, I.R., & Prihatinnigrum, A.E. (2021). In vitro evaluation of the inhibitory power of *Trichoderma harzianum* against pathogens that cause anthracnose in Chili. *Journal of Physics: Conference Series* 1764(2021)012026. doi: [10.1088/1742-6596/1764/1/012026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1764/1/012026)
- [97] Li M., Ma G., Lian H, Su X, Tian Y, Huang, W, Mei J, Jiang, X. (2019). The effects of *Trichoderma* on preventing cucumber *Fusarium* wilt and regulating cucumber physiology. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 607–617. doi: [10.1016/s2095-3119\(18\)62057-x](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62057-x)
- [98] He A, Liu J, Wang X, Zhang Q, Song W, & Che J. 2019. Soil application of *Trichoderma asperellum* GDFS1009 granules promotes growth and resistance to *Fusarium graminearum* in maize. *J. Integr. Agric.* 18 (3): 599–606.
- [99] Navale, V., Vamkudoth, K. R., Ajmera, S., & Dhuri, V. (2021). *Aspergillus* derived mycotoxins in food and the environment: Prevalence, detection, and toxicity. *Toxicology Reports*, 8, 1008–1030. doi: [10.1016/j.toxrep.2021.04.013](https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.04.013)
- [100] Monclaro, Antonielle V.; Petrović, Dejan M.; Alves, Gabriel S. C.; Costa, Marcos M. C.; Midorikawa, Glaucia E. O.; Miller, Robert N. G.; Filho, Edivaldo X. F.; Eijsink, Vincent G. H.; Várnai, Anikó; Berrin, Jean-Guy (2020). Characterization of two family AA9 LPMOs from *Aspergillus tamarii* with distinct

activities on xyloglucan reveals structural differences linked to cleavage specificity. *PLOS ONE*, 15(7), e0235642–.doi:10.1371/journal.pone.0235642

- [101] Wang, S., Mo, H., Xu, D., Hu, H., Hu, L., Shuai, L., & Li, H. (2021). Determination of volatile organic compounds by HS-GC-IMS to detect different stages of *Aspergillus flavus* infection in Xiang Ling walnut. *Food Science & Nutrition*, 9(5), 2703–2712.doi:10.1002/fsn3.2229
- [102] Aynalem, B., Muleta, D. Venegas, J. & Assefa, F., 2021. Molecular phylogeny and pathogenicity of indigenous *Beauveria bassiana* against the tomato leafminer, *Tuta absoluta* Meyrick 1917 (Lepidoptera: Gelechiidae), in Ethiopia. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology* 19:127. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00227-x>
- [103] Gebremariam, A., Chekol, Y. & Assefa F., 2021. Phenotypic, molecular, and virulence characterization of entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana* (Balsam) Vuillemin, and *Metarhizium anisopliae* (Metschn.) Sorokin from soil samples of Ethiopia for the development of mycoinsecticide. *Heliyon* 7 e07091. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07091>
- [104] Alali, S., Mereghetti, V., Faoro, F., Bocchi, S., Al Azmeh, F. & Montagna, M., 2019. Thermotolerant isolates of *Beauveria bassiana* as potential control agent of insect pest in subtropical climates. *PLoS ONE* 14(2): e0211457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211457>
- [105] Esparza, MA., Conteyro, CAM., Fraga, ME., 2017. Classification and infection mechanism of entomopathogenic fungi. *Arq Inst Biol* 84:1–10.
- [106] Sánchez-Rodríguez, AR., Raya-Díaz, S., Zamarreño, ÁM., García-Mina, JM., del Campillo, MC. & Quesada-Moraga, E., 2018. An endophytic *Beauveria bassiana* strain increases spike production in bread and durum wheat plants and effectively controls cotton leafworm (*Spodoptera littoralis*) larvae. *Biol. Control* 116, 90– 102.
- [107] Zhang, J., Fu, B., Lin, Q., Riley, IT., Ding, S., Chen, L., Jiangkuan, C., Lirong, Y. & Li, H., 2020. Colonization of *Beauveria bassiana* 08F04 in root-zone soil and its biocontrol of cereal cyst nematode (*Heterodera filipjevi*). *PLoS ONE* 15(5): e0232770. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232770>
- [108] Moloinyane, S. & Nchu, F., 2019. The Effects of endophytic *Beauveria bassiana* inoculation on infestation level of *Planococcus ficus*, growth and volatile constituents of potted greenhouse grapevine (*Vitis vinifera* L.) . *Toxins* 11, 72; doi:10.3390/toxins1102007
- [109] Sutarman, Andriani EkoPrihatiningrum, and AgusMiftahuurohmat.2022. Fungistatic Effect of *Ipomea Carnea* Extract and *Trichoderma Esperellum* Against Various Fungal Biological Agents *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1012 012046. doi:10.1088/1755-1315/1012/1/012046

