

Book Chapter Health Science Series



Chapter 2 Pengendalian Vektor



Penerbit



HS Udinus

Health Sains Udinus



Book Chapter Health Series – Chapter 2

Pengendalian Vektor

Editor

Suharyo, M.Kes

Reviewer

Dr. Nurjanah, M.Kes

Dr. Eti Rimawati, M.Kes

Dr. dr. Zaenal Sugiyanto, M.Kes

Dr. Adian Khoironi ST, M.Si

Dr. Poerna Sri Oetari, S.Si, M.Si.Ling

Dr. Eni Mahawati, M.Kes

Dr. Drs. Slamet Isworo, M.Kes

Dr. MG Catur Yuantari, SKM, M.Kes

Dr. Supriyono Asfawi S.E, M.Kes

Dr. Respati Wulandari, M.Kes

Desain Sampul

Puput Nur Fajri, S.KM

Tata Letak

Puput Nur Fajri, S.KM

IT

Oki Setiono, M.Kom

Publikasi

Syifa Sofia Wibowo, M.Tr.Keb

Penerbit Health Science UDINUS

Universitas Dian Nuswantoro Jl. Nakula 1/5-11 Gedung D lantai 1 Semarang

Cetakan Pertama, 2026

ISSN 2964-5840

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

PRAKATA

Dalam rangka pelaksanaan kegiatan Tri Dharma Perguruan Tinggi, maka kegiatan menulis buku merupakan salah satu indikator penting, terutama dalam bidang penelitian. Penulisan buku juga merupakan salah satu wujud penyebaran informasi kepada masyarakat di lingkungan akademik, maupun di masyarakat luas. Untuk itu, kami sebagai bagian dari komunitas akademik menghadirkan book chapter sebagai wujud pelaksanaan dari Tri Dharma Perguruan Tinggi.

“Bookchapter Health Science Series“ Chapter 2 ini terdiri dari 12 BAB, yang masing-masing ditulis oleh kelompok peneliti yang mempunyai latar belakang di bidang kesehatan atau ilmu-ilmu yang berkaitan. Penulis menyadari book chapter ini masih belum sempurna, sehingga penulis menerima saran yang membangun. Semoga bookchapterini bermanfaat bagi pembaca.

Semarang, Januari 2026

Tim Editor

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN IDENTITAS BUKU	i
PRAKATA	ii
DAFTAR ISI	iii
CHAPTER II	
Pendekatan Ekologis Dalam Pengendalian Vektor: Strategi Pengelolaan Lingkungan Untuk Mencapai Kesehatan Berkelanjutan	1
Efektivitas Pengendalian Vektor Aedes Aegypti Secara Kimiawi Di Indonesia	23
Pengendalian Vektor Aedes Aegypti Berbasis Lingkungan, Biologis, Dan Teknologi Modern Di Indonesia	38
Pengendalian Vektor Secara Hayati; Terminologi, Teori, dan Aplikasinya	60
Pengendalian Vektor Termit (Rayap) : Kajian Komprehensif Klasifikasi, Morfologi, dan Strategi Pengendalian Berkelanjutan	78
Pengendalian Vektor Terpadu ; Terminologi, Teori, dan Aplikasinya	95
Pengendalian Vektor Nyamuk Anopheles Secara Hayati: Terminologi, Teori, dan Aplikasinya	106
Konsep Dasar Vektor Pada Penularan Demam Berdarah Dengue : Terminologi, Teori, dan Strategi Pengendalian	125
Tinjauan Literatur Poliester Violet Sebagai Teknologi Perangkap Visual Multi Spesies dan Potensinya Dalam Pengendalian Hama Lalat Terpadu	136
Pengendalian Vektor Secara Genetik; Terminologi, Teori, dan Aplikasinya	146
Pengendalian Vektor Kecoa: Terminologi, Teori, dan Aplikasinya	167
Pengendalian Vektor Pinjal Dan Kutu Secara Hayati; Terminologi, Teori, Dan Aplikasinya	186

PENGENDALIAN VEKTOR SECARA GENETIK; TERMINOLOGI, TEORI, DAN APLIKASINYA

¹⁾Almahi Tasha Ayyuba

¹⁾ Faculty of Health Science Universitas Dian Nuswantoro

Corresponding author: Almahi Tasha Ayyuba

Email: tashaalmahi@gmail.com

ABSTRAK

Pengendalian vektor secara genetik merupakan inovasi penting dalam upaya menurunkan beban penyakit menular yang ditularkan oleh vektor seperti nyamuk *Aedes* dan *Anopheles* di Indonesia. Metode ini memanfaatkan kemajuan bioteknologi, seperti *gene drive*, CRISPR/Cas9, *Sterile Insect Technique* (SIT), dan aplikasi bakteri *Wolbachia*, untuk memodifikasi populasi vektor sehingga menekan transmisi patogen. Studi kasus di Yogyakarta menunjukkan bahwa pelepasan nyamuk *Aedes aegypti* ber-*Wolbachia* mampu menurunkan insiden demam berdarah hingga 77% dan rawat inap sebesar 86% dalam dua tahun, tanpa dampak ekologi yang signifikan. Sementara itu, *gene drive* menawarkan potensi supresi populasi vektor secara revolusioner, namun masih menghadapi tantangan etik, risiko ekologi, dan regulasi yang ketat. Analisis bioetika dan risiko ekologi menyoroti pentingnya monitoring jangka panjang, konsultasi publik, serta pengawasan regulasi nasional dan internasional. Integrasi pengendalian genetik dengan strategi pengelolaan vektor terpadu (IVM), seperti penggunaan insektisida dan edukasi masyarakat, menjadi kunci efektivitas dan keberlanjutan program. Tantangan utama meliputi hambatan teknis, literasi masyarakat, biaya riset, serta harmonisasi kebijakan. Dengan kolaborasi multidisiplin dan dukungan kebijakan yang kuat, pengendalian vektor secara genetik berpotensi menjadi solusi inovatif dan berkelanjutan untuk mengatasi penyakit menular di Indonesia dan dunia.

Kata kunci: Pengendalian Vektor, Genetik, *gene drive*, CRISPR/Cas9, *Sterile Insect Technique*

Januari 2026

ABSTRACT

Genetic vector control is a significant innovation in reducing the burden of vector-borne diseases such as those transmitted by *Aedes* and *Anopheles* mosquitoes in Indonesia. This approach utilizes advances in biotechnology, including gene drive, CRISPR/Cas9, Sterile Insect Technique (SIT), and *Wolbachia* bacteria application, to modify vector populations and suppress pathogen transmission. A case study in Yogyakarta demonstrated that the release of *Wolbachia*-infected *Aedes aegypti* mosquitoes reduced dengue incidence by 77% and hospitalizations by 86% within two years, with no significant ecological impact. Meanwhile, gene drive technology offers the potential for revolutionary vector population suppression but still faces ethical, ecological, and regulatory challenges. Bioethical and ecological risk analyses highlight the importance of long-term monitoring, public consultation, and strict national and international regulatory oversight. Integrating genetic control with integrated vector management (IVM) strategies, such as insecticide use and community education, is key to program effectiveness and sustainability. Major challenges include technical barriers, public literacy, research funding, and policy harmonization. With multidisciplinary collaboration and strong policy support, genetic vector control has the potential to become an innovative and sustainable solution for combating infectious diseases in Indonesia and globally.

