

Tinjauan: Perlindungan Tanaman menggunakan DNA Ekstraseluler (exDNA) Musuh
Plant Protection using Enemy Extracellular DNA (exDNA)

Tessa Fauziah^{1*)}

^{1*)} Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. HS. Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361

*Penulis untuk korespondensi: tessa.fauziah@unsika.ac.id

Diterima 31 Mei 2023 / Disetujui 5 Juni 2023

ABSTRACT

Pests, pathogens, and weeds are enemies of plants that cause a decrease in crop productivity and yield produced which leads to a decrease in farmers income. Most farmers control the population of those organisms using chemical pesticides because they are effective, cheap, and fast. However, the use of these chemical pesticides has a negative impact on the environment because the chemical residues will linger in the soil and able to contaminate agricultural product, water, and air, furthermore have bad impact on human health. exDNA technology application act as alternative biopesticides or plant vaccines to control pests, weeds, and pathogens. Extracellular DNA in this context refer to DNA outside of genetic inheritance function. Recently, it is discovered that the new functional role of DNA is that it can exhibit growth inhibitory effects in specific organisms (organisms within one species) but act as an elicitor, inducing a defense system in organisms outside the species of origin exDNA (non-self organisms). This article provides an overview of plant responses to extracellular DNA and its application in agriculture as one of applied technologies for plant protection.

Keywords: biopesticide; extracellular DNA; non-self exDNA; self-exDNA; plant vaccines

ABSTRAK

Hama, patogen dan gulma merupakan musuh tanaman yang menyebabkan penurunan produktivitas tanaman hingga penurunan produksi yang mengarah pada menurunnya pendapatan petani. Selama ini, petani mengendalikan populasi organisme pengganggu tanaman ini menggunakan pestisida kimia karena bersifat efektif, murah, dan cepat. Namun, penggunaan pestisida kimia ini berdampak negatif terhadap lingkungan karena residu kimianya akan mengendap di tanah dan dapat mencemari hasil pertanian, air, dan udara hingga berdampak pada kesehatan manusia. Teknologi exDNA dapat menjadi alternatif biopestisida dan vaksin tanaman untuk mengendalikan hama, gulma dan patogen. Ekstraseluler DNA yang dimaksud dalam konteks ini adalah DNA diluar fungsi pewarisan genetik. Baru-baru ini diketahui peran fungsional yang baru dari DNA yaitu dapat menghasilkan efek penghambatan pertumbuhan pada organisme spesifik (organisme dalam satu spesies) dan berperan sebagai elisitor, menginduksi sistem pertahanan pada organisme diluar spesies asal exDNA (non-self). Artikel ini memberikan tinjauan mengenai respon tanaman terhadap DNA ekstraseluler hingga aplikasinya dalam bidang pertanian sebagai salah satu teknologi untuk perlindungan tanaman.

Kata kunci: biopestisida; ekstraseluler DNA; non-self exDNA; self exDNA; vaksin tanaman

PENDAHULUAN

Jumlah populasi manusia dunia pada tahun 2020 mencapai 7,8 juta orang. Angka ini diproyeksikan akan naik menjadi 9,9 juta pada tahun 2050 (<https://www.prb.org>). Peningkatan populasi tersebut harus diiringi dengan peningkatan kapasitas untuk pemenuhan kebutuhan hidup manusia. Tingkat produksi pangan saat ini tidak cukup untuk memenuhi permintaan yang diproyeksikan. Selain diperburuk oleh perubahan iklim, beban pemenuhan kebutuhan ini juga diperburuk oleh menurunnya produksi pertanian oleh gulma, hama dan patogen. Gulma menjadi pesaing tanaman pangan dalam mendapatkan zat-

zat hara, cahaya matahari, air dan ruang tumbuh sehingga pertumbuhan tanaman pangan terhambat dan produktivitasnya menurun (Sitompul dan Sebayang, 2020). Penurunan hasil panen mencapai 20-80% jika gulma tidak dikendalikan (Mubarak dkk., 2014). Hama dan patogen dapat menyebabkan penurunan kualitas hingga penurunan produksi yang mengarah pada menurunnya pendapatan petani. Contohnya, pada kondisi tertentu, hama padi, *Leptocorisa oratoria*, menyebabkan penurunan produksi hingga 50%. Sementara itu, penurunan produksi pada pertanian dapat disebabkan oleh serangan patogen seperti virus, bakteri dan jamur (Meitha dkk., 2021). *Fusarium* merupakan jamur penyebab utama kerusakan

signifikan pada banyak komoditas pangan seperti pisang, kapas, coklat dan tanaman lainnya (Ploetz, 2006). Oleh karena itu, pengendalian gulma, hama dan patogen sangat penting dilakukan untuk memperbaiki produktivitas pertanian dan berperan dalam menentukan apakah kita memenuhi persyaratan produksi pangan di masa depan.