- [110] Lana M, Simón O, Velasco P, Rodríguez VM, Caballero P, Poveda J. (2023). First study on the root endophytic fungus *Trichoderma hamatum* as an entomopathogen: Development of a fungal bioinsecticide against cotton leafworm (*Spodoptera littoralis*). *Microbiological Research* 270,127334. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127334>
- [111] Sinno, M.; Ranesi, M.; Di Lelio, I.; Iacomino, G.; Becchimanzi, A.; Barra, E.; Molisso, D.; Pennacchio, F.; Digilio, M.C.; Vitale, S. Turrà, D., Harizanova, V., Lorito, M. & Woo, S.L. (2021). Selection of endophytic *Beauveria bassiana* as a dual biocontrol agent of tomato pathogens and pests. *Pathogens* 2021,10, 1242. <https://doi.org/10.3390/pathogens10101242>
- [112] Gupta, R.; Keppanan, R.; Leibman-Markus, M.; Rav-David, D.; Elad, Y.; Ment, D.; Bar, M. The entomopathogenic fungi *Metarhizium brunneum* and *Beauveria bassiana* promote systemic immunity and confer resistance to a broad range of pests and pathogens in tomato. *Phytopathology* 2022, 112, 784–793. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-21-0343-R>
- [113] Mantzoukas, S., Daskalaki, E., Kitsiou, F., Papantzikos, V., Servis, D., Bitivanos, S., Patakioutas, G., and Eliopoulos, P.A. (2022). Dual Action of *Beauveria bassiana* (Hypocreales; Cordycipitaceae) Endophytic Stains as Biocontrol Agents against Sucking Pests and Plant Growth Biostimulants on Melon and Strawberry field Plants. *Microorganisms* 10(11), 2306; <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112306>
- [114] Canassa, F., Tall, S., Moral, R.A., de Lara, I.A., Delalibera Jr., I. & Meyling, N.V., 2019. Effects of bean seed treatment by the entomopathogenic fungi *Metarhizium robertsii* and *Beauveria bassiana* on plant growth, spider mite populations and behavior of predatory mites. *Biol. Contr.* 132, 199-208.
- [115] Litwin, A., Nowak, M. & Rozalska, S., 2020. Entomopathogenic fungi: unconventional applications. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 19, 23e42.
- [116] Erawati, D. N., Wardati, I., Suharto, S., Aji, J. M. M., Ida, N. C., & Suprapti, Y. (2021). Infection Pathways *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* For Bio-Control of Coleoptera: *Oryctes rhinoceros* L. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 21(3), 220- 226. <https://doi.org/10.25181/jppt.v21i3.2139>
- [117] Quesada, ME., 2020. Entomopathogenic fungi as endophytes: their broader contribution to IPM and crop production. *Biocontrol Sci. Technol.* 30, 864-877.
- [118] Nishi, O., Sushida, H., Higashi, Y. & Iida, Y., 2020. Epiphytic and endophytic colonisation of tomato plants by the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* strainGHA. *Mycology* 1-9.
- [119] Kumari, R.; Singh, D.P. Nano-biofertilizer: An Emerging Eco-friendly Approach for Sustainable Agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. B Biol. Sci.* 2020, 90, 733–741.

