



Teknologi RNA Interference (RNAi) Sebagai Inovasi Pengendalian OPT Ramah Lingkungan

RNA Interference (RNAi) Technology as an Environmentally Friendly Innovative Pest Control

Welmy Soumena^{1*} ✉ | Muhammad Sarjan¹ | Muhammad Taufik Fauzi¹ | Pending Dadih Permana¹

¹✉ Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana Universitas Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat 83115, Indonesia

Abstrak

Teknologi RNA interference (RNAi) merupakan salah satu terobosan bioteknologi modern yang menawarkan pendekatan spesifik, efektif, dan ramah lingkungan dalam pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman (OPT). Berbeda dengan pestisida kimia yang bersifat luas dan berdampak negatif terhadap lingkungan, pendekatan RNAi bekerja dengan menghambat ekspresi gen tertentu pada hama target tanpa memengaruhi organisme non-target. Artikel ini menyajikan kajian komprehensif berbasis literatur ilmiah mengenai mekanisme kerja RNAi, aplikasi teknologi RNAi dalam berbagai komoditas pertanian, efektivitasnya dalam menekan serangan OPT, serta tantangan dan peluang pengembangannya sebagai komponen penting dalam sistem pertanian berkelanjutan. Melalui analisis terhadap hasil-hasil penelitian sebelumnya, artikel ini menunjukkan bahwa RNAi berpotensi besar untuk menjadi teknologi utama dalam perlindungan tanaman masa depan.

Kata Kunci: RNA interference (RNAi); bioteknologi; pengendalian OPT; gene silencing; tanaman transgenik; SIGS; pertanian berkelanjutan.

Abstract

RNA interference (RNAi) technology is a breakthrough in modern biotechnology that offers a specific, effective, and environmentally friendly approach to controlling plant pests (Pests). Unlike chemical pesticides, which are broad-based and have negative environmental impacts, the RNAi approach works by inhibiting the expression of specific genes in target pests without affecting non-target organisms. This article presents a comprehensive, literature-based review of the mechanism of action of RNAi, the application of RNAi technology in various agricultural commodities, its effectiveness in suppressing Pest attacks, and the challenges and opportunities for its development as a critical component of sustainable agricultural systems. Through an analysis of previous research results, this article demonstrates that RNAi has great potential to become a key technology in future crop protection.

Keywords: RNA interference (RNAi); biotechnology; Pest control; gene silencing; transgenic plants; SIGS; sustainable agriculture

How to cite: Soumena, W., Sarjan, M., Fauzi, M. T., Permana, P.D. (2025). Teknologi RNA Interference (RNAi) Sebagai Inovasi Pengendalian OPT Ramah Lingkungan. *Journal of Multidisciplinary Science and Natural Resource Management*, 1(3), 18-28

1. Pendahuluan

Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) merupakan salah satu kendala utama dalam sistem produksi pertanian global, termasuk di Indonesia. Serangan hama serangga, patogen jamur, bakteri, dan virus terus dilaporkan menyebabkan kerugian besar pada berbagai komoditas pangan penting. Secara global, kerugian akibat OPT mencapai 20–40% setiap tahun dan tren ini meningkat seiring perubahan iklim serta intensifikasi pertanian (FAO, 2022). Hal ini menimbulkan ancaman serius terhadap ketahanan pangan terutama di negara-negara beriklim tropis. Penggunaan pestisida kimia telah menjadi pilihan utama dalam pengendalian OPT, tetapi efektivitasnya sering menurun dari tahun ke tahun. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang lebih aman, efektif, dan berkelanjutan (Kumar et al., 2019).

Pestisida kimia memang terbukti efektif dalam meningkatkan produksi pertanian, namun memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan. Penggunaan pestisida secara berlebihan dapat mencemari tanah, air, dan udara serta menyebabkan akumulasi residu berbahaya dalam jaringan tanaman (Pimentel & Burgess, 2014). Di Indonesia, laporan

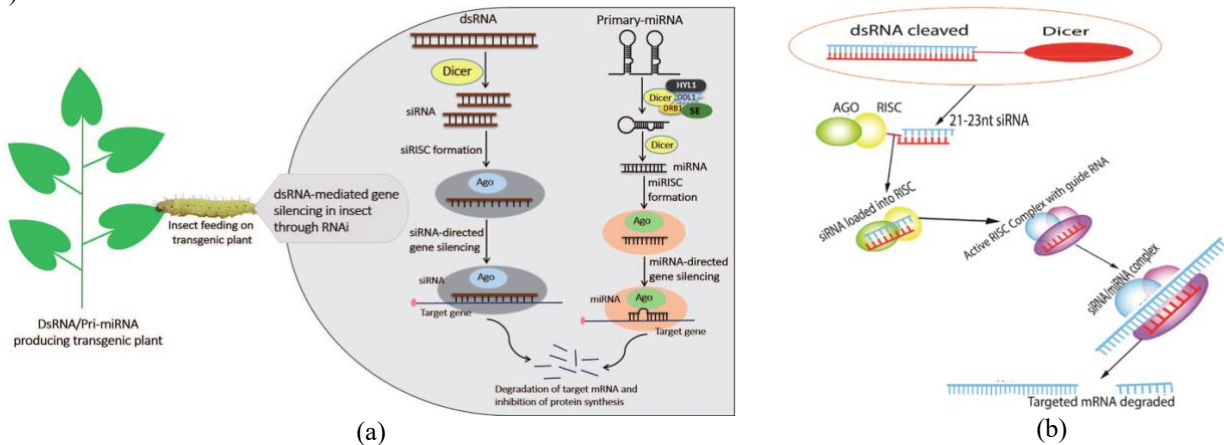
menunjukkan adanya peningkatan residu pestisida pada sayuran dan buah-buahan akibat aplikasi yang tidak sesuai prosedur (Tuhumury et al., 2012). Selain itu, pestisida berdampak buruk pada organisme non-target seperti lebah, parasitoid, dan mikroorganisme tanah. Karena risiko ekologis tersebut, pemerintah dan lembaga internasional mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan (WHO, 2021).

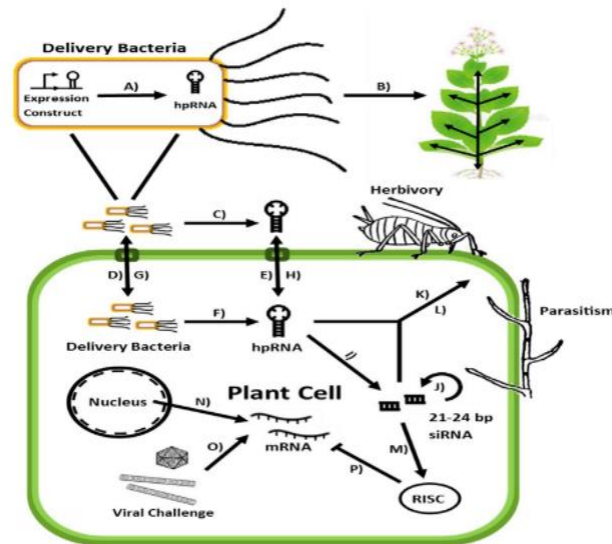
Penggunaan pestisida kimia dalam jangka panjang juga memicu resistensi pada hama, sehingga kemampuan pengendalian semakin menurun. Lebih dari 600 spesies serangga telah terdokumentasi mengalami resistensi terhadap insektisida sintesis, terutama golongan piretroid, organofosfat, dan karbamat (Sparks & Nauen, 2014). Resistensi menyebabkan petani meningkatkan dosis atau frekuensi aplikasi sehingga memperbesar biaya produksi. Di Indonesia, resistensi pada hama *Spodoptera litura* dan *Nilaparvata lugens* telah dilaporkan di berbagai daerah (Baehaki et al., 2016). Resistensi ini mempertegas perlunya metode pengendalian berbasis mekanisme biologis yang lebih presisi.