Ada beberapa metode dalam mengendalikan gulma, hama dan patogen untuk meminimalisasi penurunan produktivitas pertanian, yaitu pengendalian secara fisik, kimia dan biologis. Untuk mengendalikan gulma, para petani telah lama menggunakan cara fisik dan kimiawi dengan melakukan penyiangan, mencabut gulma secara langsung menggunakan tangan atau alat dan herbisida kimia. Untuk pengendalian patogen, cara kimiawi, menggunakan pestisida kimia, lebih banyak digunakan oleh petani karena lebih efektif, murah dan cepat. Penyiangan gulma tidak efektif dari segi tenaga kerja dan biaya. Sementara itu, penggunaan pestisida kimia berdampak negatif terhadap lingkungan diantaranya yaitu residu kimia akan mengendap di tanah dan hasil pertanian serta air dan udara menjadi tercemar (Mada dkk., 2013) (Mada dkk., 2013). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan metode lain tanpa menggunakan pestisida kimia untuk mengendalikan gulma, hama dan patogen.

DNA biasanya dikenal sebagai molekul pembawa instruksi yang diperlukan untuk fungsi sel dan pewarisan genetik (Carteni dkk., 2016). DNA ekstraseluler (eDNA), DNA diluar fungsi ini, yang dihasilkan diketahui dapat menghasilkan efek penghambatan pertumbuhan pada organisme konspesifik (organisme dalam satu spesies) (Mazzoleni dkk., 2015 a,b) dan berperan sebagai elisitor, menginduksi sistem pertahanan pada organisme diluar spesies asal eDNA (*non-self*) (Serrano-Jamaica dkk., 2021).

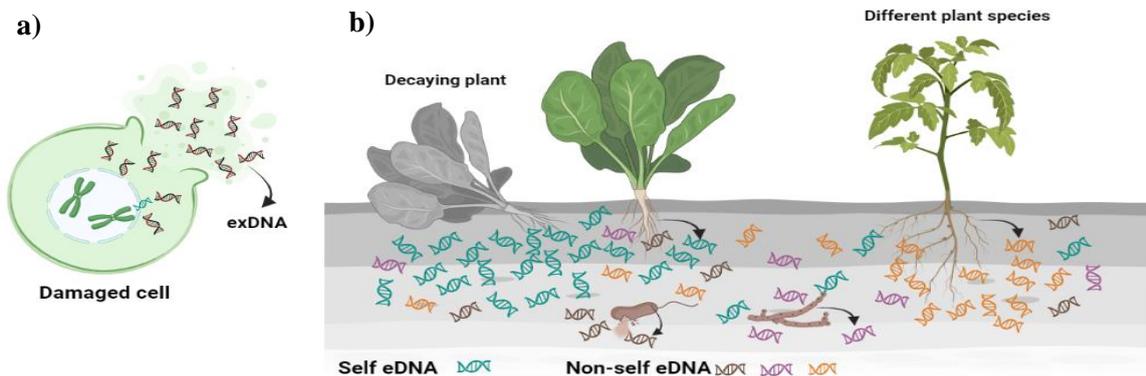
Berdasarkan hasil penemuan tersebut, eDNA musuh sangat potensial digunakan sebagai suatu pendekatan bioteknologi untuk melindungi tanaman dari hama, patogen dan gulma yang merupakan musuh tanaman. Disini, penulis memberikan tinjauan mengenai respon tanaman terhadap DNA ekstraseluler hingga aplikasinya dalam bidang pertanian sebagai teknologi untuk perlindungan tanaman.

APA ITU DNA EKSTRASELULER

Di dalam sel semua organisme hidup dan beberapa virus, terdapat DNA yang berfungsi sebagai pembawa materi genetik. Selain itu, ada DNA yang berada diluar sel dan tidak terlindung oleh membran sitoplasma. DNA jenis ini dinamakan DNA Ekstraseluler (exDNA) (Levy-booth dkk., 2007). ExDNA dikeluarkan oleh sel ketika sel lisis atau mengalami kematian (Nagler dkk., 2018) (**Gambar 1a**). ExDNA dapat berasal dari berbagai organisme baik prokariot maupun eukariot dan dapat ditemukan di berbagai lingkungan alam mulai dari tanah, biofilm hingga ekosistem air (Ferrusquía dkk., 2020).

Di lingkungan tanah, exDNA terutama berasal dari sel-sel tudung akar yang mati akibat infeksi patogen, melalui penyebaran serbuk sari atau dari degradasi sel/jaringan tanaman selama pembusukan alami, misalnya serasah tanaman (Levy-Booth dkk., 2007). Selain itu, fungi, bakteri dan fauna tanah berkontribusi untuk keberadaan exDNA di tanah. Seperti halnya bakteri, fungi dan fauna tanah melepaskan exDNA ke tanah ketika lisis (Levy-booth, 2007) (**Gambar 1b**).