- [120] Simarmata, T.; Hersanti; Turmuktini, T.; Fitriatin, B.N.; Setiawati, M.R. Purwanto Application of Bioameliorant and Biofertilizers to Increase the Soil Health and Rice Productivity. *HAYATI J. Biosci.* **2016**, *23*, 181–184.
- [121] Nongbet, A.; Mishra, A.K.; Mohanta, Y.K.; Mahanta, S.; Ray, M.K.; Khan, M.; Baek, K.-H.; Chakrabartty, I. Nanofertilizers: A Smart and Sustainable Attribute to Modern Agriculture. *Plants* **2022**, *11*, 2587. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
- [122] Marchiol, L.; Filippi, A.; Adamiano, A.; Esposti, L.D.; Iafisco, M.; Mattiello, A.; Petrusa, E.; Braidot, E. Influence of hydroxyapatite nanoparticles on germination and plant metabolism of tomato (*Solanum lycopersicum* L.): Preliminary evidence. *Agronomy* **2019**, *9*, 161.
- [123] Al-Juthery, H.W.; Al-Fadhly, J.T.; Ali, E.A.H.M.; Al-Tae, R.A.H.G. Role of some nanofertilizers and atonikin maximizing for production of hydroponically-grown barley fodder. *Int. J. Agric. Stat. Sci.* **2019**, *15*, 565–570.
- [124] Carmona, F.J.; Dal Sasso, G.; Ramírez-Rodríguez, G.B.; Pii, Y.; Delgado-López, J.M.; Guagliardi, A.; Masciocchi, N. Ureafunctionalized amorphous calcium phosphate nanofertilizers: Optimizing the synthetic strategy towards environmental sustainability and manufacturing costs. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 3419.
- [125] El-Shal, R.M.; El-Naggar, A.H.; El-Beshbeshy, T.R.; Mahmoud, E.K.; El-Kader, N.I.A.; Missau, A.M.; Du, D.; Ghoneim, A.M.; El-Sharkawy, M.S. Effect of nanofertilizers on alfalfa plants grown under different salt stresses in hydroponic system. *Agriculture* **2022**, *12*, 1113.
- [126] Usman, M.; Farooq, M.; Wakeel, A.; Nawaz, A.; Cheema, S.A.; Rehman, H.u.; Ashraf, I.; Sanaullah, M. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Sci. Total Environ.* **2020**, *721*, 137778.
- [127] Basavegowda, N.; Baek, K.H. Current and future perspectives on the use of nanofertilizers for sustainable agriculture: The case of phosphorus nanofertilizer. *3 Biotech* **2021**, *11*, 357.
- [128] Wachid, A., & Sutarman. (2019) Inhibitory power test of two *Trichoderma* isolates in in vitro way against *Fusarium oxysporum* the cause of red chili stem rot. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1232** 012020 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1232/1/012020>
- [129] Nisha Raj, S.; Anooj, E.S.; Rajendran, K.; Vallinayagam, S. A comprehensive review on regulatory invention of nano pesticides in Agricultural nano formulation and food system. *J. Mol. Struct.* **2021**, *1239*, 130517.
- [130] Carmona, F.J.; Dal Sasso, G.; Ramírez-Rodríguez, G.B.; Pii, Y.; Delgado-López, J.M.; Guagliardi, A.; Masciocchi, N. Ureafunctionalized amorphous calcium phosphate nanofertilizers: Optimizing the synthetic strategy towards environmental sustainability and manufacturing costs. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 3419.