Perkembangan bioteknologi molekuler membuka peluang baru dalam pengendalian OPT, salah satunya melalui pemanfaatan teknologi RNA interference (RNAi). RNAi merupakan mekanisme alami yang bekerja melalui pemotongan mRNA target sehingga menekan ekspresi gen tertentu (Fire et al., 1998b). Teknologi ini menawarkan pengendalian yang sangat spesifik karena hanya menarget gen esensial pada hama atau patogen tanpa memengaruhi organisme non-target. Penelitian internasional menunjukkan bahwa RNAi dapat digunakan untuk mengatur pertumbuhan serangga, menghambat infeksi virus, dan menekan perkembangan jamur (Christiaens, Niu, et al., 2020). Teknologi ini dipandang sebagai kandidat ideal untuk sistem perlindungan tanaman yang lebih aman dan berkelanjutan.

Penerapan RNAi melalui tanaman transgenik menjadi salah satu strategi yang paling banyak diteliti dalam dua dekade terakhir. Tanaman transgenik yang mengekspresikan double-stranded RNA (dsRNA) mampu menekan ekspresi gen vital pada hama ketika dikonsumsi (Baum et al., 2007a). Contohnya, jagung transgenik yang menarget gen V-ATPase pada *Helicoverpa armigera* menghasilkan penurunan kerusakan tanaman yang signifikan. Pada tanaman kentang, ekspresi dsRNA terhadap virus PVY mampu meningkatkan ketahanannya secara substansial (Bally et al., 2016). Walau efektif, tanaman transgenik masih menimbulkan kekhawatiran terkait isu biosafety dan penerimaan publik, terutama di negara berkembang seperti Indonesia (Ulum, 2021).

Metode lain yang sedang berkembang pesat ialah spray-induced gene silencing (SIGS), yaitu penyemprotan dsRNA langsung pada daun tanaman. SIGS dianggap lebih fleksibel dan mudah diterima karena tidak melibatkan modifikasi genetik pada tanaman inang (Fletcher et al., 2020). Penelitian menunjukkan bahwa SIGS efektif dalam menekan penyakit jamur seperti *Botrytis cinerea* hingga 70% melalui penargetan gen esensial jamur. Teknologi ini juga telah diuji pada pengendalian hama serangga seperti *Bemisia tabaci* dengan hasil yang sangat menjanjikan (Spada et al., 2025). Tantangan terbesar SIGS terletak pada stabilitas dsRNA yang mudah terdegradasi oleh faktor lingkungan seperti enzim nuklease dan sinar UV (Cagliari et al., 2019).





(c)

Gambar 1 (a) Mekanisme Host-Induced Gene Silencing (HIGS); (b) Jalur Molekuler Silencing; (c) Metode Pengantaran (Delivery Methods)

RNAi terbukti sangat efektif dalam pengendalian berbagai hama serangga penting. Pada *Spodoptera frugiperda*, aplikasi dsRNA yang menarget gen esensial larva dapat menyebabkan gangguan perkembangan dan kematian (X. Liu et al., 2022). *Helicoverpa armigera* menunjukkan respons kuat terhadap dsRNA yang diarahkan pada gen pengatur metabolisme energi. Sementara itu, *Bemisia tabaci* mengalami penurunan populasi yang signifikan setelah paparan dsRNA melalui pakan (Upadhyay et al., 2011). Efektivitas ini memperkuat persepsi bahwa RNAi merupakan teknologi berpotensi besar untuk pertanian tropis.

Selain serangga, RNAi juga efektif untuk mengendalikan patogen jamur dan virus tanaman. Pendekatan Host-Induced Gene Silencing (HIGS) telah digunakan untuk meningkatkan ketahanan tanaman gandum terhadap *Fusarium graminearum* dengan tingkat penekanan infeksi hingga 80% (Koch et al., 2013). Pada tanaman hortikultura, HIGS mampu menghambat perkembangan penyakit hawar bakteri dan infeksi virus mosaik. Aplikasi RNAi pada nematoda parasit seperti *Meloidogyne incognita* juga menunjukkan hasil positif dengan penurunan infeksi akar secara signifikan (Ghag, 2017).

Namun, efektivitas RNAi sangat bergantung pada spesies target. Beberapa hama menunjukkan resistensi fisiologis alami terhadap RNAi karena adanya enzim RNase yang mendegradasi dsRNA sebelum mencapai sel target (Guan et al., 2018). Serangga dari ordo Lepidoptera memiliki pH saluran cerna yang sangat tinggi sehingga mempercepat degradasi dsRNA. Hal ini menyebabkan variabilitas respons antar spesies yang cukup signifikan. Tantangan ini memerlukan pendekatan formulasi yang lebih stabil, misalnya melalui nanopartikel atau enkapsulasi berbasis polimer (Yan et al., 2021).

Dari sisi regulasi, teknologi RNAi masih menghadapi berbagai hambatan dalam proses komersialisasi. Produk RNAi berbasis rekayasa genetika harus melalui penilaian biosafety yang ketat sebelum dapat dilepas ke pasar (Arpaia et al., 2020). Perbedaan regulasi antar negara juga memperlambat adopsi teknologi RNAi secara global. Negara-negara seperti Amerika Serikat dan Australia mulai mengembangkan pedoman khusus untuk biopestisida RNAi, sedangkan sebagian besar negara berkembang masih memasukkannya dalam kategori GMO. Tanpa harmonisasi regulasi, teknologi ini sulit diterapkan secara luas.

Di Indonesia, penelitian RNAi dalam pertanian masih berada pada tahap awal namun menunjukkan perkembangan positif. Beberapa universitas dan lembaga penelitian mulai mengeksplorasi penggunaan dsRNA untuk pengendalian penyakit tanaman tropis (Bonnu, 2025). Kendala utama yang dihadapi adalah keterbatasan fasilitas bioteknologi serta pendanaan riset yang belum optimal. Selain itu, pemahaman petani tentang teknologi ini juga masih rendah sehingga diperlukan program edukasi dan pelatihan. Jika dikembangkan dan didukung secara konsisten, RNAi dapat menjadi salah satu teknologi kunci bagi pertanian nasional.

Berdasarkan perkembangan tersebut, RNAi memiliki potensi besar sebagai inovasi strategis dalam sistem perlindungan tanaman berkelanjutan. Teknologi ini menawarkan pengendalian yang sangat spesifik, minim risiko ekologis, dan dapat dikombinasikan dengan pendekatan PHT modern (Zotti et al., 2018). Bukti ilmiah dari berbagai negara menunjukkan bahwa RNAi dapat menurunkan populasi OPT tanpa merusak organisme non-target dan lingkungan. Artikel ini disusun untuk mengkaji mekanisme kerja RNAi, efektivitasnya dalam pengendalian OPT, serta hambatan implementasinya di lapangan.

2. Metode

Penulisan artikel ini menggunakan pendekatan studi literatur (literature review) dengan menelaah berbagai penelitian ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal terindeks nasional maupun internasional. Sumber-sumber yang diambil berasal dari database seperti ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Scopus, Google Scholar, serta repository penelitian berbagai perguruan tinggi. Kriteria literatur yang digunakan adalah artikel yang diterbitkan dalam rentang waktu 2010–2024, dengan fokus pada aplikasi RNA interference dalam perlindungan tanaman.