DNA ekstraseluler sebenarnya telah lama dikenal umum di lingkungan, sejak tahun 1950-an dan setelah itu, DNA ekstraseluler banyak dipelajari. Di rizosfer, ditemukan bahwa DNA



Gambar 1. (a) exDNA dikeluarkan oleh sel lisis ke lingkungan ekstraseluler. Sel-sel utuh yang berdekatan dengan sel yang lisis dapat menerima *self-exDNA* (esDNA). (b) Dilingkungan tanah, tanaman dapat terpapar exDNA dari individu konspesifik (*self-exDNA*) dan exDNA dari individu lain diluar spesiesnya (*non-self exDNA*) seperti bakteri, jamur, fauna tanah dan tumbuhan lain berbeda spesies (Duran-flores and Heil, 2016). Gambar ini dibuat menggunakan BioRender (<https://biorender.com>).

ekstraseluler menjadi salah satu komponen dari *root cap slime* dan terlibat dalam mekanisme pertahanan ujung akar terhadap infeksi patogen (Wen dkk., 2009).

Pada mikroorganisme, kemudian diketahui bahwa DNA ekstraseluler adalah salah satu komponen penyusun biofilm yang berperan dalam stabilitas struktur (Nagler dkk., 2018). Akhirnya, Mazzoleni dkk. (2015a) memperkenalkan istilah “*self- dan non-self-extracellular DNA*” (esDNA dan *non-self exDNA*), berturut-turut, untuk DNA yang berasal dari tumbuhan itu sendiri atau tumbuhan lain yang satu spesies (konspesifik) dan DNA yang berasal dari organisme lain yang hubungan kekerabatannya jauh secara filogenetik (**Gambar 1b**). Mereka melaporkan bahwa esDNA dapat menghambat pertumbuhan tanaman yang bersifat spesifik spesies. Ditahun yang sama, Mazzoleni dkk. (2015b) mengungkapkan bahwa efek penghambatan pertumbuhan spesifik spesies oleh esDNA selain berlaku untuk tumbuhan, ternyata berlaku pula untuk organisme lainnya yaitu bakteri, alga, jamur, protozoa, dan juga hewan.

RESPON TANAMAN TERHADAP ExDNA

Di lingkungan tanah, tanaman dapat terpapar exDNA yang berasal dari dirinya sendiri atau exDNA dari individu konspesifik (*self exDNA*) atau exDNA dari individu lain yang kekerabatannya jauh (*non-self exDNA*) (Duran-flores and Heil, 2016) (**Gambar 1b**). Tumbuhan menggunakan cara berbeda untuk merespon *self* dan *non-self exDNA*. Perbedaan respon tumbuhan terhadap *self* dan *non-self exDNA* menjadi sorotan peneliti untuk mengkaji bagaimana mekanisme ini terjadi. Pada bagian ini, penulis menyajikan beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui respon tumbuhan terhadap paparan exDNA baik *self* maupun *non-self exDNA* (Tabel 1.)

Duran-flores dan Heil (2016) menemukan bahwa exDNA dipersepsi sebagai suatu sinyal cekaman oleh tanaman penerima dan dapat merespon dengan aktivasi mekanisme resistensi atau penundaan perkecambahan biji. Selanjutnya, diketahui bahwa *self-exDNA* (esDNA) berperan sebagai DAMP (*Damage Associated Molecular Pattern*), suatu molekul endogenus yang berada diluar kompartemen yang sesuai yang mengindikasikan adanya kerusakan sel (Vega-Muñoz dkk., 2018; Duran and Heil, 2018). EsDNA sebagai DAMP terbukti dalam beberapa penelitian dapat menginduksi respon imun tumbuhan seperti produksi ROS, aktivasi MAPKs (Duran and Heil, 2018), depolarisasi membran dan sinyaling Ca^{2+} (Barbero dkk., 2016), serta perubahan ekspresi gen terkait *oxidative burst* dan produksi metabolit sekunder untuk mengatasi kondisi cekaman (Vega-Muñoz dkk., 2018). Sementara itu, *non-self exDNA* diduga dipersepsi tumbuhan sebagai PAMP

(*Pathogen-Associated Molecular Patterns*) (Chiusano dkk. 2021), suatu sinyal bahaya yang berasal dari organisme lain yang mengindikasikan adanya serangan patogen.