Keyword : Vector control, genetics, *gene drive*, CRISPR/Cas9, *Sterile Insect Technique*

A. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara tropis yang kaya akan keanekaragaman hayati, termasuk berbagai jenis vektor dan hewan pembawa penyakit. Keberadaan vektor ini sangat erat kaitannya dengan tingginya insiden penyakit menular tropis yang bersifat endemik maupun potensial endemik di berbagai wilayah nusantara. Vektor adalah arthropoda yang dapat menularkan, memindahkan, dan/atau menjadi sumber penular penyakit terhadap manusia. Definisi ini menegaskan bahwa vektor tidak hanya berperan sebagai pembawa pasif, tetapi juga sebagai agen aktif dalam siklus penularan penyakit (Fitriani et al., 2023) Sedangkan menurut Sumampouw (2017) Penyakit yang

Januari 2026

disebarkan oleh hewan perantara, atau yang dikenal sebagai penyakit tular vektor, menjadi salah satu tantangan utama dalam sistem kesehatan masyarakat di Indonesia. Contoh penyakit ini antara lain malaria, demam berdarah dengue, filariasis, chikungunya, dan Japanese encephalitis.

Penyakit menular yang ditularkan oleh vektor seperti nyamuk *Aedes* spp., *Anopheles* spp., dan lain-lain masih menjadi beban kesehatan masyarakat. Hal ini berdampak pada angka kesakitan, kematian, maupun dampak ekonomi dan sosial. Data Kementerian Kesehatan RI tahun 2019 menunjukkan bahwa kasus demam berdarah dengue (DBD) dan malaria masih tinggi di berbagai provinsi, dengan insiden yang fluktuatif tergantung musim dan efektivitas intervensi pengendalian. Pengendalian vektor telah lama menjadi strategi utama dalam upaya menurunkan angka penularan penyakit tular vektor seperti demam berdarah dengue, malaria, filariasis, dan penyakit lain (Patmawati et al., 2025). Strategi ini meliputi berbagai pendekatan, mulai dari pengelolaan lingkungan, penggunaan insektisida, hingga intervensi berbasis komunitas (Adrianto et al., 2024). Namun, metode tradisional pengendalian vektor, seperti penggunaan insektisida kimia, menghadapi tantangan besar. Resistensi serangga terhadap insektisida semakin meluas, sehingga efektivitas program pengendalian berbasis kimia menurun secara signifikan. Selain resistensi, penggunaan insektisida juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran air dan tanah, serta membahayakan organisme non-target termasuk manusia (Rachim & Sahariyani, 2023). Hal ini mendorong pencarian metode pengendalian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Salah satu pendekatan inovatif yang berkembang pesat dalam dekade terakhir adalah pengendalian vektor secara genetik. Pendekatan ini memanfaatkan kemajuan biologi molekuler dan rekayasa genetika untuk memodifikasi populasi vektor, baik untuk menekan jumlah populasi maupun mengubah sifat vektor agar tidak mampu menularkan patogen. Pengendalian vektor secara genetik dapat didefinisikan sebagai upaya intervensi yang menggunakan teknologi genetika untuk mengubah karakteristik populasi vektor, sehingga menurunkan risiko penularan penyakit. Pendekatan ini mencakup berbagai teknik, seperti Sterile Insect Technique (SIT), gene drive, dan penggunaan bakteri endosimbiont seperti *Wolbachia* (Patmawati et al.,

2025). Terminologi penting dalam pengendalian vektor genetik meliputi istilah gene drive, CRISPR/Cas9, transgenik, dan modifikasi populasi. Gene drive adalah sistem pewarisan gen yang memungkinkan alel tertentu menyebar lebih cepat dalam populasi, melampaui mekanisme pewarisan Mendel biasa. Teknologi CRISPR/Cas9 telah merevolusi bidang rekayasa genetika, memungkinkan modifikasi genetik yang presisi pada vektor seperti nyamuk. Dengan teknologi ini, para ilmuwan dapat menargetkan gen tertentu yang berperan dalam kelangsungan hidup atau kemampuan vektor menularkan patogen.

Salah satu aplikasi gene drive yang paling banyak diteliti adalah pada nyamuk *Anopheles* untuk pengendalian malaria. Gene drive dapat digunakan untuk menyebarkan gen yang menyebabkan kemandulan pada betina atau menghambat perkembangan parasit malaria dalam tubuh nyamuk.

Selain gene drive, teknik Sterile Insect Technique (SIT) juga telah lama digunakan dalam pengendalian vektor. SIT melibatkan pelepasan serangga jantan steril ke alam, sehingga perkawinan dengan betina liar tidak menghasilkan keturunan dan populasi vektor menurun secara bertahap. Penggunaan bakteri endosimbiont seperti *Wolbachia* pada nyamuk *Aedes aegypti* telah terbukti efektif menurunkan kemampuan nyamuk menularkan virus dengue. Studi di Indonesia dan negara lain menunjukkan penurunan insiden DBD secara signifikan di wilayah yang menjadi lokasi pelepasan nyamuk *Wolbachia*. Teori dasar pengendalian genetik vektor berfokus pada dua pendekatan utama: supresi populasi dan modifikasi populasi. Supresi populasi bertujuan menurunkan jumlah vektor melalui pewarisan gen yang mematikan atau menyebabkan kemandulan. Modifikasi populasi bertujuan mengubah sifat vektor agar tidak mampu mendukung siklus hidup patogen. Contoh supresi populasi adalah gene drive yang menargetkan gen esensial untuk kelangsungan hidup nyamuk, sehingga populasi menurun drastis dalam beberapa generasi. Sementara itu, modifikasi populasi dapat dilakukan dengan memasukkan gen yang menghambat replikasi virus dalam tubuh nyamuk, sehingga transmisi penyakit terhenti.