Beberapa kata kunci yang digunakan dalam penelusuran literatur meliputi "RNA interference", "dsRNA", "gene silencing", "pest management", "insect RNAi", dan "plant protection biotechnology". Data dianalisis menggunakan pendekatan sintesis deskriptif, yaitu merangkum berbagai hasil penelitian kemudian membandingkan efektivitas, mekanisme kerja, serta potensi implementasi teknologi RNAi di lapangan.

Metode ini dipilih karena studi literatur memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan teknologi RNAi dari perspektif keilmuan yang telah teruji. Selain itu, pendekatan ini mampu menunjukkan tren penelitian terbaru dan potensi inovasi yang dapat dikembangkan lebih lanjut.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Mekanisme Dasar RNA Interference dalam Pengendalian OPT

RNA interference (RNAi) merupakan mekanisme regulasi ekspresi gen yang terjadi secara alami pada sel eukariot dan pertama kali ditemukan oleh (Fire et al., 1998a), yang kemudian memperoleh Nobel Prize atas kontribusinya. Mekanisme ini ditandai dengan keberadaan molekul double-stranded RNA (dsRNA) yang dipecah oleh enzim Dicer menjadi small interfering RNA (siRNA). Fragmen siRNA tersebut selanjutnya diintegrasikan ke dalam RNA-induced silencing complex (RISC) yang berfungsi mengenali mRNA komplementer dan memotongnya secara spesifik, sehingga proses translasi protein terhambat (Wilson & Doudna, 2018; Pratt & Macrae, 2010). Pada tataran molekuler, sistem ini merupakan komponen kunci dalam respons imun seluler terhadap virus serta berperan dalam homeostasis ekspresi gen.

Dalam aplikasi pengendalian hama pertanian, RNAi dimanfaatkan sebagai strategi penekanan ekspresi gen yang berperan dalam fungsi vital serangga target. dsRNA yang diberikan melalui tanaman rekayasa genetika, formulasi semprot, atau pakan akan memasuki sistem pencernaan serangga dan memicu silencing terhadap gen esensial, sehingga mengganggu fisiologi dan siklus hidup hama (Baum et al., 2007b; Burand & Hunter, 2012). Kekurangan ekspresi gen pada jalur metabolisme, regulasi hormon, atau perkembangan organ target menyebabkan penurunan laju makan, gangguan molting, deformasi, hingga kematian individu. Penelitian Christiaens, et al., (2020) menunjukkan bahwa RNAi mampu menghambat ekspresi gen vital pada serangga pengunyah seperti *Leptinotarsa decemlineata* dan serangga penghisap seperti *Bemisia tabaci*, yang menegaskan efektivitasnya dalam lintas ordo serangga.

Spesifisitas menjadi keunggulan utama dari pendekatan RNAi dalam pengendalian OPT. dsRNA hanya akan menghambat ekspresi gen yang memiliki kesepadanan urutan nukleotida, sehingga tidak menimbulkan efek samping pada organisme non-target seperti serangga penyerbuk, arthropoda predator, maupun mikroorganisme tanah (Scott et al., 2013 ; Romeis & Widmer, 2020). Hal ini menempatkan RNAi sebagai alternatif lebih aman dibandingkan pestisida kimia sintetis yang kerap menimbulkan resistensi, bioakumulasi, serta dampak ekologis berkepanjangan. Dengan demikian, RNAi tidak hanya berfungsi sebagai kontrol hama yang bersifat presisi tetapi juga mendukung prinsip pengelolaan OPT berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kemajuan teknologi formulasi turut meningkatkan potensi RNAi dalam sistem perlindungan tanaman. Inovasi seperti nanopartikel chitosan, liposome-based delivery, dan polymeric nanoparticles terbukti meningkatkan stabilitas dsRNA ketika diaplikasikan di lapang, serta memperpanjang masa paparan dalam sistem pencernaan serangga target (Joga et al., 2016 ; Kolliopoulou et al., 2017). Stabilitas molekul ini penting karena dsRNA rentan terdegradasi oleh enzim nuklease. Dengan efisiensi penyerapan yang semakin tinggi, teknologi ini diyakini mampu memperluas jangkauan RNAi tidak hanya pada serangga pengunyah tetapi juga kelompok hemiptera yang selama ini lebih sulit diinduksi RNAi.

Seiring meningkatnya resistensi hama terhadap insektisida konvensional, RNAi dipandang sebagai bagian dari era baru bioinsektisida berbasis molekuler yang presisi, minim residu, dan kompatibel dengan strategi pengelolaan hama terpadu (IPM). Integrasi RNAi dengan pendekatan ekologi lanskap, konservasi musuh alami, dan modifikasi biologi serangga memberikan prospek jangka panjang dalam menekan populasi OPT tanpa mengganggu keseimbangan ekosistem (Zotti et al., 2018 ; Christiaens, et al., 2020). Oleh karena itu, RNAi tidak sekadar menjadi solusi pengendalian teknis, tetapi juga pembuka arah baru rekayasa proteksi tanaman berbasis biologi molekuler.

3.2 Aplikasi RNAi pada Tanaman Transgenik

Pendekatan rekayasa genetika berbasis RNA interference (RNAi) merupakan salah satu strategi proteksi tanaman generasi ketiga yang memanfaatkan kemampuan sel tanaman untuk mengekspresikan molekul double-stranded RNA (dsRNA) secara endogen. Mekanisme ini memungkinkan tanaman memproduksi dsRNA spesifik terhadap gen esensial serangga target sehingga ketika jaringan tanaman dikonsumsi, dsRNA akan memasuki sistem pencernaan hama dan memicu silencing gen vital yang menghambat kelangsungan hidupnya (Baum et al., 2007a ; Koch & Kogel, 2014). Strategi ini menjadikan tanaman bukan sekadar objek pasif, tetapi sebagai agen pertahanan molekuler aktif yang mampu memicu respon pengendalian berbasis siRNA tanpa perlu intervensi pestisida eksternal.

Pengembangan tanaman transgenik berbasis RNAi telah diterapkan pada berbagai komoditas utama seperti jagung, kapas, kedelai, kentang, dan gandum. Tanaman rekayasa ini mengekspresikan dsRNA yang menarget gen tertentu dalam hama, termasuk gene silencing terhadap gen regulator pertumbuhan, enzim pencernaan, sistem transpor ion, dan jalur hormonal serangga (Kunte et al., 2019 ; Christiaens, Whyard, et al., 2020). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa ekspresi dsRNA dalam jaringan tanaman mampu menurunkan viabilitas, kemampuan makan, tingkat perkembangan, hingga keberhasilan reproduksi serangga. Hal ini menegaskan bahwa RNAi transgenik bukan hanya mengurangi populasi hama, tetapi juga menekan laju kerusakan ekonomi sekaligus meningkatkan stabilitas produktivitas jangka panjang.

Contoh aplikatif paling menonjol adalah pengembangan jagung transgenik yang mengekspresikan dsRNA terhadap gen V-ATPase pada *Helicoverpa armigera*, yang berperan dalam sistem transpor proton pada sel epitel usus serangga. Hasil

penelitian menunjukkan bahwa terdapat penurunan tajam intensitas serangan, tingkat konsumsi, dan persentase keberhasilan metamorfosis pada individu hama yang memakan jaringan tanaman tersebut dibandingkan varietas non-transgenik (Baum et al., 2007a). Penelitian lain oleh Xu et al., (2025) melaporkan bahwa RNAi transgenik pada jagung efektif menurunkan tingkat keberhasilan molting dan meningkatkan mortalitas larva *Spodoptera frugiperda*, sehingga memperkuat bukti bahwa penerapan RNAi lintas spesies serangga target tetap menunjukkan konsistensi efektivitas.