Penelitian terkini, (Chiusano dkk., 2021), yang membandingkan efek perlakuan esDNA dan *non-self exDNA* terhadap pertumbuhan *Arabidopsis thaliana*, menemukan bahwa ternyata tumbuhan dapat membedakan antara *self-* dan *non-self-extracellular DNA*. Hasil analisis mikroskopi menggunakan mikroskop konfokal yang diamati 1 jam setelah akar *A. thaliana* diberi paparan DNA ekstraseluler menunjukkan bahwa esDNA terlokalisasi dipermukaan sel akar sedangkan *non-self exDNA* dapat memasuki sel dan jaringan akar. Secara spesifik, paparan esDNA terhadap tumbuhan mengakibatkan terbatasnya permeabilitas sel, mempengaruhi fungsi kloroplas dan produksi ROS serta akhirnya dapat menginduksi *cell cycle arrest*. Sementara itu, paparan *non-self exDNA* terhadap tumbuhan menginduksi mekanisme sinyaling yang cenderung pada aktivasi jalur hipersensitif dan melibatkan *systemic acquired resistance* (SAR).

APLIKASI ExDNA MUSUH UNTUK PERLINDUNGAN TANAMAN

Berdasarkan penemuan fungsi baru untuk exDNA, berperan sebagai DAMP/PAMP, molekul berpotensi digunakan sebagai salah satu pendekatan bioteknologi untuk perlindungan tanaman. Penggunaan teknologi exDNA musuh ini memiliki aksi ganda yaitu (a) menghambat pertumbuhan organisme asal exDNA (*self exDNA*); (b) mengaktifasi sistem imun (elisitor) (*non-self exDNA* maupun *self exDNA*) (Ferrusquía dkk., 2020).

Aksi yang pertama berpotensi diaplikasikan sebagai biokontrol di bidang agrikultur untuk menekan pertumbuhan musuh tanaman (gulma, hama dan fitopatogen). Ketika sudah teridentifikasi penyebab penyakit dari suatu tanaman, DNA dari musuh yang teridentifikasi dapat diekstrak dan diaplikasikan terhadap tanaman target untuk menghambat pertumbuhan musuh tanaman tersebut dan meningkatkan produktivitas tanaman target.

Aksi yang kedua dapat diaplikasikan sebagai vaksin tanaman untuk melindungi tanaman dari serangan patogen dengan mengaplikasikan baik *non-self exDNA* maupun *self exDNA* dengan konsentrasi tertentu yang berasal dari organisme patogen karena exDNA ini dapat berperan sebagai molekul yang dapat mengaktifasi sistem imun (elisitor) pada tanaman target.

Penggunaan aksi exDNA yang kedua, sebagai elisitor sistem imun pada tumbuhan, dilakukan oleh Serrano-Jamaica dkk. (2021) dengan mengaplikasikan *non-self exDNA* yang berasal dari kompleks patogen penyebab penyakit layu dan

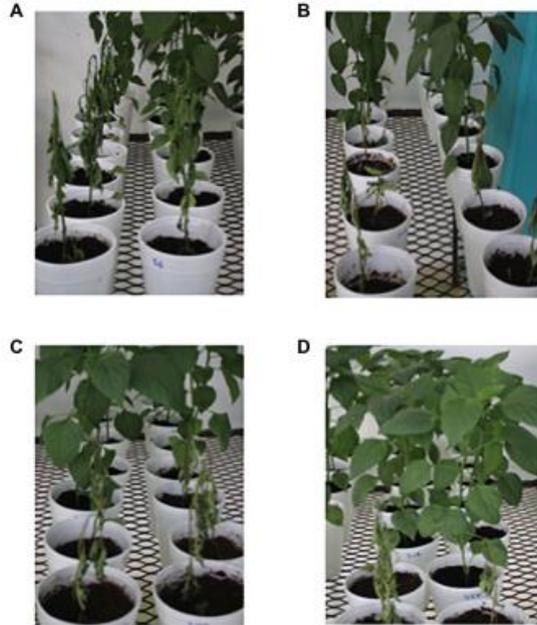
busuk akar (*Phytophthora capsici* Leon, *Fusarium oxysporum* Schlecht dan *Rhizoctonia solani*) dengan konsentrasi berbeda (20, 60 dan 100 g/mL) terhadap tanaman cabe (*Capsicum annuum* L.). Hasilnya menunjukkan bahwa aplikasi *non-self*

exDNA 100 ug/mL pada daun tanaman cabe menginduksi peningkatan kandungan senyawa fenolik flavonoid total serta ekspresi gen terkait ketahanan tanaman dibandingkan dengan tanaman control.