Aplikasi praktis teknologi pengendalian genetik vektor telah memasuki tahap uji coba lapangan di berbagai negara, termasuk Indonesia. Pelepasan nyamuk *Aedes aegypti* yang terinfeksi *Wolbachia* di Yogyakarta, misalnya,

berhasil menurunkan kasus DBD lebih dari 70% dalam beberapa tahun terakhir (Saraswati et al., 2023). Studi serupa di Australia dan Brasil juga menunjukkan hasil yang menjanjikan, baik dari segi penurunan insiden penyakit maupun keberlanjutan populasi nyamuk yang telah dimodifikasi. Keberhasilan ini mendorong ekspansi program ke wilayah lain dengan beban penyakit tinggi (Gantz et al., 2015). Namun, penggunaan teknologi gene drive dan modifikasi genetik lainnya menghadapi tantangan besar, terutama terkait aspek etis, ekologis, dan sosial. Risiko penyebaran gen ke spesies non-target, potensi gangguan ekosistem, serta kemungkinan munculnya resistensi baru menjadi perhatian utama para peneliti dan regulator. Isu informed consent dan keterlibatan masyarakat sangat penting dalam implementasi pengendalian vektor genetik. Intervensi ini dapat berdampak luas dan jangka panjang pada lingkungan dan kesehatan masyarakat, sehingga transparansi dan komunikasi risiko menjadi kunci keberhasilan. Pengembangan sistem gene drive lokal yang dapat dikontrol dan dievaluasi secara ketat menjadi prioritas riset saat ini. Hal ini bertujuan meminimalkan risiko penyebaran gen yang tidak diinginkan dan memastikan keamanan ekosistem.

Selain tantangan teknis dan etis, pengendalian vektor genetik juga menghadapi hambatan regulasi dan kebijakan. Setiap negara memiliki regulasi yang berbeda terkait pelepasan organisme hasil rekayasa genetika, sehingga harmonisasi kebijakan menjadi penting untuk mendukung riset dan implementasi lintas negara. Integrasi teknologi genetik dengan metode pengendalian vektor lainnya menjadi landasan bagi pendekatan manajemen vektor terpadu (Integrated Vector Management/IVM). IVM menggabungkan berbagai strategi, seperti penggunaan insektisida, pengelolaan lingkungan, edukasi masyarakat, dan intervensi genetik untuk mencapai hasil yang optimal dan berkelanjutan (Tri Boewono et al., 2012). WHO menekankan pentingnya pendekatan komprehensif dan kolaboratif dalam pengendalian vektor, termasuk penguatan sistem surveilans, monitoring resistensi, dan evaluasi dampak intervensi secara berkala. Kebutuhan akan riset mendalam mengenai genom dan genetika populasi vektor sangat penting untuk menyesuaikan intervensi pengendalian dengan kondisi genetik dan struktur populasi alami vektor di lapangan. Monitoring resistensi, evaluasi dampak ekologis, dan pengembangan teknologi yang dapat dikontrol menjadi kunci untuk

meminimalkan risiko dan meningkatkan efektivitas intervensi.

Investasi dalam riset dan pengembangan, pelatihan tenaga ahli, serta penguatan kapasitas laboratorium sangat diperlukan untuk mendukung implementasi teknologi pengendalian vektor genetik secara luas dan berkelanjutan. Dalam konteks global, pengendalian vektor secara genetik menawarkan peluang besar untuk mengatasi penyakit menular yang selama ini sulit dikendalikan dengan metode konvensional. Namun, keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada kolaborasi multidisiplin, dukungan regulasi yang ketat, serta keterlibatan dan penerimaan masyarakat luas sebagai bagian dari strategi kesehatan masyarakat. Dengan pendekatan yang hati-hati, berbasis bukti, dan berorientasi pada keberlanjutan, pengendalian vektor secara genetik dapat menjadi solusi inovatif untuk menurunkan beban penyakit menular di masa depan. Keberhasilan program ini akan sangat menentukan pencapaian target eliminasi penyakit tular vektor di Indonesia dan dunia. Oleh karena itu, pengembangan, implementasi, dan evaluasi pengendalian vektor secara genetik harus dilakukan secara terintegrasi, melibatkan berbagai pemangku kepentingan, dan didukung oleh riset ilmiah yang kuat. Hanya dengan cara ini, potensi penuh teknologi ini dapat diwujudkan untuk meningkatkan kesehatan masyarakat secara berkelanjutan.

Teori dasar pengendalian genetik vektor berfokus pada modifikasi atau pengurangan populasi melalui pewarisan gen yang tidak normal atau mematikan, serta modifikasi sifat vektor agar tidak dapat mendukung siklus hidup patogen (Macias et al., 2017). Contohnya, gene drive yang menargetkan gen kelangsungan hidup nyamuk dapat menyebabkan penurunan drastis jumlah populasi dalam beberapa generasi dengan cara memperbanyak alel tertentu melebihi mekanisme pewarisan Mendel biasa. Aplikasi praktis dari teknologi ini sudah mulai memasuki tahap uji coba lapangan, seperti pelepasan nyamuk *Wolbachia* yang terbukti secara signifikan menurunkan penularan virus demam berdarah di beberapa wilayah. Namun, penggunaan gene drive menghadapi tantangan terkait aspek ekologis dan etis, seperti risiko penyebaran gen ke spesies non-target dan potensi gangguan terhadap ekosistem yang lebih luas. Oleh karena itu, pengembangan sistem gene drive lokal yang dapat dikontrol dan dievaluasi secara ketat menjadi prioritas riset saat ini. Selain itu, integrasi teknologi genetik dengan metode pengendalian

vektor lainnya, seperti insektisida dengan mekanisme kerja baru dan strategi biologis lainnya, menjadi landasan bagi pendekatan manajemen vektor terpadu (Integrated Vector Management/IVM) yang lebih holistik dan berkelanjutan (Anggreini et al., 2025).

Kebutuhan akan riset mendalam mengenai genom dan genetika populasi vektor sangat penting untuk menyesuaikan intervensi pengendalian dengan kondisi genetik dan struktur populasi alami vektor di lapangan. Ini juga penting untuk meminimalkan munculnya resistensi terhadap teknologi pengendalian genetik yang diterapkan. Dalam konteks global, pengendalian vektor secara genetik menawarkan potensi revolusioner bagi pengendalian penyakit menular yang selama ini sulit diatasi dengan metode konvensional. Namun, keberhasilan implementasinya bergantung pada kolaborasi multidisiplin, dukungan regulasi yang ketat, serta keterlibatan dan penerimaan masyarakat luas sebagai bagian dari strategi kesehatan masyarakat. Oleh karena itu artikel ini ingin membahas lebih lanjut terkait pengendalian vektor secara genetik.