Efektivitas serupa juga ditemukan pada tanaman kentang transgenik yang mengekspresikan dsRNA terhadap kutu daun *Myzus persicae*, serangga penghisap yang menjadi vektor utama virus mosaik. Pitino & Hogenhout, (2013) menyatakan bahwa produksi dsRNA dalam jaringan kentang menyebabkan gangguan fungsi gen pengkode protein saliva penting bagi penetrasi stylet pada floem sehingga populasi serangga menurun signifikan dalam tiga siklus generasi. Selain itu, penelitian oleh Bhoi et al., (2022) menunjukkan bahwa sistem RNAi pada kentang tidak hanya menghambat feeding efficiency tetapi juga mengurangi tingkat transmisi virus, menegaskan potensi RNAi sebagai proteksi ganda: anti-hama dan anti-patogen.

Walaupun demikian, pengembangan tanaman transgenik berbasis RNAi masih menghadapi sejumlah hambatan regulasi dan sosial, seperti resistensi publik terhadap rekayasa genetika, penilaian risiko biosafety terhadap organisme non-target, serta ketidakseragaman kebijakan antarnegara (Carzoli et al., 2018 ; Arpaia et al., 2021). Isu tersebut mencakup potensi transfer horizontal dsRNA, dampak pada musuh alami, serta dinamika resistensi molekuler pada populasi serangga. Meski demikian, bukti ilmiah menunjukkan bahwa RNAi memiliki tingkat spesifisitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan pestisida kimia sehingga risiko ekologis relatif lebih rendah (Romeis & Widmer, 2020). Dengan demikian, tanaman transgenik RNAi dipandang sebagai komponen strategis dalam tata kelola pengendalian OPT berkelanjutan yang kompatibel dengan sistem pertanian modern, efisien, dan ekologis.

3.3 Spray-Induced Gene Silencing (SIGS) sebagai Alternatif Non-Transgenik

Spray-Induced Gene Silencing (SIGS) merupakan inovasi RNA interference (RNAi) generasi baru yang memungkinkan penghambatan ekspresi gen organisme pengganggu tanaman (OPT) melalui aplikasi eksogen dsRNA pada permukaan daun tanpa memerlukan rekayasa genetika tanaman. Teknologi ini memanfaatkan kemampuan molekul dsRNA atau siRNA untuk diserap melalui kutikula atau stomata dan selanjutnya memasuki jaringan tanaman maupun organisme target yang berinteraksi dengan tanaman tersebut (Basso et al., 2025; Dalakouras et al., 2020). SIGS dipandang sebagai pendekatan yang kompatibel dengan sistem perlindungan tanaman modern karena bersifat fleksibel, adaptif, serta dapat diintegrasikan dengan teknik konvensional dalam Pengendalian Hama Terpadu (PHT) tanpa memicu resistensi ekologis maupun konflik regulasi transgenik.

Berbagai studi menunjukkan bahwa SIGS mampu menekan serangan patogen tanaman dengan tingkat efektivitas tinggi. Menurut Chen et al., (2025) bahwa aplikasi dsRNA eksternal pada tanaman tomat menurunkan tingkat infeksi *Botrytis cinerea* sebesar 60–70% melalui mekanisme silencing terhadap gen vital patogen yang berperan dalam invasi jaringan tanaman. Temuan sejalan dilaporkan oleh Gebremichael et al., (2021) yang menunjukkan bahwa dsRNA yang ditargetkan pada gen *DCL1* dan *AGO* jamur *Fusarium graminearum* mampu menekan pertumbuhan miselium serta penurunan produksi toksin, menegaskan bahwa SIGS tidak hanya bertindak sebagai proteksi fisik tetapi juga intervensi molekuler terhadap proses patogenesis.

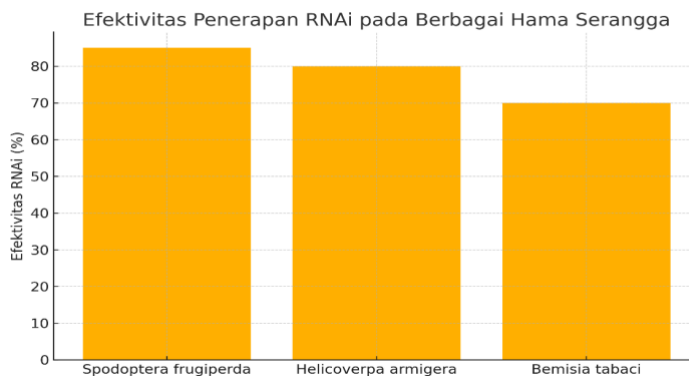
Selain efektif terhadap patogen, SIGS telah diaplikasikan pada berbagai spesies serangga herbivora utama. Penelitian (Li et al., 2024) menunjukkan bahwa dsRNA yang disemprotkan pada jaringan tanaman mampu mengganggu ekspresi gen vital pada *Spodoptera frugiperda* sehingga menurunkan feeding rate, viabilitas larva, serta keberhasilan metamorfosis. Pada *Bemisia tabaci*, dsRNA yang diarahkan pada gen sistem pencernaan dilaporkan meningkatkan mortalitas hingga 55% serta menurunkan kapasitas reproduktif populasi (Jain et al., 2019). Efektivitas lintas taksa ini menegaskan bahwa SIGS berpotensi menjadi platform bioinsektisida non-transgenik yang kompatibel dengan prinsip keamanan hayati.

Aplikasi SIGS juga memberikan keuntungan logistik yang signifikan, seperti kemudahan formulasi, kompatibilitas dengan teknologi penyemprotan pestisida konvensional, serta potensi penggunaan dalam rotasi pengendalian untuk menghindari resistensi. Molekul dsRNA dapat diformulasikan dalam bentuk cair, nanopartikel, atau coated polymers untuk meningkatkan penetrasi dan stabilitas terhadap degradasi lingkungan (Wang et al., 2023; Christiaens, Whyard, et al., 2020). Dengan demikian, SIGS dapat diaplikasikan sesuai kebutuhan musiman, outbreak tertentu, atau untuk perlindungan sementara yang tidak memerlukan ekspresi genetik permanen seperti pada sistem transgenik.

Namun demikian, kendala teknis SIGS masih menjadi fokus utama penelitian, antara lain ketahanan dsRNA terhadap degradasi oleh UV, RNase lingkungan, serta keterbatasan absorpsi molekul pada daun atau kutikula serangga (Rank & Koch, 2021). Biaya produksi dsRNA skala besar juga masih relatif tinggi meskipun kemajuan fermentasi mikroba dan teknologi sintesis enzimatis dilaporkan mampu menurunkan biaya secara gradual (Cagliari et al., 2019). Selain itu, penelitian masih diarahkan pada optimalisasi nanoparticle carriers seperti chitosan, clay nanosheets (*BioClay*), dan lipid nanocapsules untuk memperpanjang umur simpan dan meningkatkan efisiensi penyerapan dsRNA oleh organisme target (Mitter et al., 2017 ; Sun et al., 2023). Dengan terus berkembangnya formulasi dan teknologi delivery, SIGS berpotensi menjadi pilar utama biointervensi RNAi non-transgenik yang aplikatif di berbagai sistem budidaya.

3.4 Efektivitas RNAi terhadap Berbagai Kelompok OPT

Teknologi RNA interference (RNAi) telah menunjukkan efektivitas yang luas dalam pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT), mulai dari serangga herbivora, nematoda parasit, patogen virus, hingga kelompok cendawan fitopatogen. Mekanisme fundamental RNAi bekerja melalui penghambatan transkripsi dan translasi gen esensial pada OPT setelah paparan dsRNA atau siRNA eksogen maupun endogen. Berbagai penelitian menunjukkan pola respons yang berbeda antar kelompok organisme terkait absorpsi dsRNA, sensitivitas komponen RISC, serta kemampuan degradasi dsRNA oleh enzim nuklease internal (Baum et al., 2007a ; Koch & Kogel, 2014). Variabilitas fisiologis inilah yang menyebabkan efektivitas RNAi tidak selalu seragam pada setiap spesies target.