Tabel 1. Respon tumbuhan yang diinduksi oleh esDNA dan *non-self exDNA*

Spesies Target	Perlakuan/sumber <i>exDNA</i>	Respon	Referensi
Pisang (<i>Musa acuminata</i>)	<i>non-self exDNA/Fusarium oxysporum</i>	Meningkatkan resistensi terhadap infeksi jamur Foc. TR4 (penurunan gejala daun dan perubahan warna rimpang)	Meitha dkk. (2023)
Buncis (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	esDNA/buncis	Menginduksi respon sistem imun melalui aktivasi jalur asam jasmonat dan meningkatkan ketahanan terhadap herbivora (<i>Spodoptera frugiperda</i>)	Duran-Flores (2023)
	<i>non-self exDNA/Botrytis cinerea</i> dan <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Menginduksi respon sistem imun melalui aktivasi jalur asam salisilat dan mengurangi densitas populasi jamur patogen (<i>Botrytis cinerea</i> dan <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>)	
Tomat (<i>Solanum lycopersicum</i>)	esDNA/tomat	Mengaktivasi sistem imun tanaman dimana pengaruh esDNA lebih tinggi 10x lipat dan lebih lama dibanding dengan <i>non-self exDNA</i>	Carbajal-Valenzuela dkk. (2022)
	<i>non-self exDNA/ selada (Lactuca sativa)</i> , seledri (<i>Apium graveolens</i>) dan timun (<i>Cucumis sativus</i>)		
	<i>non-self exDNA/ Fusarium oxysporum</i>		
Cabai (<i>Capsicum annuum</i> L.)	<i>non-self exDNA/ Phytophthora capsici</i> Leon, <i>Fusarium oxysporum</i> Schlecht dan <i>Rhizoctonia solani</i> (campuran)	Menginduksi peningkatan kandungan senyawa fenolik flavonoid total dan ekspresi gen terkait ketahanan tanaman serta menurunkan mortalitas karena penyakit layu dan busuk akar	Serrano-Jamaica dkk. (2021)
<i>Arabidopsis thaliana</i>	esDNA/ <i>Arabidopsis thaliana</i>	esDNA terlokalisasi dipermukaan sel akar dan menyebabkan permeabilitas sel terbatas, esDNA, mempengaruhi produksi ROS yang akhirnya menyebabkan <i>cell cycle arrest</i> , terjadi peningkatan densitas rambut akar, nekrosis apeks akar dan klorosis daun	Chiusano dkk. (2021)
	<i>non-self exDNA/Clupea harengus</i>	<i>non-self exDNA</i> dapat memasuki sel dan jaringan akar dan menginduksi aktivasi respon hipersensitif dan melibatkan <i>systemic acquired resistance</i> (SAR)	
<i>Phaseolus vulgaris</i>	esDNA, <i>non-self exDNA/ P. lunatus</i>	menghambat pertumbuhan akar primer dan menyebabkan peningkatan produksi H ₂ O ₂ dan aktivasi MAPKs, menurunkan infeksi oleh bakteri patogen (<i>Pseudomonas syringae</i>) dan meningkatkan ketahanan tidak langsung terhadap herbivora. Sementara, efek pada <i>non-self exDNA</i> lebih rendah bahkan tidak terdeteksi.	Duran-Flores dan Heil (2018)
Selada (<i>Lactuca sativa</i> L.)	esDNA/selada	Menyebabkan penghambatan pertumbuhan akar dan menginduksi peningkatan produksi metabolit sekunder yang terkait dengan respons pertahanan terhadap cekaman	Vega-Munoz dkk. (2018)
	<i>non-self exDNA/Capsicum chinense</i>	Menghambat pertumbuhan akar, namun pengaruhnya lebih rendah dari esDNA.	
<i>Phaseolus lunatus</i>	esDNA, <i>non-self exDNA/ Z. mays</i>	esDNA menyebabkan peningkatan depolarisasi membran dan fluks Ca ²⁺ yang signifikan	Barbero dkk. (2016)
Jagung (<i>Zea mays</i>)	esDNA, <i>non-self exDNA/ P. lunatus</i>		

Sementara itu, ketika fragmen DNA kompleks patogen 100 ug/mL diaplikasikan pada tanaman yang telah diinfeksi kompleks patogen, menyebabkan penurunan mortalitas sebesar 40% pada hari ke-30 pasca inokulasi (Gambar 2.). Hasil penelitian tersebut mengindikasikan bahwa fragmen DNA dari musuh dapat digunakan sebagai agen biokontrol pada tanaman untuk melawan penyakit tertentu, misalnya fragmen DNA dari kompleks patogen *Phytophthora capsici* Leon, *Fusarium oxysporum* Schlecht dan *Rhizoctonia solani* dapat digunakan untuk melawan penyakit layu dan busuk akar pada tanaman cabe.