B. TERMINOLOGI PENGENDALIAN VEKTOR GENETIK

Pengendalian vektor secara genetik merupakan cabang inovatif dalam pengendalian penyakit menular yang memanfaatkan teknologi genetika untuk memodifikasi populasi vektor, sehingga menurunkan atau menghentikan penularan patogen. Istilah ini mencakup berbagai teknik dan pendekatan yang berbeda, baik dari segi mekanisme biologis maupun regulasi penerapannya di lapangan. Secara umum, pengendalian vektor genetik adalah upaya intervensi yang menggunakan rekayasa genetika untuk mengubah karakteristik populasi vektor, baik dengan menekan jumlah populasi (supresi) maupun mengubah sifat vektor agar tidak mampu menularkan patogen (modifikasi populasi). Pendekatan ini berbeda dari metode konvensional seperti insektisida, karena menargetkan pewarisan sifat pada tingkat genetik dan dapat memberikan dampak jangka panjang pada populasi vektor (Rachim & Sahariyani, 2023). Beberapa istilah kunci yang sering digunakan dalam pengendalian vektor genetik antara lain:

1. Gene Drive

Sistem pewarisan gen yang memungkinkan alel tertentu menyebar

lebih cepat dalam populasi, melampaui mekanisme pewarisan Mendel biasa. Gene drive dapat digunakan untuk menyebarkan gen yang menyebabkan kemandulan, kematian, atau resistensi terhadap patogen pada vektor seperti nyamuk. Terdapat beberapa tipe gene drive, seperti homing-based gene drives (HGDs), sex-linked meiotic drives, dan sistem underdominance. Gene drive dapat bersifat alami (misal: Medea) atau sintetis, seperti yang dikembangkan dengan teknologi CRISPR/Cas9.

2. CRISPR/Cas9

Teknologi pengeditan gen yang sangat presisi, memungkinkan pemotongan dan modifikasi DNA pada lokasi spesifik. Dalam konteks pengendalian vektor, CRISPR/Cas9 digunakan untuk membuat gene drive atau memodifikasi gen vektor agar tidak mampu menularkan patogen. CRISPR/Cas9 menawarkan efisiensi dan fleksibilitas tinggi, namun juga menimbulkan tantangan terkait efek off-target dan regulasi.

3. Sterile Insect Technique (SIT)

Teknik pelepasan serangga jantan steril ke alam, sehingga perkawinan dengan betina liar tidak menghasilkan keturunan. SIT telah digunakan secara luas untuk pengendalian lalat buah dan nyamuk, dan kini dikembangkan dengan pendekatan genetika modern, seperti penyinaran atau rekayasa genetika untuk menghasilkan kemandulan.

4. Modifikasi Transgenik

Proses memasukkan gen asing ke dalam genom vektor untuk mengubah sifatnya, misalnya membuat nyamuk tidak mampu menularkan virus dengue. Modifikasi transgenik dapat dilakukan dengan berbagai teknik, termasuk CRISPR, dan sering dikombinasikan dengan gene drive untuk penyebaran sifat baru dalam populasi.

Secara ilmiah, teknik pengendalian vektor genetika dapat dibagi menjadi dua kelompok besar:

1. Supresi Populasi: Bertujuan menurunkan jumlah vektor melalui kemandulan, kematian dini, atau pengurangan fertilitas. Contohnya

adalah SIT, gene drive yang menargetkan gen esensial, dan pelepasan nyamuk jantan steril hasil rekayasa genetik.

2. Modifikasi Populasi: Bertujuan mengubah sifat vektor agar tidak mampu menularkan patogen, misalnya dengan memasukkan gen refrakter terhadap virus atau bakteri, atau infeksi *Wolbachia* yang menghambat transmisi patogen (Wang et al., 2021).

Dari sisi regulasi, penerapan teknik ini diatur secara ketat oleh peraturan nasional dan internasional terkait organisme hasil rekayasa genetika (GMO). Di Indonesia, pelepasan organisme transgenik ke lingkungan harus melalui uji keamanan hayati, penilaian risiko ekologi, serta persetujuan dari otoritas terkait. Regulasi internasional, seperti Cartagena Protocol on Biosafety, juga mengatur tata cara pengelolaan dan pelepasan GMO, termasuk gene drive dan organisme hasil modifikasi genetik lainnya.

Penerapan pengendalian vektor genetik harus memperhatikan aspek bioetika, keamanan lingkungan, dan keterlibatan masyarakat. Setiap teknik memiliki keunggulan dan tantangan tersendiri, baik dari segi efektivitas, risiko resistensi, maupun dampak jangka panjang terhadap ekosistem. Oleh karena itu, kolaborasi multidisiplin dan pengawasan regulasi sangat penting dalam pengembangan dan implementasi teknologi ini di lapangan.

C. METODE DAN TEKNOLOGI

Pengendalian vektor secara genetik telah berkembang pesat berkat kemajuan bioteknologi dan riset laboratorium. Beberapa metode utama yang digunakan meliputi gene drive, CRISPR/Cas9, Sterile Insect Technique (SIT), dan aplikasi *Wolbachia*. Masing-masing teknik memiliki mekanisme kerja yang unik dan telah diuji dalam berbagai studi laboratorium maupun aplikasi lapangan.

Gene Drive adalah teknologi yang memungkinkan gen tertentu menyebar lebih cepat dalam populasi vektor, melampaui pola pewarisan Mendel. Dengan gene drive, gen yang diinginkan—misalnya gen yang menyebabkan kemandulan atau resistensi terhadap patogen—dapat didorong untuk mendominasi populasi dalam beberapa generasi. Gene drive biasanya dikembangkan menggunakan sistem CRISPR/Cas9, yang memungkinkan

pemotongan dan pengeditan DNA secara presisi pada lokasi target. Studi laboratorium telah menunjukkan bahwa gene drive dapat menurunkan populasi nyamuk malaria secara drastis, namun tantangan seperti resistensi genetik dan efek ekologi masih menjadi perhatian utama (Rachim & Sahariyani, 2023).

CRISPR/Cas9 sendiri adalah alat pengeditan gen yang sangat presisi dan fleksibel. Dalam konteks vektor, CRISPR digunakan untuk menargetkan gen vital pada nyamuk, seperti gen yang berperan dalam fertilitas atau kemampuan menularkan patogen. Dengan CRISPR, para peneliti dapat membuat nyamuk yang steril atau tidak mampu menularkan virus dengue dan malaria. Inovasi terbaru di laboratorium telah berhasil menciptakan strain nyamuk yang membawa gen anti-pathogen, yang dapat menyebar melalui gene drive (Gantz et al., 2015).

Sterile Insect Technique (SIT) adalah metode klasik yang kini dikembangkan dengan pendekatan genetik modern. SIT melibatkan pelepasan serangga jantan steril ke alam, sehingga perkawinan dengan betina liar tidak menghasilkan keturunan. Sterilisasi biasanya dilakukan dengan iradiasi sinar gamma atau modifikasi genetik. Studi di Salatiga, Indonesia, menunjukkan bahwa pelepasan nyamuk jantan mandul secara bertahap dapat meningkatkan persentase telur mandul hingga lebih dari 90% dan menurunkan populasi *Aedes aegypti* secara signifikan. SIT juga telah berhasil diterapkan di berbagai negara untuk menekan populasi vektor penyakit, seperti di Amerika, Kuba, dan Singapura (Macias et al., 2017).

Selain ketiga teknik utama di atas, inovasi terbaru juga meliputi pengembangan strain transgenik yang membawa gen anti-pathogen, serta kombinasi teknik genetik dengan pengelolaan lingkungan dan penggunaan insektisida baru. Studi laboratorium terus dilakukan untuk menguji efektivitas, keamanan, dan dampak ekologi dari setiap metode sebelum diterapkan secara luas di lapangan.