Gambar 2. Grafik Efektivitas RNAi (%)

Pada kelompok serangga, efektivitas RNAi tertinggi ditemukan pada ordo *Coleoptera*, yang memiliki integrasi sistemik dsRNA cukup stabil dalam hemolimfa serta rendahnya tingkat aktivitas dsRNase dalam usus. Penelitian Christiaens, Whyard, et al., 2020 dan S. Liu et al., (2019) menyatakan bahwa aplikasi dsRNA pada *Diabrotica virgifera virgifera* menghasilkan tingkat mortalitas mencapai 90% dalam 48 jam, menurunkan efisiensi makan, serta menghambat keberhasilan molting. Sebaliknya, kelompok *Lepidoptera* menunjukkan respons yang lebih rendah karena tingginya aktivitas enzim dsRNase dalam lumen usus sehingga menyebabkan degradasi cepat dsRNA (Shukla et al., 2016). Perbedaan fisiologis tersebut mempertegas bahwa keberhasilan RNAi bergantung pada karakteristik internal spesies target.

Pada kelompok nematoda, terutama nematoda parasit tanaman seperti *Meloidogyne incognita* dan *Heterodera glycines*, RNAi diaplikasikan melalui host-induced gene silencing (HIGS), yaitu ekspresi dsRNA oleh tanaman inang yang kemudian diserap melalui stylet selama proses feeding. Penelitian Siddique & Grundler, (2018) menunjukkan bahwa ekspresi dsRNA terhadap gen efektor nematoda mampu menurunkan infeksi hingga 60–80% pada kacang-kacangan. Efisiensi RNAi pada nematoda parasit umumnya stabil karena spesies ini bergantung pada sistem penghisapan floem, yang memudahkan transfer dsRNA dari inang menuju kanal pencernaan nematoda.

Dalam konteks patogen virus, RNAi berperan menghambat replikasi virus dengan cara menarget RNA genom atau RNA replikasi virus melalui pembentukan virus-derived siRNA (vsiRNA). Prinsip ini digunakan dalam rekayasa tanaman tahan virus seperti Tobacco mosaic virus (TMV), Potato virus Y (PVY), dan Rice tungro bacilliform virus (RTBV), yang menunjukkan penurunan intensitas gejala infeksi serta tingkat akumulasi partikel virus pada jaringan tanaman (Hui & Huishan, 2012). Secara molekuler, vsiRNA yang dihasilkan tanaman mampu menetralkan kemampuan virus memasuki fase proliferasi replikasi dan translasi protein kapsid.

Tabel 1 Perbandingan Efektivitas RNAi pada Berbagai Kelompok OPT

Kelompok OPT	Contoh Spesies Target	Metode Aplikasi RNAi	Tingkat Respons	Faktor Penentu Efektivitas	Sumber
Serangga (Coleoptera)	<i>Diabrotica virgifera</i>	Oral dsRNA, transgenik	Sangat tinggi ($\approx 90\%$)	Aktivitas dsRNase rendah, transport sistemik dsRNA stabil	Zhu & Palli, (2020), Baum et al. (2007) <i>Science</i>
Serangga (Lepidoptera)	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Oral, SIGS	Sedang–rendah (20–50%)	Degradasi dsRNA tinggi dalam lumen usus	Shukla et al. (2016) <i>Pest Management Science</i> ; Christiaens et al. (2020) <i>Annual Review of Entomology</i> ; Zhu & Palli, (2020), <i>Mechanisms, Applications, and Challenges of Insect RNA Interference</i>
Nematoda parasit	<i>Meloidogyne incognita</i>	HIGS	Tinggi (60–80%)	Transfer dsRNA melalui feeding stylet	Kyndt et al. (2013) <i>PNAS</i> ; Dutta et al. (2015) <i>Frontiers in Plant Science</i> ; Ibrahim et al. (2020) <i>Nematology</i>

Virus tanaman	TMV, PVY	vsRNA, HIGS	Sangat tinggi	Pemotongan RNA genom virus oleh Dicer	Baulcombe (2015) <i>Phil. Trans. Royal Soc. B</i> ; Praveen et al. (2020) <i>Plant Science</i> ; Tenllado & Díaz-Ruiz (2001) <i>Virology</i>
Jamur fitopatogen	<i>Botrytis cinerea</i>	SIGS, dsRNA topical	Sedang (40–70%)	Penetrasi dsRNA terbatas, degradasi RNase tinggi	Wang et al. (2022) <i>Molecular Plant Pathology</i> ; Koch et al. (2016) <i>Plant Physiology</i> ; Mitter et al. (2017) <i>Nature Plants</i>

Respons RNAi pada kelompok jamur (fungi) cukup bervariasi. Beberapa penelitian melaporkan respons positif pada *Botrytis cinerea* dan *Fusarium graminearum*, terutama ketika dsRNA diaplikasikan melalui Spray-Induced Gene Silencing (SIGS) (Wang et al., 2023). Namun, sebagian besar cendawan memiliki dinding sel kompleks berbasis kitin dan glukukan yang membatasi efisiensi penetrasi dsRNA. Selain itu, keberadaan enzim RNase permukaan juga mempercepat degradasi molekul RNA, sehingga formulasi delivery seperti nanopartikel atau BioClay diperlukan untuk meningkatkan efektivitasnya (Mitter et al., 2017).

3.5 Prospek RNAi dalam Sistem Pertanian Berkelanjutan

RNA interference (RNAi) dipandang sebagai salah satu inovasi molekuler kunci dalam pengembangan sistem pertanian berkelanjutan karena memiliki tingkat spesifisitas gen yang tinggi, tidak meninggalkan residu toksik, dan mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia sintetis. Teknologi ini bekerja dengan menarget gen vital OPT sehingga menghambat proses fisiologis tanpa memicu efek toksisitas bagi organisme non-target, manusia, dan lingkungan (Zotti & Smagghe, 2015; Christiaens et al., 2022). Dibandingkan pestisida konvensional yang menimbulkan resistensi, bioakumulasi, serta kontaminasi akuatik, RNAi memberikan pendekatan presisi tinggi sesuai prinsip *ecological intensification* dimana intervensi pengendalian dilakukan tanpa merusak ekosistem penunjang produksi.

Integrasi RNAi dalam Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) juga menawarkan prospek strategis dalam menekan ledakan populasi hama dengan tetap mempertahankan keberlanjutan produksi tanaman. Berbagai studi menunjukkan bahwa RNAi dapat diimplementasikan secara kombinatorial dengan agen hayati seperti parasitoid, predator, dan entomopatogen tanpa menimbulkan antagonisme ekologis sebagaimana yang terjadi pada insektisida sintetis (Scott et al., 2013; Lundgren & Duan, 2013). Pendekatan ini secara ilmiah sejalan dengan konsep *biological buffering*, di mana keseimbangan populasi hama dikendalikan melalui interferensi molekuler tanpa mengganggu interaksi trofik pada ekosistem agro.

Lebih jauh, RNAi mendukung sistem pertanian rendah residu (*low-chemical input agriculture*) karena dsRNA yang digunakan tidak stabil secara ekologis dan cepat terdegradasi menjadi nukleotida alami di tanah dan air (Cagliari et al., 2019). Hal ini menghilangkan risiko bioakumulasi dan pencemaran biomagnifikasi yang umum ditemui pada insektisida organofosfat dan piretroid. Pengurangan input kimia di lahan pertanian juga meningkatkan kualitas tanah, menjaga kelimpahan mikroba tanah, serta mencegah kerusakan ekosistem akuatik akibat limpasan pestisida (Romeis et al., 2020).