- [131] Yu, Z.; Yang, Y.; Wang, C.; Shi, G.; Xie, J.; Gao, B.; Li, Y.C.; Wan, Y.; Cheng, D.; Shen, T.; et al. Nano-soy-protein microcapsule-enabled self-healing biopolyurethane-coated controlled-release fertilizer: Preparation, performance, and mechanism. *Mater. Today Chem.* **2021**, *20*, 100413.
- [132] Kolencík, M.; Ernst, D.; Komár, M.; Urík, M.; Šebesta, M.; D'urišová, L.; Bujdoš, M.; Černý, I.; Chlupík, J.; Juriga, M.; et al. Effects of Foliar Application of ZnO Nanoparticles on Lentil Production, Stress Level and Nutritional Seed Quality under Field Conditions. *Nanomaterials* **2022**, *12*, 310.
- [133] Ali, S.S.; Al-Tohamy, R.; Koutra, E.; Moawad, M.S.; Kornaros, M.; Mustafa, A.M.; Mahmoud, Y.A.G.; Badr, A.; Osman, M.E.H.; Elsamahy, T.; et al. Nanobiotechnological advancements in agriculture and food industry: Applications, nanotoxicity, and future perspectives. *Sci. Total Environ.* **2021**, *792*, 148359.
- [134] Kalanaki, M.; Karandish, F.; Afrasiab, P.; Ritzema, H.; Khamari, I.; Tabatabai, S.M. Assessing the influence of integrating soil amendment applications with salinewater irrigation on Ajwain's yield and water productivity. *Irrig. Sci.* **2022**, *40*, 71–85.
- [135] Zulfiqar, F.; Navarro, M.; Ashraf, M.; Akram, N.A.; Munné-Bosch, S. Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Sci.* **2019**, *289*, 110270.
- [136] Kumar, A.; Verma, L.M.; Sharma, S.; Singh, N. Overview on agricultural potentials of biogas slurry (BGS): Applications, challenges, and solutions. *Biomass Convers. Biorefinery* **2022**.
- [137] Chhipa, H. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environ. Chem. Lett.* **2017**, *15*, 15–22.
- [138] Ditta, A.; Arshad, M. Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition. *Nanotechnol. Rev.* **2016**, *5*, 209–229.
- [139] Kottegoda, N.; Sandaruwan, C.; Priyadarshana, G.; Siriwardhana, A.; Rathnayake, U.A.; Berugoda Arachchige, D.M.; Kumarasinghe, A.R.; Dahanayake, D.; Karunaratne, V.; Amaratunga, G.A.J. Urea-Hydroxyapatite Nanohybrids for Slow Release of Nitrogen. *ACS Nano* **2017**, *11*, 1214–1221.
- [140] Dhaliwal, S.S.; Sharma, V.; Shukla, A.K. Impact of micronutrients in mitigation of abiotic stresses in soils and plants—A progressive step toward crop security and nutritional quality. In *Advances in Agronomy*; Donald, L.S., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2022; Volume 173, pp. 1–78; ISBN 0065-2113.
- [141] Navarro-León, E.; Albacete, A.; Torre-González, A.d.l.; Ruiz, J.M.; Blasco, B. Phytohormone profile in *Lactuca sativa* and *Brassica oleracea* plants grown under Zn deficiency. *Phytochemistry* **2016**, *130*, 85–89.