D. STUDI KASUS DAN APLIKASI LAPANGAN

Salah satu aplikasi paling menonjol dari pengendalian vektor secara genetik di Indonesia adalah program pelepasan nyamuk *Aedes aegypti* ber-*Wolbachia* di Yogyakarta. Studi ini menggunakan desain uji coba secara acak

terkontrol (randomized controlled trial/RCT) dan dilakukan dalam beberapa tahap sejak 2011 hingga 2023. Fase awal terdiri dari studi kelayakan dan keamanan (2011–2012), pelepasan skala terbatas (2013–2015), pelepasan skala luas (2016–2020), serta fase implementasi penuh (2021–2022).

Pendekatan komunitas menjadi komponen utama dalam desain implementasi program ini. Tim peneliti melakukan dua tahun pendekatan sosial dan advokasi, lalu melepas nyamuk ber-Wolbachia secara bertahap ke tujuh kelurahan di Yogyakarta. Dampaknya dievaluasi dengan membandingkan data notifikasi kasus demam berdarah (DB) dan angka rawat inap antara area intervensi Wolbachia dan area kontrol, menggunakan desain kuasi-eksperimental dan RCT. Hasil RCT di Yogyakarta menunjukkan penurunan 77% kejadian kasus demam berdarah dan 86% penurunan angka rawat inap di area yang diintervensi Wolbachia setelah sekitar 24 bulan dibandingkan wilayah kontrol yang tidak mendapat intervensi serupa. Capaian ini didokumentasikan sebagai salah satu dampak paling signifikan dari aplikasi teknologi vektor genetik di dunia, dan menjadi model bagi program serupa di negara lain (Dahlan Sitohang & Hari Saktiningsih, 2025).

Dari segi ekologi, penelitian jangka panjang di Yogyakarta juga membuktikan bahwa pelepasan Wolbachia tidak menimbulkan gangguan besar pada ekosistem lokal. Proses monitoring hingga kini belum menemukan bukti peningkatan keganasan nyamuk atau efek negatif terhadap keseimbangan serangga lain. Otoritas kesehatan Indonesia menyebut implementasi teknologi ini aman karena Wolbachia secara alami terdapat di lingkungan dan telah melalui penelitian yang panjang sebelum dilepas secara massal. Sebaliknya, gene drive dengan CRISPR lebih banyak diterapkan pada nyamuk pembawa malaria di Afrika dan beberapa studi laboratorium internasional, seperti di Afrika subsahara dan di fasilitas biokontainmen di Amerika atau Inggris. Uji coba awal gene drive di laboratorium dan lingkungan semi-alami berhasil menurunkan populasi *Anopheles gambiae* secara cepat, bahkan beberapa kali mencapai supresi populasi lebih dari 95% dalam simulasi populasi tertutup. Namun hingga 2025, belum ada pelepasan gene drive skala luas di lingkungan alami karena tantangan etik, biosafety, dan kemungkinan dampak tak terduga pada ekosistem dan spesies non-target. Perbandingan efektivitas dan tantangan antara Wolbachia dan gene drive

sangat menarik. *Wolbachia* sudah terbukti efektif dalam menurunkan insiden dan rawat inap DB pada uji lapangan di Indonesia dan dunia, dengan risiko ekologi yang rendah dan dapat diterima komunitas. Gene drive menjanjikan supresi populasi vektor lebih cepat dan permanen, khususnya pada penyakit malaria, namun masih terkendala masalah resistensi genetik, risiko penyebaran tak terkendali ke spesies lain, etik, dan regulasi yang sangat ketat.

Kedua teknologi ini menunjukkan potensi luar biasa sebagai bagian dari Integrated Vector Management (IVM) dan membuka peluang kolaborasi multidisiplin, namun implementasi massal gene drive masih memerlukan studi lebih mendalam, pengawasan kuat, serta keterlibatan masyarakat dan regulator di setiap tahap perkembangannya. Studi penerapan pengendalian vektor secara genetik di Indonesia yang paling menonjol adalah proyek *Wolbachia* di Yogyakarta. Studi ini dilaksanakan dengan desain uji coba secara acak terkontrol (randomized controlled trial/RCT) dan kuasi-eksperimental di beberapa wilayah, dengan pelepasan nyamuk *Aedes aegypti* ber-*Wolbachia* antara 2017–2020, setelah melalui tahapan uji kelayakan dan pendekatan sosial dengan masyarakat selama dua tahun. Pada intervensi ini, pelepasan dilakukan secara bertahap hingga tingkat infeksi *Wolbachia* pada populasi lokal mencapai di atas 60%, angka yang dianggap optimal untuk menurunkan penularan virus dengue secara berkelanjutan. Penilaian dampak dilakukan dengan membandingkan laporan kasus demam berdarah dan rawat inap di rumah sakit antara area intervensi dan area kontrol. Setelah 24 bulan intervensi, wilayah yang mendapat nyamuk ber-*Wolbachia* menunjukkan penurunan 77% kasus demam berdarah dan 86% rawat inap akibat DB dibandingkan dengan area tanpa intervensi. Keberhasilan ini menempatkan Yogyakarta sebagai model utama aplikasi *Wolbachia* secara luas di negara endemik dengue, dan menjadi referensi global dalam pengendalian berbasis komunitas yang berkelanjutan. Gene drive dengan CRISPR/cas9 pada nyamuk *Anopheles* untuk malaria sampai tahun 2025 sebagian besar masih di tingkat laboratorium dan lingkungan percobaan terkendali. Studi internasional di Afrika menunjukkan modifikasi gene drive dapat menurunkan populasi nyamuk malaria lebih dari 95% dalam simulasi, dengan proof-of-concept telah tercapai di fasilitas biokontainmen. Namun, belum ada uji lapangan skala penuh karena aspek keamanan, etika, dan potensi dampak ekologi jangka

panjang belum sepenuhnya dapat dijamin. Secara keseluruhan, efektivitas Wolbachia telah terbukti secara nyata di Indonesia dengan penerimaan komunitas yang tinggi dan hasil penurunan kasus yang signifikan, tanpa bukti substansial gangguan ekosistem lokal hingga saat ini. Sementara gene drive memiliki potensi untuk eliminasi malaria secara revolusioner, risikonya jauh lebih kompleks dan persyaratan regulasi juga lebih ketat, sehingga untuk sementara lebih difokuskan pada riset dan uji model semi-alami. Kedua teknologi ini menawarkan masa depan baru dalam Integrated Vector Management (IVM); Wolbachia unggul dalam readiness for implementation dan keamanan ekologi, gene drive diunggulkan untuk supresi populasi ekstrem dan kemungkinan eradikasi vektor, dengan tantangan utama pada bioetika dan ketidakpastian jangka panjang. Kolaborasi peneliti, otoritas, dan masyarakat menjadi kunci dalam menerapkan inovasi tersebut secara bertanggung jawab dan aman (Anders et al., 2018).