Di sisi lain, RNAi berpotensi memperkuat ketahanan pangan global melalui peningkatan produktivitas tanaman tanpa mempersempit ruang ekologi organisme penyerbuk dan musuh alami. Teknologi RNAi tidak menunjukkan interferensi terhadap *Apis mellifera*, *Harmonia axyridis*, serta predator utama lainnya karena dsRNA bersifat sangat spesifik pada sekuens gen target (Romeis et al., 2020 ; Christiaens et al., 2022). Hal ini menegaskan bahwa pengendalian OPT berbasis RNAi tidak hanya bertujuan menekan kerugian ekonomi tanaman, tetapi juga memelihara integritas keanekaragaman hayati dalam lanskap pertanian.

Tabel 2 Peran RNAi dalam Pertanian Berkelanjutan

Aspek Keberlanjutan	Kontribusi RNAi	Literatur Pendukung
Lingkungan	Minim residu, degradasi cepat, non-toksik	Cagliari et al. (2019), Romeis et al. (2020)
Ekologi	Tidak mengganggu musuh alami & penyerbuk	Scott et al. (2013)
Ekonomi	Menekan biaya kerugian panen, efektivitas tinggi	Baum et al. (2019), Christiaens et al. (2022)
Sosial & keamanan pangan	Mengurangi residu pestisida dalam hasil panen	Lundgren & Duan (2019), Zotti & Smagghe (2015)
IPM / PHT	Kompatibel dengan biopestisida dan tanaman tahan hama	Koch & Kogel (2014), Christiaens et al. (2022)

3.6 Tantangan Implementasi RNAi dalam Pengendalian OPT

Hambatan utama dalam penerapan RNA interference (RNAi) pada pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) adalah variasi fisiologis dan biokimia antargenus serangga yang menyebabkan perbedaan respon silencing gen. Menurut Kebede & Fite, (2022) bahwa sejumlah spesies dalam ordo Lepidoptera menunjukkan aktivitas enzim ribonuklease (dsRNase) yang jauh lebih tinggi dibandingkan kelompok Coleoptera, sehingga molekul dsRNA mengalami degradasi cepat sebelum mencapai hemolimfa dan menjalankan proses pemotongan mRNA target. Kondisi ini berimplikasi pada rendahnya bioavailabilitas dsRNA dan menghambat pembentukan kompleks RNA-induced silencing complex (RISC), menyebabkan mekanisme silencing gen menjadi tidak optimal (Terenius et al., 2011; Mehlhorn et al., 2021). Dengan demikian, sensitivitas RNAi bukan hanya ditentukan oleh desain sekuens dsRNA, namun juga proteksi molekul terhadap degradasi enzimatik pada saluran cerna serangga.

Selain faktor enzimatik, struktur kutikula dan mekanisme absorpsi seluler turut menentukan keberhasilan RNAi lintas spesies hama. Shukla et al. (2016) menemukan bahwa spesies Lepidoptera memiliki lapisan peritrofik yang lebih tebal serta

tingkat permeabilitas membran usus yang rendah terhadap molekul polianionik seperti dsRNA. Fenomena ini berbeda dengan Coleoptera yang memiliki sistem absorpsi dsRNA lebih efisien dan minim hambatan transpor epitel. Penelitian Joga et al., (2016) menegaskan bahwa hambatan struktural tersebut mengurangi akuisisi dsRNA oleh saluran pencernaan sehingga jumlah siRNA yang sampai ke jaringan target menjadi tidak memadai untuk memicu silencing gen sistemik. Faktor ini menjelaskan mengapa efektivitas RNAi antargenus serangga tidak dapat diseragamkan, meskipun menggunakan konsentrasi dsRNA yang identik.

Selain hambatan fisiologi serangga, stabilitas lingkungan dsRNA juga menjadi tantangan penerapan RNAi. Degradasi dsRNA oleh paparan ultraviolet (UV), fluktuasi pH, serta adanya RNase di permukaan daun dan air irigasi memperpendek durasi aktif molekul dalam lingkungan (Mehlhorn et al., 2021). Penurunan stabilitas ini menurunkan peluang serangga target terpapar dsRNA dalam jangka waktu yang memadai. Christiaens, Whyard, et al., (2020) menekankan bahwa degradasi pra-absorpsi merupakan sumber utama kegagalan RNAi eksogen di lapang, terutama pada aplikasi Spray-Induced Gene Silencing (SIGS). Oleh karena itu, penyempurnaan sistem proteksi molekuler dsRNA menjadi fokus utama rekayasa delivery pada bioinsektisida RNAi generasi terbaru.

Seiring kemajuan teknologi material dan biologi molekuler, berbagai upaya rekayasa formulasi dsRNA dikembangkan untuk mengatasi resistensi fisiologis dan degradasi lingkungan. Yan et al. (2021) melaporkan bahwa penggunaan nanocarrier berbasis polimer, chitosan, dan lipid nanoparticle mampu meningkatkan penetrasi dsRNA hingga 3–5 kali lipat, memperpanjang masa aktif molekul pada sistem pencernaan serangga, serta menurunkan laju degradasi oleh dsRNase. Inovasi lain seperti *BioClay* (Mitter et al., 2017), modifikasi kimia ujung nukleotida, serta desain long duplex dsRNA berukuran >400 bp dilaporkan mampu meningkatkan persistensi, efisiensi uptake, dan keberhasilan silencing gen. Dengan penguatan rekayasa formulasi ini, prospek RNAi dalam perlindungan tanaman dipandang semakin kompatibel dengan kebutuhan lapangan dan kompleksitas biologi serangga target.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur, teknologi RNA interference (RNAi) dapat dikategorikan sebagai inovasi strategis dalam pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) yang menawarkan mekanisme pengendalian bersifat spesifik, efektif, dan ramah lingkungan. RNAi mampu menekan ekspresi gen esensial pada hama dan patogen melalui proses gene silencing, sehingga mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia serta meminimalkan dampak ekologis terhadap organisme non-target. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa RNAi efektif dalam mengendalikan kelompok hama serangga, patogen jamur, virus, dan nematoda baik melalui pendekatan tanaman transgenik maupun metode SIGS. Namun demikian, keberhasilan RNAi masih menghadapi hambatan biologis seperti degradasi dsRNA dalam tubuh hama, resistensi fisiologis antar spesies, serta keterbatasan stabilitas dan efisiensi penyampaian molekul dsRNA. Di samping aspek teknis, tantangan regulasi, penerimaan publik, serta kesiapan infrastruktur penelitian di negara berkembang juga menjadi faktor penghambat implementasi teknologi ini secara luas. Dengan demikian, RNAi berpotensi besar menjadi komponen utama dalam sistem perlindungan tanaman berkelanjutan apabila didukung oleh penguatan riset, regulasi, dan penerapan terpadu di tingkat budidaya.

5. Saran

Sehubungan dengan temuan tersebut, diperlukan upaya penguatan riset yang berfokus pada peningkatan stabilitas dan efektivitas dsRNA melalui formulasi biodegradasi lambat, enkapsulasi, serta dukungan nanoteknologi agar proses penyerapan oleh OPT lebih optimal. Pemerintah dan lembaga regulasi perlu menyusun pedoman biosafety dan regulasi teknis yang terstruktur untuk mendorong adopsi RNAi tanpa menimbulkan ketidakpastian kebijakan, terutama terkait diferensiasi produk transgenik dan non-transgenik. Selanjutnya, kapasitas laboratorium bioteknologi nasional perlu ditingkatkan melalui pendanaan riset, pelatihan teknis, dan kolaborasi internasional guna mempercepat pengembangan RNAi sebagai biopestisida modern. Selain itu, edukasi berkelanjutan kepada petani dan penyuluh menjadi hal esensial agar teknologi RNAi dapat diterapkan secara praktis dan diterima di tingkat budidaya lapangan. Integrasi RNAi dalam program Pengendalian Hama Terpadu (PHT) direkomendasikan sebagai strategi jangka panjang karena mampu mendukung sistem produksi pertanian yang berkelanjutan, aman, dan berbasis prinsip ekologi.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Mataram atas fasilitas riset yang tentu digunakan dalam penelitian ini.