- [142] Buysens C, César V, Ferrais F, De Boulois HD & Declerck S.2016. Inoculation of *Medicago sativa* cover crop with *Rhizophagus irregularis* and *Trichoderma harzianum* increases the yield of subsequently-grown potato under low nutrient conditions. *Applied Soil Ecology* 105,137–143.
- [143] Youssef SA, Tartoura KA & Abdelraouf GA. 2016. Evaluation of *Trichoderma harzianum* and *Serratia proteamaculans* effect on disease suppression, stimulation of ROS-scavenging enzymes and improving tomato growth infected by *Rhizoctonia solani*. *Biological Control* 100, 79–86.
- [144] Mezadri ET, Kuhn KR, Schmaltz S, Tres MV, Zabot GL, Kuhn RC, Mazutti MA. (2022). Evaluation of ultrasound waves for the production of chitinase and β -1,3 glucanase by *Trichoderma harzianum* through SSF. *Biotech.* **12**(5):122. doi: 10.1007/s13205-022- 03179-2
- [145] Batista, B.D.; Singh, B.K. Realities and hopes in the application of microbial tools in agriculture. *Microb. Biotechnol.* **2021**, 14, 1258–1268.
- [146] Verma, K.K.; Song, X.P.; Joshi, A.; Tian, D.D.; Rajput, V.D.; Singh, M.; Arora, J.; Minkina, T.; Li, Y.R. Recent Trends in Nano-Fertilizers for Sustainable Agriculture under Climate Change for Global Food Security. *Nanomaterials* **2022**, 12, 173.
- [147] Mohammadghasemi, V.; Siavash Moghaddam, S.; Rahimi, A.; Pourakbar, L.; Popović-Djordjević, J. The Effect of Winter Sowing, Chemical, and Nano-Fertilizer Sources on Oil Content and Fatty Acids of Dragon's Head (*Lallemantia iberica* Fischer & C.A. Meyrefeer). *J. Plant Growth Regul.* **2021**, 40, 1714–1727.
- [148] Oh, S.; Cave, G.; Lu, C. Vitamin B12 (Cobalamin) and Micronutrient Fortification in Food Crops Using Nanoparticle Technology. *Front. Plant Sci.* **2021**, 12, 668819.
- [149] Lang, C.; Mission, E.G.; Ahmad Fuaad, A.A.H.; Shaalan, M. Nanoparticle tools to improve and advance precision practices in the Agrifoods Sector towards sustainability—A review. *J. Clean. Prod.* **2021**, 293, 126063.
- [150] Ameen, F.; Alsamhary, K.; Alabdullatif, J.A.; ALNadhari, S. A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2021**, 213, 112027.
- [151] Al-Mamun, M.R.; Hasan, M.R.; Ahommed, M.S.; Bacchu, M.S.; Ali, M.R.; Khan, M.Z.H. Nanofertilizers towards sustainable agriculture and environment. *Environ. Technol. Innov.* **2021**, 23, 101658.
- [152] Ashraf, S.A.; Siddiqui, A.J.; Elkhalfifa, A.E.O.; Khan, M.I.; Patel, M.; Alreshidi, M.; Moin, A.; Singh, R.; Snoussi, M.; Adnan, M. Innovations in nanoscience for the sustainable development of food and agriculture with implications on health and environment. *Sci. Total Environ.* **2021**, 768, 144990.
- [153] Raliya, R.; Saharan, V.; Dimkpa, C.; Biswas, P. Nanofertilizer for Precision and Sustainable Agriculture: Current State and Future Perspectives. *J. Agric. Food*

Chem. **2018**, 66, 6487–6503.