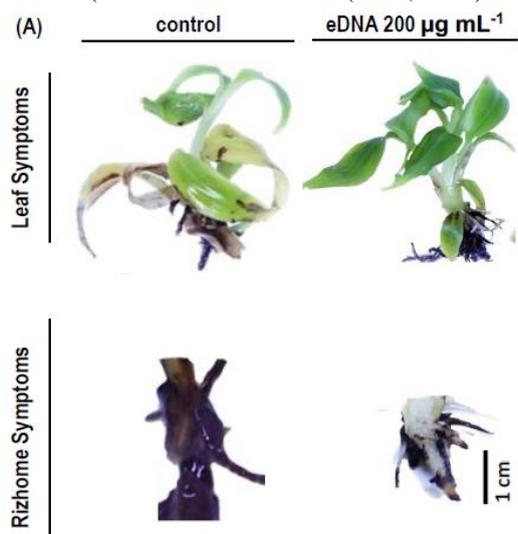
Gambar 2. Tanaman yang diinokulasi kompleks patogen dan diberi perlakuan esDNA pada hari ke-30 setelah inokulasi. (A) tanaman kontrol, tanpa diinfeksi patogen dan tanpa perlakuan DNA kompleks patogen. (B) tanaman diinfeksi kompleks patogen dan DNA 20 ug/mL, (C) 60 ug/mL dan (D) 100 ug/mL (Serrano-Jamaica dkk., 2021).

Penggunaan aksi exDNA yang pertama, *self exDNA* dapat memberikan efek penghambatan pertumbuhan terhadap organisme asal exDNA, dilakukan oleh Meitha dkk. (2023). Mereka melakukan *self-inhibition test* untuk mengevaluasi apakah *self exDNA* dari *Fusarium oxysporum f. sp cubense Tropical race 4 (Foc TR4)* dapat menghambat pertumbuhannya sendiri dan *priming test* untuk mengetahui peningkatan resistensi tanaman pisang terhadap *Foc* ketika diaplikasikan *non-self exDNA* dari *Foc TR4*. *Self-inhibition test* menunjukkan bahwa germinasi spora *Foc* terhambat dengan paparan exDNA-nya sendiri pada konsentrasi 400 and 800 $\mu\text{g mL}^{-1}$. Sementara itu, hasil *priming test* mengungkapkan bahwa resistensi tanaman pisang terhadap *Foc TR4* meningkat

(terjadi penurunan gejala daun dan perubahan warna rimpang, Gambar 3.) dengan mengaplikasikan 200 $\mu\text{g mL}^{-1}$ exDNA *Foc TR4*. Mereka mengklaim bahwa exDNA *Foc TR4* berpotensi sebagai kandidat biofungisida untuk menginduksi resistensi tanaman pisang terhadap penyakit layu fusarium.

Selain tanaman cabai dan pisang, aplikasi *self* dan *non self exDNA* pada tanaman tomat telah dievaluasi oleh Carbajal-Valenzuela dkk. (2022). Mereka melakukan eksperimen dengan memberi tanaman tomat 5 perlakuan yaitu (1) 50 ppm *self exDNA*, (2,3) 15 ppm and 150 ppm of *F. oxysporum eDNA*, (4) 100 ppm exDNA dari berbagai tanaman (*mixed plants exDNA*) dan, (5) kontrol (tanpa exDNA) dan mengevaluasi respon imun tanaman pada beberapa waktu berbeda. Carbajal-Valenzuela dkk. Menemukan bahwa setiap perlakuan dapat mengaktifasi sistem imun tanaman secara signifikan, tetapi respon terhadap *self exDNA* lebih tinggi 10x lipat dibandingkan dengan *non-self exDNA non-diri* dan lebih lama, hingga hari 10 hari setelah *self xDNA* diaplikasikan.

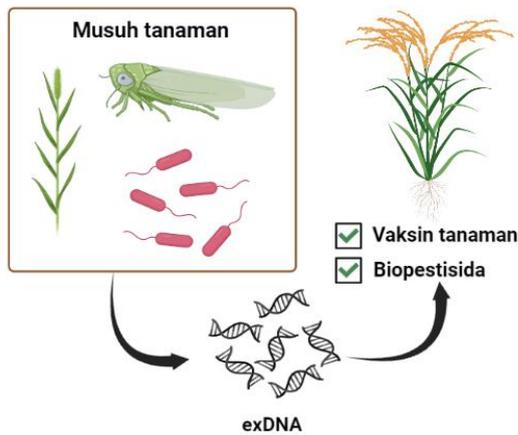
Selain menginduksi resistensi terhadap serangan jamur patogen, exDNA juga dapat diapikasi pada tanaman untuk menurunkan infeksi oleh bakteri patogen (*Pseudomonas syringae*) dan meningkatkan ketahanan tidak langsung terhadap herbivora (Duran-Flores dan Heil (2018, 2023).



