

PEMODELAN RISIKO EPIDEMI PADA BUDIDAYA MASSAL MAGOT (*HERMETIA ILLUCENS*) MENGGUNAKAN MODEL SIR

Nita Anggriani¹, Lilis Handayani², Ermita³

^{1,3}Jurusan Matematika, Universitas Negeri Manado, Indonesia

²Jurusan Kesehatan Masyarakat, Universitas Samratulagi, Indonesia

nita_anggriani@unima.ac.id¹, lilishandayani@unsrat.ac.id²,

ermita@unima.ac.id.

Received 08 September 2025; revised 24 November 2025; accepted 10 Desember 2025

ABSTRAK

Hermetia illucens atau magot *Black Soldier Fly* (BSF) merupakan serangga yang banyak dibudidayakan karena kemampuannya mengonversi limbah organik menjadi biomassa bernilai ekonomi, namun kepadatan koloni yang tinggi dapat meningkatkan risiko penyebaran penyakit. Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika infeksi pada koloni magot melalui pendekatan pemodelan matematika menggunakan model epidemiologi *Susceptible–Infected–Removed* (SIR). Sistem persamaan diferensial disusun dengan memasukkan parameter laju penularan (β), laju pemulihan atau isolasi (γ), dan laju mortalitas (μ). Simulasi dilakukan pada populasi awal 10.000 larva dengan 100 larva terinfeksi pada hari pertama, serta menguji tiga skenario pengendalian, yaitu tanpa kontrol, peningkatan sanitasi, dan penerapan karantina cepat. Parameter model ditetapkan secara asuntif berdasarkan literatur epidemiologi serangga. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanpa kontrol nilai R_0 sebesar 3,50 menyebabkan wabah menyebar cepat dengan puncak infeksi sekitar 3.600 larva. Skenario sanitasi menurunkan R_0 menjadi 2,00 dengan puncak infeksi sekitar 1.500 larva, sedangkan karantina cepat menurunkan R_0 menjadi 1,40 dan menghasilkan puncak infeksi hanya sekitar 500 larva dengan durasi wabah yang lebih singkat. Temuan ini menunjukkan bahwa sanitasi dan karantina cepat efektif dalam menekan risiko wabah pada budidaya BSF, dengan karantina cepat sebagai strategi paling efisien. Secara teoretis, penelitian ini memberikan kontribusi awal dalam pengembangan pemodelan epidemiologi sederhana untuk mendukung praktik *biosafety* pada industri BSF.

Kata kunci: epidemiologi serangga, *Hermetia illucens*, magot, model SIR, pemodelan matematika.

ABSTRACT

Hermetia illucens, or the Black Soldier Fly (BSF) maggot, is widely cultivated due to its ability to convert organic waste into economically valuable biomass; however, high colony density increases the risk of disease transmission. This study aims to analyze infection dynamics in maggot colonies using a mathematical modeling approach based on the *Susceptible–Infected–Removed*

(SIR) epidemiological model. A system of differential equations was formulated by incorporating transmission rate (β), recovery or isolation rate (γ), and mortality rate (μ). Simulations were conducted on an initial population of 10,000 larvae with 100 infected larvae on the first day, evaluating three control scenarios: no control, improved sanitation, and rapid quarantine. Model parameters were assumed based on insect epidemiology literature. The results show that without control, an R_0 of 3.50 leads to a rapidly spreading outbreak with a peak infection of approximately 3,600 larvae. The sanitation scenario reduces R_0 to 2.00 with a peak of around 1,500 infected larvae, whereas rapid quarantine lowers R_0 to 1.40 and results in only about 500 infected larvae with a shorter outbreak duration. These findings indicate that sanitation measures and rapid quarantine are effective in reducing outbreak risks in BSF cultivation, with rapid quarantine being the most efficient strategy. The study provides an early theoretical contribution to applying simple epidemiological modeling to support biosafety practices in the BSF industry.

Keywords: *Hermetia illucens*, insect epidemiology, maggot, mathematical modeling, SIR model

PENDAHULUAN

Budidaya magot *Black Soldier Fly* (*Hermetia illucens*, BSF) telah berkembang pesat dalam satu dekade terakhir karena potensinya dalam mengolah limbah organik menjadi biomassa berkualitas tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak maupun bahan baku industri ramah lingkungan. Larva BSF mampu mengonversi limbah dengan efisiensi tinggi sehingga sangat relevan dalam mendukung sistem ekonomi sirkular dan pengurangan jejak lingkungan (Mata & Dourado, 2021). Selain itu, budidaya magot juga dinilai berkontribusi dalam ketahanan pangan melalui penyediaan sumber protein alternatif yang berkelanjutan (Gold et al., 2020)

Namun demikian, meningkatnya skala produksi larva BSF di berbagai belahan dunia menimbulkan potensi risiko kesehatan koloni. Meskipun larva BSF dikenal relatif tahan terhadap patogen, berbagai studi telah melaporkan adanya ancaman bakteri, jamur, nematoda, bahkan virus yang dapat menyerang dalam kondisi tertentu, terutama ketika kepadatan populasi tinggi, sanitasi buruk, dan kelembapan lingkungan tidak terkontrol (Joosten et al., 2020). Keberadaan patogen oportunistik tersebut berimplikasi pada turunnya performa pertumbuhan hingga kematian massal larva dalam skala industri (Erickson et al., 2004). Secara visual, larva yang terinfeksi umumnya dapat dikenali dari perubahan warna tubuh yang lebih pucat atau menghitam, pergerakan yang lamban, serta berkurangnya konsumsi

pakan. Ciri-ciri ini menjadi dasar bagi peternak untuk melakukan pemisahan atau karantina larva terinfeksi agar tidak menularkan penyakit ke individu lain.