E. DAMPAK DAN RESIKO

Pengendalian vektor secara genetik menawarkan potensi luar biasa bagi upaya pengendalian penyakit menular berbasis vektor, namun juga membawa sejumlah risiko dan dampak yang perlu dianalisis secara mendalam, baik dari segi bioetika, ekologi, kemungkinan efek samping, hingga potensi resistensi dan kerangka regulasi yang berlaku. Dari sisi bioetika, teknologi gene drive dan rekayasa genetika pada nyamuk memunculkan perdebatan terkait efektivitas, keadilan sosial, hak masyarakat untuk mengetahui, dan persetujuan terhadap intervensi genetika di lingkungan mereka. Keputusan untuk melepaskan organisme hasil rekayasa genetika (GMO) harus dilakukan secara transparan, melibatkan konsultasi dan edukasi kepada komunitas terdampak, serta memberikan ruang partisipasi dalam pengambilan keputusan (Gunawan et al., 2025). Selain itu, bioetika juga mempertimbangkan keadilan antara negara produsen teknologi dan negara pengguna, terutama jika pelepasan dilakukan lintas batas negara (Anders et al., 2018).

Dari aspek risiko ekologi, pelepasan nyamuk hasil gene drive, Wolbachia, atau teknik steril berpotensi membawa konsekuensi tak terduga pada ekosistem lokal. Risiko utama adalah terjadinya transfer gen ke organisme non-target melalui hibridisasi atau horizontal gene transfer. Studi

teoretis dan laboratorium telah mengingatkan tentang kemungkinan berubahnya dinamika ekosistem akibat penurunan tiba-tiba spesies target, berkurangnya pakan alami predator (misal burung atau ikan), atau terjadinya “replacement” oleh vektor dan spesies invasif (Tri Boewono et al., 2012). Potensi resistensi baru juga menjadi perhatian utama, baik pada teknologi gene drive maupun Wolbachia. Pada gene drive, munculnya alel resisten yang menghambat penyebaran gene drive telah terdeteksi di laboratorium dan model populasi (Reiner et al., 2013). Mutasi pada target CRISPR atau evolusi sistem imunitas vektor dapat mengurangi efektivitas gene drive setelah beberapa generasi. Sementara itu, resistensi pada Wolbachia dapat terjadi jika nyamuk atau virus mengembangkan adaptasi untuk mengurangi efek infeksi bakteri ini. Selain itu, adaptasi virus dengue terhadap tekanan Wolbachia telah menjadi topik pemantauan pasca-implementasi di beberapa negara Asia Tenggara. Risiko efek samping lain, meskipun masih langka, dapat mencakup perubahan perilaku vektor, perubahan tingkat gigitan pada manusia, atau eksposur baru kepada manusia akibat modifikasi genetik. Perubahan komposisi populasi *Aedes aegypti* menjadi *Aedes albopictus* setelah invasi Wolbachia juga pernah dilaporkan, sehingga monitoring spesies vektor alternatif sangat krusial untuk menghindari transisi penyakit ke vektor baru (Achee et al., 2019).

Dari sisi regulasi dan kebijakan, implementasi pengendalian vektor genetik diatur ketat oleh badan nasional maupun internasional. WHO telah mengeluarkan pedoman etika dan biosafety untuk percobaan dan pelepasan gene drive, menekankan pentingnya prinsip kehati-hatian, konsultasi publik, dan pelaporan dampak sistemik jangka panjang (WHO, 2021). Di Indonesia, Permenkes No. 50 Tahun 2017 dan Permenkes No. 374/Menkes/Per/III/2010 mengatur pengendalian vektor penyakit dengan ketentuan ketat, termasuk syarat uji keamanan hayati, komisi ahli, dan mekanisme pengawasan ketat sebelum serta sesudah pelepasan vektor hasil rekayasa genetik.

Penegakan aspek regulasi dilaksanakan mulai dari pelatihan SDM, uji laboratorium, hingga pengawasan lapangan oleh komisi nasional dan lembaga pengawas. Sanksi administratif, hingga pencabutan izin, diatur sebagai upaya mitigasi bila ditemukan pelanggaran atau efek samping di luar dugaan. Demikian, kolaborasi multidisiplin antara peneliti, regulator, dan masyarakat

menjadi kunci dalam menjamin keamanan, efektivitas, dan akuntabilitas teknologi vektor genetik di Indonesia dan dunia. Secara keseluruhan, meski terbukti efektif menurunkan rawat inap dan insiden penyakit, implementasi pengendalian vektor genetik wajib didampingi protokol bioetika, monitoring jangka panjang, evaluasi ekologi, serta regulasi ketat tanpa itu, manfaat jangka panjang dapat dikalahkan potensi risiko baru yang tak terdeteksi sejak dini..

F. INTEGRASI DENGAN STRATEGI PENGENDALIAN

Integrated Vector Management (IVM) atau Pengelolaan Vektor Terpadu merupakan strategi penting dalam pengendalian penyakit berbasis vektor di era modern. IVM didefinisikan oleh WHO sebagai proses pengambilan keputusan rasional yang mendorong pemanfaatan sumber daya secara optimal dan efektif untuk pengendalian vektor secara berkelanjutan, efisien, serta adaptif terhadap kondisi lokal dan perkembangan teknologi. Pendekatan ini sangat relevan dalam menyikapi tantangan resistensi insektisida, keterbatasan dana, dan kebutuhan integrasi berbagai inovasi genetika seperti gene drive dan penggunaan *Wolbachia*.

IVM menekankan integrasi multi-metode yang melibatkan kombinasi beberapa pendekatan pengendalian: penggunaan insektisida secara selektif dan rotasional, perbaikan serta pengelolaan lingkungan (misalnya pengelolaan limbah, perbaikan sanitasi, dan pengurangan habitat larva), aplikasi teknologi genetik, pengendalian biologis, surveilans populasi vektor, serta edukasi dan pemberdayaan masyarakat. Upaya pengendalian vektor tidak lagi berbasis satu teknik saja, namun dilakukan secara sinergis agar hasilnya lebih efektif dan berkelanjutan.

Penerapan teknologi inovatif seperti gene drive atau pelepasan *Wolbachia* harus didorong sebagai bagian dari strategi IVM. Misalnya, di sejumlah kota di Indonesia, aplikasi teknologi *Wolbachia* digabung dengan kampanye edukasi masyarakat dan larvasidasi, sehingga terjadi efek ganda dalam menurunkan kasus demam berdarah. Sementara di wilayah endemis malaria, integrasi pemantauan populasi nyamuk, penggunaan insektisida residu dalam ruangan, dan pelatihan masyarakat menunjukkan peningkatan efektivitas program eliminasi malaria.