Pertimbangan Etika

Tidak perlu

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan

Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan dana apapun

Pernyataan penggunaan AI Generatif

Penulis tidak menggunakan Generative AI dalam menulis artikel ini

References

- Arpaia, S., Christiaens, O., Giddings, K., Jones, H., Mezzetti, B., Moronta-barrios, F., Perry, J. N., Sweet, J. B., Taning, C. N. T., Smagghe, G., & Dietz-pfeilstetter, A. (2020). *Biosafety of GM Crop Plants Expressing dsRNA : Data Requirements and EU Regulatory Considerations*. 11(June), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00940>
- Arpaia, S., Christiaens, O., Krogh, P. H., Kimberly, M., & Sweet, J. (2021). *Environmental Safety Assessment of Plants Expressing RNAi for Pest Control*. 117–130. <https://doi.org/10.1079/9781789248890.0012>
- Bachaki, Iswanto, E. H., & Munawar, D. (2016). *Resistensi Wereng Cokelat terhadap Insektisida yang Beredar di Sentra Produksi Padi Brown Planthopper Resistance to Insecticides Marketed in the*. 99–108.
- Bally, J., McIntyre, G. J., Doran, R. L., Lee, K., Perez, A., Jung, H., Naim, F., Larrinua, I. M., Narva, K. E., & Waterhouse, P. M. (2016). *In-Plant Protection against Helicoverpa armigera by Production of Long hpRNA in Chloroplasts*. 7(September), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01453>
- Basso, M. F., David, D., Vásquez, N., Campos-pinto, E. R., Pinheiro, D. H., Cruz, B., Maktura, G. C., Guidelli, G. V., Marques-souza, H., & Grossi-de-sa, M. F. (2025). *Progress and Opportunities of In Planta and Topical RNAi for the Biotechnological Control of Agricultural Pests*. Figure 1.
- Baum, J. A., Bogaert, T., Clinton, W., Heck, G. R., Feldmann, P., Ilagan, O., Johnson, S., Plaetinck, G., Munyikwa, T., Pleau, M., Vaughn, T., & Roberts, J. (2007a). *Control of coleopteran insect pests through RNA interference*. 25(11), 1322–1326. <https://doi.org/10.1038/nbt1359>
- Baum, J. A., Bogaert, T., Clinton, W., Heck, G. R., Feldmann, P., Ilagan, O., Johnson, S., Plaetinck, G., Munyikwa, T., Pleau, M., Vaughn, T., & Roberts, J. (2007b). *Control of coleopteran insect pests through RNA interference*. *Nature Biotechnology*, 25(11), 1322–1326. <https://doi.org/10.1038/nbt1359>
- Bhoi, T. K., Samal, I., Majhi, P. K., Saini, V., Raj, M. N., & Ahmad, M. A. (2022). *Insight into aphid mediated Potato Virus Y transmission : A molecular to bioinformatics prospective*.
- Bonnu, C. H. (2025). *BAGI KETAHANAN PANGAN INDONESIA (Sebuah Tinjauan Literatur)*. 2045(105).
- Burand, J. P., & Hunter, W. B. (2012). RNAi : Future in insect management. *JOURNAL OF INVERTEBRATE PATHOLOGY*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2012.07.012>
- Cagliari, D., Dias, N. P., Galdeano, D. M., Santos, E. Á. dos, Smagghe, G., & Zotti, M. J. (2019). *Management of Pest Insects and Plant Diseases by Non- Transformative RNAi*. 10(October). <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01319>
- Carzoli, A. K., Aboobucker, S. I., Sandall, L. L., & Lübberstedt, T. T. (2018). *Risks and opportunities of GM crops : Bt maize example*. 19(August), 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.10.004>
- Chen, C., Imran, M., Feng, X., Shen, X., & Sun, Z. (2025). *Spray-induced gene silencing for crop protection : recent advances and emerging trends*. February, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1527944>
- Christiaens, O., Niu, J., & Taning, C. N. T. (2020). *RNAi in Insects : A Revolution in Fundamental Research and Pest Control Applications*. 1–6.
- Christiaens, O., Whyard, S., Vélez, A. M., & Smagghe, G. (2020). *Double-Stranded RNA Technology to Control Insect Pests : Current Status and Challenges*. 11(April), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00451>
- Dalakouras, A., Wassenegger, M., Dadami, E., & Ganopoulos, I. (2020). *Genetically Modified Organism-Free RNA Interference : Exogenous Application of RNA Molecules in Plants I [OPEN]*. 182(January), 38–50. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00570>
- FAO. (2022). *The state of food security and nutrition in the world 2022: Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable*. Food & Agriculture Org.
- Fire, A., Xu, S., Montgomery, M. K., Kostas, S. A., Driver, S. E., & Mello, C. C. (1998a). *letters to nature*. 391(February), 806–811.
- Fire, A., Xu, S., Montgomery, M. K., Kostas, S. A., Driver, S. E., & Mello, C. C. (1998b). *Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in Caenorhabditis elegans*. *Nature*, 391(6669), 806–811. <https://doi.org/10.1038/35888>
- Fletcher, S. J., Reeves, P. T., Hoang, B. T., & Mitter, N. (2020). *A Perspective on RNAi-Based Biopesticides*. 11(February), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00051>
- Gebremichael, D. E., Haile, Z. M., Negrini, F., Sabbadini, S., Capriotti, L., Mezzetti, B., & Baraldi, E. (2021). *RNA Interference Strategies for Future Management of Plant Pathogenic Fungi : Prospects and Challenges*. 1–21.
- Ghag, S. B. (2017). *Host induced gene silencing, an emerging science to engineer crop resistance against harmful plant pathogens*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.10.003>
- Guan, R., Li, H., Fan, Y., Hu, S., Christiaens, O., Smagghe, G., & Miao, X. (2018). *cro A nuclease specific to lepidopteran insects suppresses RNAi*. 293, 6011–6021. <https://doi.org/10.1074/jbc.RA117.001553>