- [154] Jiang, M.; Song, Y.; Kanwar, M.K.; Ahammed, G.J.; Shao, S.; Zhou, J. Phytonanotechnology applications in modern agriculture. *J. Nanobiotechnol.* **2021**, 19, 430.
- [155] Avila-Quezada, G.D.; Ingle, A.P.; Golińska, P.; Rai, M. Strategic applications of nano-fertilizers for sustainable agriculture: Benefits and bottlenecks. *Nanotechnol. Rev.* **2022**, 11, 2123–2140.
- [156] Panichikkal, J.; Thomas, R.; John, J.C.; Radhakrishnan, E.K. Biogenic Gold Nanoparticle Supplementation to Plant Beneficial *Pseudomonas monteilii* was Found to Enhance its Plant Probiotic Effect. *Curr. Microbiol.* **2019**, 76, 503–509.
- [157] Prasad, R.; Bhattacharyya, A.; Nguyen, Q.D. Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives. *Front. Microbiol.* **2017**, 8, 1014.
- [158] Iavicoli, I.; Leso, V.; Beezhold, D.H.; Shvedova, A.A. Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **2017**, 329, 96–111.
- [159] Ma, C.; White, J.C.; Zhao, J.; Zhao, Q.; Xing, B. Uptake of Engineered Nanoparticles by Food Crops: Characterization, Mechanisms, and Implications. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2018**, 9, 129–153.
- [160] El-Ramady, H.; Abdalla, N.; Alshaal, T.; El-Henawy, A.; Elmahrouk, M.; Bayoumi, Y.; Shalaby, T.; Amer, M.; Shehata, S.; Fári, M.; et al. Plant Nano-nutrition: Perspectives and Challenges. In *Nanotechnology, Food Security and Water Treatment*; Gothandam, K.M., Ranjan, S., Dasgupta, N., Ramalingam, C., Lichtfouse, E., Eds.; Springer International Publishing AG: Cham, Switzerland, 2018; pp. 129–161.
- [161] Solanki, P.; Bhargava, A.; Chhipa, H.; Jain, N.; Panwar, J. Nano-fertilizers and their smart delivery system. In *Nanoscience in Food and Agriculture*; Rai, M., Ribeiro, C., Mattoso, L., Duran, N., Eds.; Springer International Publishing AG: Cham, Switzerland, 2016; pp. 81–101. ISBN 978-3-319-14023-0.
- [162] Kah, M.; Kookana, R.S.; Gogos, A.; Bucheli, T.D. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nat. Nanotechnol.* **2018**, 13, 677–684.
- [163] López-Valdez, F.; Miranda-Arámbula, M.; Ríos-Cortés, A.M.; Fernández-Luqueño, F.; de la Luz, V. Nanofertilizers and Their Controlled Delivery of Nutrients. In *Agricultural Nanobiotechnology*; López-Valdez, F., Fernández-Luqueño, F., Eds.; International Publishing AG: Cham, Switzerland, 2018; pp. 35–48.
- [164] Kumari, A.; Kumari, P.; Rajput, V.D.; Sushkova, S.N.; Minkina, T. Metal(loid) nanosorbents in restoration of polluted soils: Geochemical, ecotoxicological, and

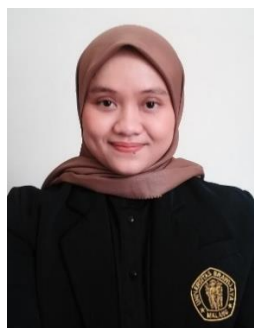
- remediation perspectives. *Environ. Geochem. Health* **2022**, 44, 235–246.
- [165] Joko, T.; Anggoro, S.; Sunoko, H.R.; Rachmawati, S. Pesticides Usage in the Soil Quality Degradation Potential in Wanasari Subdistrict, Brebes, Indonesia. *Appl. Environ. Soil Sci.* **2017**, 2017, 5896191.
- [166] Zhao, F.; Xin, X.; Cao, Y.; Su, D.; Ji, P.; Zhu, Z.; He, Z. Use of Carbon Nanoparticles to Improve Soil Fertility, Crop Growth and Nutrient Uptake by Corn (*Zea mays* L.). *Nanomaterials* **2021**, 11, 2717.
- [167] Xin, X.; Zhao, F.; Zhao, H.; Goodrich, S.L.; Hill, M.R.; Sumerlin, B.S.; Stoffella, P.J.; Wright, A.L.; He, Z. Comparative assessment of polymeric and other nanoparticles impacts on soil microbial and biochemical properties. *Geoderma* **2020**, 367, 114278.
- [168] Feregrino-Perez, A.A.; Magaña-López, E.; Guzmán, C.; Esquivel, K. A general overview of the benefits and possible negative effects of the nanotechnology in horticulture. *Sci. Hortic.* **2018**, 238, 126–137.