Sinergi dengan insektisida juga tetap krusial untuk memutus rantai

penularan secara segera, terutama pada fase outbreak. Namun dalam kerangka IVM, pola penggunaan insektisida dilakukan berdasarkan surveilans, hasil evaluasi efikasi, dan rotasi bahan aktif untuk mencegah resistensi yang sering menjadi masalah utama di lapangan. Pengelolaan lingkungan merupakan fondasi lain dalam IVM. Studi di beberapa kota besar di Indonesia membuktikan bahwa program pengelolaan sampah terpadu dan edukasi lingkungan dapat secara signifikan mengurangi habitat vektor dan risiko penularan penyakit berbasis lingkungan. Strategi fisik ini terutama efektif di kawasan padat penduduk, fasilitas publik, dan rumah sakit. Pilar edukasi dan pemberdayaan masyarakat sangat vital dalam IVM. Partisipasi aktif dari warga dalam mencari, memberantas sarang nyamuk, memilah sampah, serta mengikuti penyuluhan kesehatan memungkinkan pengendalian vektor berkelanjutan dan berdaya jangkauan luas. Tanpa keterlibatan masyarakat, berbagai inovasi teknis cenderung gagal memberikan dampak jangka panjang. Kerangka IVM juga menuntut adanya kerjasama lintas sektor antara pemerintah, swasta, komunitas ilmiah, hingga dunia pendidikan serta pengambilan keputusan berbasis bukti dari hasil surveilans, penelitian lapangan, dan monitoring populasi vektor yang berkelanjutan. Setiap wilayah, baik kota maupun desa, perlu menyesuaikan strategi IVM dengan karakteristik biologis vektor setempat, perilaku masyarakat, dan sumber daya yang tersedia.

Dengan demikian, integrasi inovasi genetik seperti gene drive, Wolbachia, maupun metode klasik insektisida dan pengelolaan lingkungan dalam kerangka IVM memberikan peluang besar untuk pengendalian vektor yang lebih efektif, adaptif, dan berkelanjutan di Indonesia maupun global. Kolaborasi multidisipliner dan penguatan sinergi seluruh pemangku kepentingan adalah kunci utama keberhasilan implementasi IVM di masa depan.

G. TANTANGAN DAN PROSPEK PENGEMBANGAN

Tantangan dan prospek pengembangan pengendalian vektor secara genetik tidak dapat dilepaskan dari berbagai aspek teknis, sosial, literasi masyarakat, pembiayaan, hingga dukungan kebijakan dan kolaborasi lintas sektor. Secara teknis, pengembangan gene drive dan Wolbachia membutuhkan laboratorium berstandar tinggi, infrastruktur biokontainmen, kemampuan

pemantauan genetika populasi, serta uji keamanan hayati yang sangat ketat. Hambatan teknis lain mencakup munculnya resistensi (baik pada target maupun patogen), kemungkinan adaptasi ekosistem yang tidak terprediksi, serta perlunya konsistensi monitoring jangka panjang di lingkungan lapangan.

Dari sisi sosial, tantangan besar terjadi pada aspek literasi dan keterlibatan masyarakat. Banyak studi di Indonesia maupun global menyebutkan bahwa rendahnya pengetahuan publik tentang teknologi rekayasa genetika—serta persepsi risiko yang berlebihan—sering menjadi penyebab penolakan atau resistensi sosial terhadap inovasi seperti gene drive dan pelepasan *Wolbachia*. Oleh karena itu, pentingnya upaya edukasi dan komunikasi risiko melalui pendekatan berbasis komunitas menjadi kunci keberhasilan jangka panjang di lapangan.

Biaya riset dan implementasi masih menjadi kendala besar, terutama di negara berpenghasilan menengah ke bawah. Pengadaan alat, pemeliharaan fasilitas, pelatihan tenaga ahli, serta pengambilan sampel dan analisis molekuler populasi vektor memerlukan investasi yang tidak sedikit. Karena itu, keberlanjutan program sangat tergantung pada kuatnya dukungan pemerintah, donor, filantropi, dan mekanisme pembiayaan inovatif lintas sektor. Di sisi kebijakan dan tata kelola, tantangan administratif perlu diantisipasi melalui harmonisasi regulasi antara kementerian kesehatan, lingkungan, pertanian, hingga sektor riset dan teknologi. Regulasi berbasis prinsip kehati-hatian mutlak diterapkan baik mengikuti pedoman WHO maupun Permenkes dan Rencana Aksi Nasional di Indonesia termasuk perlunya pembentukan komisi etik/genetik yang independen, serta pemberian izin setelah melalui fase uji keamanan berlapis.

Pengembangan riset kolaboratif antara lembaga nasional (Kemenkes, BRIN, perguruan tinggi), perusahaan bioteknologi, serta mitra internasional adalah kunci untuk mengatasi keterbatasan sumber daya manusia dan teknologi. Kolaborasi juga berperan dalam transfer teknologi, pemanfaatan data bersama, dan pembentukan jejaring pengawasan vektor secara regional serta global, sehingga implementasi pengendalian vektor genetik dapat berlangsung secara lebih efisien dan aman. Adanya roadmap jangka menengah dan panjang yang terintegrasi dalam dokumen perencanaan strategis nasional menjadi penting untuk memastikan kontinuitas, integrasi, serta kemajuan

inovasi ke depan. Dalam konteks Indonesia, roadmap B2P2VRP dan renstra Kementerian Kesehatan memberikan arah pengembangan program hingga tahun 2024–2029, termasuk prioritas riset inovasi dan desiminasi hasil uji lapangan teknologi vektor genetik.

Prospek masa depan pengendalian vektor secara genetik sangat menjanjikan, seiring semakin matangnya kolaborasi multidisiplin, peningkatan kapasitas riset nasional, serta komitmen kebijakan dari pemerintah dan pemangku kepentingan terkait. Dengan sinergi tersebut, pengendalian penyakit tropis berbasis vektor diharapkan dapat lebih efektif dan adaptif terhadap perubahan lingkungan maupun dinamika epidemiologi penyakit

H. KESIMPULAN DAN IMPLIKASI

Pengendalian vektor secara genetik merupakan terobosan penting dalam upaya menurunkan beban penyakit menular yang ditularkan oleh vektor seperti nyamuk *Aedes* dan *Anopheles* di Indonesia. Inovasi ini memanfaatkan kemajuan bioteknologi, seperti gene drive, CRISPR/Cas9, dan Sterile Insect Technique (SIT) untuk memodifikasi populasi vektor sehingga menekan transmisi patogen secara efektif dan berkelanjutan. Sementara itu, gene drive menawarkan potensi supresi populasi vektor secara revolusioner, namun masih menghadapi tantangan etik, risiko ekologi, dan regulasi yang ketat.