Gambar 3. Morfologi daun dan rimpang pada tanaman pisang pada hari ke-8 setelah diinfeksi oleh *Foc TR4*. Gejala akibat infeksi *Foc TR4* meliputi daun menguning dan rimpang menghitam, seperti teramati pada kontrol (Meitha dkk., 2023).

Aplikasi Buncis (*Phaseolus vulgaris*) *self* dan *non self exDNA* pada tanaman buncis juga telah diidentifikasi oleh Duran-Flores dan Heil (2023). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa *self exDNA* dapat menginduksi respon sistem imun

melalui aktivasi jalur asam jasmonat dan meningkatkan ketahanan terhadap herbivora (*Spodoptera frugiperda*). Sementara itu, *non-self exDNA* dapat menginduksi respon sistem imun melalui aktivasi jalur asam salisilat dan mengurangi densitas populasi jamur patogen (*Botrytis cinerea* dan *Sclerotinia sclerotiorum*)



Gambar 4. Aksi exDNA sebagai teknologi untuk perlindungan tanaman terhadap musuh (hama, gulma dan patogen). Gambar ini dibuat menggunakan BioRender (<https://biorender.com>)

KESIMPULAN

Penemuan peran fungsional baru untuk DNA ekstraseluler (exDNA) memberikan pendekatan baru dalam bioteknologi perlindungan tanaman. Ekstraseluler DNA yang diperoleh dari musuh (gulma, hama dan patogen) dapat digunakan sebagai perlindungan tanaman. Penggunaan exDNA ini tanaman memiliki peran ganda yaitu sebagai biopestisida untuk menekan pertumbuhan musuh tanaman (gulma dan hama) serta sebagai vaksin tanaman, menjadi elisitor untuk menginduksi respon imun tanaman target terhadap infeksi patogen (Gambar 4). Teknologi exDNA berpotensi menjadi alternatif pestisida kimia dalam mengendalikan pertumbuhan musuh tanaman karena bersifat ramah lingkungan, hanya menggunakan pelarut berupa air dan DNA dari organisme target. Selain itu, di masa mendatang, teknologi esDNA ini menjanjikan untuk diproduksi secara besar-besaran dalam skala industri karena biaya sintesis DNA akan menjadi sangat murah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada keluarga dan rekan sejawat di Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Singaperbangsa Karawang yang telah banyak memberikan bantuan dukungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Barbero, F., Guglielmotto, M., Capuzzo, A., and Maffei, M. E. (2016): Extracellular Self-DNA (esDNA), but Not Heterologous Plant or Insect DNA (etDNA), Induces Plasma Membrane Depolarization and Calcium Signalling in Lima Bean (*Phaseolus lunatus*) and Maize (*Zea mays*), *Int. J. Mol. Sci.*, **17**, 1659.
- Bhat, A., and Ryu, C. M. (2016): Plant Perceptions of Extracellular DNA and RNA, *Molecular Plant*, **9**, 956–958.
- Carbajal-Valenzuela, I.A.; Medina-Ramos, G.; Caicedo-Lopez, L.H.; Jiménez-Hernández, A.; Ortega-Torres, A.E.; Contreras-Medina, L.M.; Torres-Pacheco, I.; Guevara-González, R.G. (2021): Extracellular DNA: Insight of a Signal Molecule in Crop Protection. *Biology* 2021,10,1022.<https://doi.org/10.3390/biology10101022>.
- Carbajal-Valenzuela, I.A.; Guzmán-Cruz, R.; González-Chavira, M.M.; Medina-Ramos, G.; Serrano-Jamaica, L.M.; Torres-Pacheco, I.; Vázquez, L.; Feregrino-Pérez, A.A.; Rico-García, E.; Guevara-González, R.G. (2022): Response of Plant Immunity Markers to Early and Late Application of Extracellular DNA from Different Sources in Tomato (*Solanum lycopersicum*). *Agriculture* 2022, 12, 1587. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101587>
- Carteni, F., Bonanomi, G., Giannino, F., Incerti, G., Vincenot, C. E., Chiusano, M. L., Mazzoleni, S., Carteni, F., Bonanomi, G., Giannino, F., Incerti, G., Vincenot, C. E., Chiusano, M. L., and Self-dna, S. M. (2016): Self-DNA inhibitory effects: Underlying mechanisms and ecological implications, *Plant Signaling & Behavior*, **11**(4).
- Chiusano, M. L., Incerti, G., Colantuono, C., Termolino, P., Palomba, E., Monticolo, F., Benvenuto, G., Foscarini, A., Esposito, A., Marti, L., Lorenzo, G. De, Vega-muñoz, I., Heil, M., Carteni, F., and Bonanomi, G. (2021): Arabidopsis thaliana Response to Extracellular DNA: Self Versus Nonself Exposure, *Plants*, **10**(1744).
- Duran, D., and Heil, M. (2018): Extracellular self-DNA as a damage-associated molecular pattern (DAMP) that triggers self-specific immunity induction in plants, *Brain Behavior and Immunity*, retrieved from internet: <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2017.10.010>, **72**, 78–88.
- Duran-flores, D., and Heil, M. (2016): ScienceDirect Sources of specificity in plant damaged-self recognition, *Current Opinion in Plant Biology*, **32**, 77–87.
- Durán-Flores D, Heil M. (2023). The CpG-dependent plant immune response to self-