- Hui, Z. H. U., & Huishan, G. U. O. (2012). *The role of virus-derived small interfering RNAs in RNA silencing in plants*. 55(2), 119–125. <https://doi.org/10.1007/s11427-012-4281-3>
- Jain, R. G., Robinson, K., & Mitter, N. (2019). *RNAi-Mediated Management of Whitefly Bemisia tabaci by Oral Delivery of Double-stranded RNAs*. 3390. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019036011>
- Joga, M. R., Zotti, M. J., Smagghe, G., & Christiaens, O. (2016). *RNAi Efficiency, Systemic Properties, and Novel Delivery Methods for Pest Insect Control: What We Know So Far*. 7(November), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00553>
- Kebede, M., & Fite, T. (2022). *RNA interference (RNAi) applications to the management of fall armyworm, Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae): Its current trends and future prospects*. September, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2022.944774>
- Koch, A., & Kogel, K. (2014). *New wind in the sails: improving the agronomic value of crop plants through RNAi-mediated gene silencing*. 1–11. <https://doi.org/10.1111/pbi.12226>
- Koch, A., Kumar, N., Weber, L., Keller, H., Imani, J., & Kogel, K. (2013). *Host-induced gene silencing of cytochrome P450 lanosterol C14 α -demethylase – encoding genes confers strong resistance to Fusarium species*. 110(48), 19324–19329. <https://doi.org/10.1073/pnas.1306373110>
- Kolliopoulou, A., Taning, C. N. T., Smagghe, G., & Swevers, L. (2017). *Viral Delivery of dsRNA for Control of Insect Agricultural Pests and Vectors of Human Disease: Prospects and Challenges*. 8(June), 1–24. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00399>
- Kumar, R., Carroll, C., Hartikainen, A., & Martin, O. (2019). *ArviZ a unified library for exploratory analysis of Bayesian models in Python*. <https://doi.org/10.21105/joss.01143>
- Kunte, N., McGraw, E., Bell, S., & Avila, L. (2019). *Prospects, challenges and current status of RNAi through insect feeding*. July. <https://doi.org/10.1002/ps.5588>
- Li, N., Xu, X., Li, J., Hull, J. J., Chen, L., & Liang, G. (2024). *A spray-induced gene silencing strategy for Spodoptera frugiperda oviposition inhibition using nanomaterial-encapsulated dsEcR*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281(Pt 4), 136503. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136503>
- Liu, S., Jaouannet, M., Dempsey, D. M. A., Imani, J., Coustau, C., & Kogel, K. (2019). *Journal of Biotechnology Advances*, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107463>
- Liu, X., Wang, S., Yu, Y., Cheng, Y., Hu, C., Zhou, M., Li, C., & Tang, B. (2022). *Effects of Inhibiting the Expression of Chitin Synthase Gene SfCHSB on the Metabolism of Trehalose and Chitin in Spodoptera frugiperda Larvae*.
- Lundgren, J. G., & Duan, J. J. (2013). *RNAi-Based Insecticidal Crops: Potential Effects on Nontarget Species*. 63(8), 657–665. <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.8.8>
- Mehlhorn, S., Hunnekuhl, V. S., Geibel, S., Nauen, R., & Bucher, G. (2021). *Establishing RNAi for basic research and pest control and identification of the most efficient target genes for pest control: a brief guide*. *Frontiers in Zoology*, 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12983-021-00444-7>
- Mitter, N., Worrall, E. A., Robinson, K. E., Li, P., Jain, R. G., Taochy, C., Fletcher, S. J., Carroll, B. J., Lu, G. Q. M., & Xu, Z. P. (2017). *sustained protection against plant viruses*. *Nature Plants*, 16207(January). <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.207>
- Pimentel, D., & Burgess, M. (2014). *An Environmental, Energetic and Economic Comparison of Organic and Conventional Farming Systems*. In D. Pimentel & R. Peshin (Eds.), *Integrated Pest Management: Pesticide Problems, Vol.3* (pp. 141–166). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7796-5_6
- Pitino, M., & Hogenhout, S. A. (2013). *Aphid Protein Effectors Promote Aphid Colonization in a Plant Species-Specific Manner*. 26(1), 130–139.
- Pratt, A. J., & Macrae, I. J. (2010). *The RNA-induced Silencing Complex: A Versatile Gene-silencing Machine*. 284(27), 17897–17901. <https://doi.org/10.1074/jbc.R900012200>
- Rank, A. P., & Koch, A. (2021). *Lab-to-Field Transition of RNA Spray Applications – How Far Are We?* 12(October). <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.755203>
- Romeis, J., & Widmer, F. (2020). *Assessing the Risks of Topically Applied dsRNA-Based Products to Non-target Arthropods*. 11(June), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00679>
- Scott, J. G., Michel, K., Bartholomay, L. C., Siegfried, B. D., Hunter, W. B., Smagghe, G., Yan, K., & Douglas, A. E. (2013). *Towards the elements of successful insect RNAi*. *Journal of Insect Physiology*, 59(12), 1212–1221. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2013.08.014>
- Shukla, J. N., Kalsi, M., Sethi, A., Narva, K. E., Singh, S., Mogilicherla, K., & Palli, S. R. (2016). *Reduced stability and intracellular transport of dsRNA contribute to poor RNAi response in lepidopteran insects*. 6286(June). <https://doi.org/10.1080/15476286.2016.1191728>
- Siddique, S., & Grundler, F. M. W. (2018). *ScienceDirect Parasitic nematodes manipulate plant development to establish feeding*.

sites. *Current Opinion in Microbiology*, 46, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2018.09.004>

Spada, M., Pugliesi, C., Fambrini, M., Palpacelli, D., Caneo, A., & Pecchia, S. (2025). *Spray-Induced Gene Silencing (SIGS): Nanocarrier-Mediated dsRNA Delivery Improves RNAi Efficiency in the Management of Lettuce Gray Mold Caused by Botrytis cinerea*. 1–20.

Sparks, T. C., & Nauen, R. (2014). management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.11.014>

Sun, H., Kalluri, A., Tang, D., Ding, J., Zhai, L., Gu, X., & Li, Y. (2023). *Engineered dsRNA-protein nanoparticles for effective long-distance transport, delivery and gene silencing in plants*.

Terenius, O., Papanicolaou, A., Garbutt, J. S., Eleftherianos, I., Huvenne, H., Kanginakudru, S., Albrechtsen, M., An, C., Aymeric, J., Barthel, A., Collinge, D. P., Bebas, P., Bitra, K., Bravo, A., Crava, C. M., Maagd, R. A. De, Duvic, B., Erlandson, M., Faye, I., ... Smagghe, G. (2011). *RNA interference in Lepidoptera: An overview of successful and unsuccessful studies and implications for experimental design*. 57, 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2010.11.006>

Tuhumury, G. N. C., Leatemala, J. A., & Hasinu, R. Y. R. J. V. (2012). *PESTICIDE RESIDUE ON FRESH VEGETABLES IN AMBON CITY*. 1(2), 99–105.

Ulum, M. B. (2021). *REGULATING BIOSAFETY OF GENETICALLY MODIFIED CROPS IN INDONESIA: LIMITS AND CHALLENGES*. 1(1), 157–177.

Upadhyay, S. K., CHANDRASHEKAR, K., THAKUR, N., & VERMA, P. C. (2011). *RNA interference for the control of whiteflies (Bemisia tabaci) by oral route*. 36(March), 153–161. <https://doi.org/10.1007/s12038-011-9009-1>

Wang, Y., Yan, Q., Lan, C., Tang, T., Wang, K., Shen, J., & Niu, D. (2023). Nanoparticle carriers enhance RNA stability and uptake efficiency and prolong the protection against Rhizoctonia solani. *Phytopathology Research*, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s42483-023-00157-1>

WHO. (2021). *Managing pesticides in agriculture and public health A compendium of FAO and WHO guidelines and other resources*.

Wilson, R., & Doudna, J. A. (2018). *HHS Public Access*. 217–239. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-083012-130404>.Molecular

Xu, Q., Yu, Y., Li, W., Wang, X., Wu, X., Liu, Q., & Ren, Y. (2025). RNAi-Induced Disruption of Spodoptera frugiperda Life Cycle Using shRNA-Cell-Penetrating Poly(disulfide) Nanocarriers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c04511>

Yan, S., Ren, B., & Shen, J. (2021). *Nanoparticle-mediated double-stranded RNA delivery system: a promising approach for sustainable pest management*. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12822>.This

Zhu, K. Y., & Palli, S. R. (2020). *Mechanisms, Applications, and Challenges of Insect RNA Interference*. 293–311.

Zotti, M., Cagliari, D., Christiaens, O., Nji, C., Taning, T., Smagghe, G., Entomology, M., & Entomology, M. (2018). *RNAi technology in crop protection against arthropod pests, pathogens and nematodes*.