BIODATA PENULIS

Dr. Ir. Sutarman, M.P. menyelesaikan Pendidikan S1 di Program Studi Hama dan Penyakit Tanaman Universitas Lampung diselesaikan pada 1984-1988, S2 di Program Studi Ilmu Tanaman KPK PPS UGM-UNIBRAW diselesaikan pada 1992-1994, selanjutnya lulus Program Doktor Ilmu Kehutanan Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2003.



Penulis berkecimpung di bidang kesuburan dan perlindungan kesehatan tanaman. Sejak menjadi dosen tetap Fakultas Pertanian (FP) Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (UMSIDA) pada tahun 2009, penulis lebih banyak menggeluti kajian pemanfaatan fungi efektif bagi upaya peningkatan produktivitas dan kesehatan tanaman serta lahan pertanian. Pada program studi Agroteknologi FP – UMSIDA, penulis diberikepercayaan untuk mengampu mata kuliah Kesuburan dan Mikrobiologi Tanah, Teknologi Bioremediasi, Pengelolaan Hama-Penyakit Terpadu, dan Pestisida Ramah Lingkungan. Penulis sejak 2012 hingga 2024 ini dipercaya mendapatkan hibah riset dari Dirjen Dikti Kemendikbudriset dan Badan Riset Nasional dan Inovasi (BRIN) yang sekarang menjadi Kementerian Pendidikan Tinggi Sains dan Teknologi. Berbagai luaran yang dihasilkan meliputi: artikel jurnal dan prosiding Internasional bereputasi, hak cipta dan patent, monograf, prototipe produk, dan buku ajar. Buku Referensi ini merupakan salah satu luaran tambahan dari hibah riset Penelitian Terapan Perguruan Tinggi 2024.



apt. Oktavia Eka Puspita, S.Farm., M.Sc memulai pendidikan sarjana di bidang farmasi pada tahun 2004 di Fakultas Farmasi Universitas Gadjah Mada dan menyelesaikannya pada tahun 2008. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikannya di Program Double Degree untuk Pendidikan Profesi Apoteker dan Magister Manajemen Farmasi Industri di Fakultas yang sama.

Pendidikan Profesi Apoteker diselesaikannya pada tahun 2009 dan Pendidikan Magister diselesaikan pada tahun 2010. Tahun 2011 penulis mulai bergabung sebagai staf pengajar di Program Studi Farmasi Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya hingga saat ini. Kemudian tahun 2014 hingga 2016 penulis mengambil pendidikan magister lagi untuk bidang Sains dan Teknologi Farmasi. Penulis merupakan dosen pengampu di bidang farmasetika dan teknologi farmasi di Program Studi Farmasi Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya. Penulis telah melakukan penelitian dan publikasi dalam bidang

nanoteknologi untuk system pengantaran obat, terutama nanoemulsi menggunakan SNEDDS dan nanopartikel polimer. Buku ini merupakan salah satu kontribusi penulis dalam bidang nanoteknologi.

Prof. Dr. Ir. Hj. Andriani Eko Prihatiningrum, MS. lahir di Bangil 16 Agustus 1961. Lulus Sarjana Pertanian di UPN Veteran Surabaya pada tahun 1986 Jurusan Perlindungan Tanaman. Gelar Magister Sain di bidang Pertanian di peroleh di Universitas Gadjah Mada tahun 1992, sedangkan gelar Doktor diperoleh dari Universitas Airlangga tahun 1998. Jabatan akademik Guru Besar bidang Pertanian Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (UMSIDA) diberikan negara pada tahun 2008. Dalam perjalanan kariernya di UMSIDA, penulis pernah menjadi Dekan Fakultas Pertanian tahun 2010-2014 dan Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) tahun 2014-2016. Penulis selama ini selalu terlibat dalam penelitian dan abdimas serta sebagai pengampu mata kuliah Bioteknologi dan Perlindungan Tanaman.





UMSIDA PRESS
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo
Jl. Mojopahit No. 666 B
Sidoarjo , Jawa Timur