Dari sisi bioetika dan ekologi, pengendalian vektor genetik menuntut monitoring jangka panjang, konsultasi publik, serta pengawasan regulasi nasional dan internasional yang ketat. Risiko resistensi baru, transfer gen ke organisme non-target, dan perubahan ekosistem harus diantisipasi melalui riset kolaboratif dan evaluasi dampak secara berkelanjutan. Integrasi pengendalian genetik dengan strategi pengelolaan vektor terpadu (IVM), seperti penggunaan insektisida, pengelolaan lingkungan, dan edukasi masyarakat, menjadi kunci efektivitas dan keberlanjutan program di lapangan.

Implikasi dari pengembangan teknologi ini sangat luas, baik dalam konteks kesehatan masyarakat, kebijakan, maupun penguatan kapasitas riset nasional. Tantangan utama meliputi hambatan teknis, literasi masyarakat, biaya riset, serta harmonisasi kebijakan lintas sektor. Dukungan kebijakan, kolaborasi multidisiplin, dan roadmap pengembangan yang jelas sangat diperlukan untuk memastikan keberhasilan implementasi dan keberlanjutan

inovasi ini di masa depan.

Dengan pendekatan yang hati-hati, berbasis bukti, dan berorientasi pada keberlanjutan, pengendalian vektor secara genetik berpotensi menjadi solusi inovatif dan efektif untuk mengatasi penyakit menular di Indonesia dan dunia. Keberhasilan program ini akan sangat menentukan pencapaian target eliminasi penyakit tular vektor dan peningkatan derajat kesehatan masyarakat secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Achee, N. L., Grieco, J. P., Vatandoost, H., Seixas, G., Pinto, J., Ching-Ng, L., Martins, A. J., Juntarajumong, W., Corbel, V., Gouagna, C., David, J. P., Logan, J. G., Orsborne, J., Marois, E., Devine, G. J., & Vontas, J. (2019). Alternative strategies for mosquito-borne arbovirus control. In *PLoS Neglected Tropical Diseases* (Vol. 13, Issue 1). Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0006822>
- Anders, K. L., Indriani, C., Ahmad, R. A., Tantowijoyo, W., Arguni, E., Andari, B., Jewell, N. P., Rances, E., O'Neill, S. L., Simmons, C. P., & Utarini, A. (2018). The AWED trial (Applying Wolbachia to Eliminate Dengue) to assess the efficacy of Wolbachia-infected mosquito deployments to reduce dengue incidence in Yogyakarta, Indonesia: Study protocol for a cluster randomised controlled trial. *Trials*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s13063-018-2670-z>
- Anggreini, Y. S., Agustarika, B., & Fabanyo, R. A. (2025). Pemberdayaan Masyarakat melalui Edukasi Pengendalian Vektor Nyamuk sebagai Upaya Pencegahan Penyakit DBD dan Malaria pada Masyarakat di Kelurahan Klamana. *Jurnal Kreativitas Pengabdian Kepada Masyarakat (PKM)*, 8(10), 4806–4819. <https://doi.org/10.33024/jkpm.v8i10.22157>
- Dahlan Sitohang, & Hari Saktiningsih. (2025). Edukasi Bioteknologi Aedes Ber-Wolbachia Dalam Penanggulangan Demam Berdarah Dengue: Kajian Hukum Kesehatan di Kelurahan Gajahan Solo. *ASPIRASI: Publikasi Hasil Pengabdian Dan Kegiatan Masyarakat*, 3(2), 49–57. <https://doi.org/10.61132/aspirasi.v3i2.1526>
- Fitriani, D., Raharjo, M., Raharjo, M., Martini, M., Martini, M., Setiani, O., Setiani, O., Wahyuningsih, N. E., & Wahyuningsih, N. E. (2023).

- Penerapan Integrated Vector Management (IVM) Dalam Upaya Eliminasi Malaria Di Daerah Endemis Kabupaten Purworejo. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(1), 112–121. <https://doi.org/10.14710/jkli.22.1.112-121>
- Gantz, V. M., Jasinskiene, N., Tatarenkova, O., Fazekas, A., Macias, V. M., Bier, E., & James, A. A. (2015). Highly efficient Cas9-mediated gene drive for population modification of the malaria vector mosquito *Anopheles stephensi*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(49), E6736–E6743. <https://doi.org/10.1073/pnas.1521077112>
- Macias, V. M., Ohm, J. R., & Rasgon, J. L. (2017). Gene drive for mosquito control: Where did it come from and where are we headed? In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 14, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph14091006>
- Patmawati, D., Mahwati, Y., & Suparni. (2025). Efektivitas Wolbachia Dalam Pengendalian Demam Berdarah Dengue.
- Rachim, W., & Sahariyani, M. (2023). Artikel Review: Pengendalian Vektor Nyamuk Aedes Dengan Resistensi Terhadap Piretroid20230202.
- Reiner, R. C., Perkins, T. A., Barker, C. M., Niu, T., Chaves, L. F., Ellis, A. M., George, D. B., Le Menach, A., Pulliam, J. R. C., Bisanzio, D., Buckee, C., Chiyaka, C., Cummings, D. A. T., Garcia, A. J., Gatton, M. L., Gething, P. W., Hartley, D. M., Johnston, G., Klein, E. Y., ... Smith, D. L. (2013). A systematic review of mathematical models of mosquito-borne pathogen transmission: 1970-2010. In *Journal of the Royal Society Interface* (Vol. 10, Issue 81). Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0921>
- Saraswati, U., Supriyati, E., Rahayu, A., Rovik, A., Kurniasari, I., Hermantara, R., Kumalawati, D. A., Daniwijaya, E. W., Fitriana, I., Pramuko, N. B., Indriani, C., Wardana, D. S., Tantowijoyo, W., Ahmad, R. A., Utarini, A., & Arguni, E. (2023). Assessing the safety of Wolbachia-infected *Aedes aegypti* Linnaeus mosquitoes in Yogyakarta, Indonesia. *Jurnal Entomologi Indonesia*, 20(2), 117–128. <https://doi.org/10.5994/jei.20.2.117>
- Tri Boewono, D., Widyastuti, U., Heryanto, B., & Besar Penelitian dan Januari 2026

Pengembangan Vektor dan Reservoir Penyakit, B. (2012). Pengendalian Vektor Terpadu Pengaruhnya Terhadap Indikator Entomologi Daerah Endemis Malaria Pulau Sebatik, Kabupaten Nunukan Integrated Vector Control Impact On The Entomologycal Indicator Of Malaria Endemic Area, Sebatik Island, Nunukan Regency. In Media Litbang Kesehatan (Vol. 22).

Wang, G. H., Gamez, S., Raban, R. R., Marshall, J. M., Alphey, L., Li, M., Rasgon, J. L., & Akbari, O. S. (2021). Combating mosquito-borne diseases using genetic control technologies. In Nature Communications (Vol. 12, Issue 1). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24654-z>

WHO. (2021). Guidance Framework For Testing Genetically Modified Mosquitoes Second edition.