- DNA triggers defence hormone signalling and improves fitness. Research Square, DOI: 10.21203/rs.3.rs-2649049/v1.
- Ferrusquía, N. I., Gobinath, J., Irineo, C., Pacheco, T., and Rico, E. (2020): Extracellular DNA: A Relevant Plant Damage - Associated Molecular Pattern (DAMP) for Crop Protection Against Pests — A Review, *Journal of Plant Growth Regulation*.
- Levy-booth, D. J., Campbell, R. G., Gulden, R. H., Hart, M. M., Powell, R., Klironomos, J. N., Pauls, K. P., Swanton, C. J., Trevors, J. T., and Dunfield, K. E. (2007): Cycling of extracellular DNA in the soil environment, *Soil & Biochemistry*, **39**, 2977–2991.
- Mazzoleni, S., Bonanomi, G., Incerti, G., Chiusano, M. L., Termolino, P., Mingo, A., Senatore, M., Giannino, F., Carten, F., Rietkerk, M., and Lanzotti, V. (2015): Inhibitory and toxic effects of extracellular self-DNA in litter: a mechanism for negative plant – soil feedbacks? *New Phytologist*, **205**, 1195–1210.
- Mada, D., N., D., and Adams, I. G. (2013): Effect of Continuous Application of Herbicide on Soil and Environment with Crop Protection Machinery in Southern Adamawa State, *International Refereed Journal of Engineering and Science*, retrieved from internet: www.irjes.com, **2**(6), 4–9.
- Mazzoleni, S., Carteni, F., Bonanomi, G., Senatore, M., Termolino, P., Giannino, F., Incerti, G., Rietkerk, M., Lanzotti, V., and Chiusano, M. L. (2015): Rapid report Inhibitory effects of extracellular self-DNA: a general biological, *New Phytologist*.
- Meitha, K., Esyanti, R. R., and Hanisia, R. H. (2021): Non-coding RNA Research Green pesticide: Tapping to the promising roles of plant secreted small RNAs and responses towards extracellular DNA, *Non-Coding RNA Research*, **6**, 42–50.
- Meitha, K.; Hanisia, R.H.; Signorelli, S.; Fauziah, T.; Iriawati; Esyanti, R.R. Extracellular DNA of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* as a Priming Agent for Inducing the Resistance of Banana Plantlets. *Agronomy* 2023, **13**, 441. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020441>.
- Mubarak, A. F. M., Widaryanto, E., and Sebayang, T. (2014): Taraf pemupukan nitrogen terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kentang (*Solanum tuberosum* L.), *Jurnal Produksi Tanaman*, **2**(7), 542–551.
- Nagler, M., Insam, H., Pietramellara, G., and Ascher-Jenull, J. (2018): Extracellular DNA in natural environments: features, relevance and applications, *Applied Microbiology and Biotechnology*, **102**, 6343–6356.
- Ploetz, R. C. (2006): *Fusarium* -Induced Diseases of Tropical Perennial Crops *Fusarium* -Induced Diseases of Tropical, Perennial Crops, *the Annual Meeting of The American Phytopathological Society*, **96**.
- Serrano-Jamaica, L. M., Villordo-Pineda, E., González-Chavira, M. M., Guevara-González, R. G., and Medina-Ramos, G. (2021): Effect of Fragmented DNA From Plant Pathogens on the Protection Against Wilt and Root Rot of *Capsicum annum* L. Plants, *Frontiers in Plant Science*, **11**.
- Sitompul, B. B., and Sebayang, H. T. (2020): Keanekaragaman Gulma pada Kentang (*Solanum Tuberosum* L.) Akibat Pengaruh Pengendalian Gulma Diversity of Weed in Potato (*Solanum Tuberosum* L.) due to Effect of Weed Control, *Jurnal Produksi Tanaman*, **8**(1), 1–7.
- Vega-Muñoz, I., Feregrino-Pérez, A. A., Torres-Pacheco, I., and Guevara-González, R. G. (2018): Exogenous fragmented DNA acts as a damage-associated molecular pattern (DAMP) inducing changes in CpG DNA methylation and defence-related responses in *Lactuca sativa* L., *Functional Plant Biology*.