Berbagai penelitian menyoroti pentingnya aspek mikrobiota usus dan sistem imun alami larva dalam menentukan resistensi terhadap penyakit. Larva BSF menghasilkan peptida antimikroba (AMPs) serta memiliki komunitas mikroba yang membantu menghambat perkembangan patogen. Akan tetapi, interaksi kompleks antara faktor lingkungan, mikrobiota, dan imunitas larva masih belum sepenuhnya dipahami secara kuantitatif (Bloo et al., 2025). Beberapa studi bahkan menegaskan bahwa protokol biosafety yang kurang ketat berpotensi menyebabkan transmisi silang antar batch produksi (Johnson et al., 2019). Kondisi inilah yang menempatkan budidaya massal BSF pada risiko epidemi yang signifikan.

Sejauh ini, penelitian terkait BSF sebagian besar menyoroti aspek kesehatan koloni secara deskriptif atau melalui studi patogen tertentu. Misalnya, Joosten et al., (2020) menekankan pentingnya protokol biosafety dalam mencegah transmisi silang, sementara Johnson et al., (2019) membahas kerangka ekologi dalam penyebaran penyakit pada serangga. Namun, studi-studi tersebut tidak memanfaatkan pendekatan pemodelan matematika untuk mendeskripsikan dinamika epidemi. Padahal, model matematika seperti SIR telah digunakan dalam analisis penyebaran penyakit pada berbagai sistem biologis, termasuk studi yang dilakukan oleh Atzzahra et al., (2021). Inilah yang menjadi celah penelitian dan membedakan studi ini dari penelitian sebelumnya.

Hingga saat ini, studi epidemiologi matematis pada BSF masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian tentang pemodelan penyebaran penyakit berfokus pada manusia, hewan ternak, atau serangga vektor penyakit seperti nyamuk dan lebah (Gougbedjia et al., 2021). Belum ditemukan kajian yang secara spesifik menggunakan model epidemiologi sederhana seperti *Susceptible–Infected–Removed* (SIR) untuk mendeskripsikan dinamika penyakit pada koloni magot (Kalachev et al., 2023). Sifat budidaya magot yang berkoloni padat, kontak antarindividu yang intens, serta risiko paparan substrat limbah berpotensi menjadikan model SIR relevan untuk digunakan sebagai pendekatan awal.

Penelitian ini merupakan salah satu kajian awal yang menerapkan model epidemiologi sederhana, yaitu model SIR, pada budidaya BSF. Kontribusi

penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan kuantitatif untuk menggambarkan dinamika epidemi koloni BSF, yang hingga kini belum banyak dibahas dalam literatur. Hal ini menjadikannya penting, baik dalam memperluas kerangka teoretis epidemiologi serangga non-vektor maupun memberikan dasar praktis bagi pengelolaan kesehatan koloni BSF skala industri (Mata & Dourado, 2021).

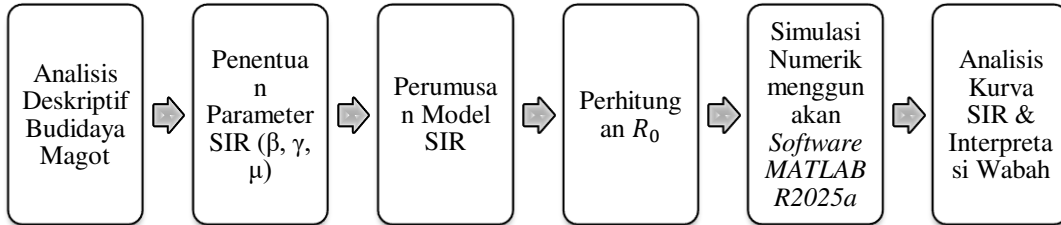
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan model SIR dalam memodelkan penyebaran penyakit pada koloni *Hermetia illucens*. Secara khusus, penelitian ini menganalisis dinamika jumlah larva sehat, terinfeksi, dan dikeluarkan (*removed*), serta menghitung bilangan reproduksi dasar (R_0) sebagai indikator potensi wabah. Hasil dari simulasi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis bagi pengembangan epidemiologi serangga non-vektor dan rekomendasi praktis bagi pengelolaan kesehatan koloni magot dalam sistem budidaya berskala besar. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi acuan awal dalam penerapan model epidemiologi pada sistem budidaya serangga non-vektor.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan analisis deskriptif terhadap kondisi budidaya magot untuk memperoleh informasi terkait populasi larva, tingkat kepadatan, mortalitas harian, serta faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan media pakan. Data biomassa larva sehat (*susceptible*), terinfeksi (*infected*), dan dikeluarkan (*removed*) digunakan sebagai dasar penentuan parameter model. Penggunaan biomassa dipilih karena penghitungan individu larva BSF pada skala budidaya massal tidak praktis akibat ukuran larva yang bervariasi, pergerakan aktif, dan bercampurnya larva dengan media pakan, sehingga berpotensi menimbulkan kesalahan hitung. Biomassa memberikan indikator yang lebih stabil dan representatif terhadap perubahan populasi, serta umum digunakan dalam penelitian dan industri BSF (Padmanabha et al., 2020). Biomassa dari produk sisa yang dihasilkan oleh maggot masih dapat dimanfaatkan sebagai penunjang dalam kegiatan pertanian yang dapat digunakan sebagai pupuk organik dengan istilah

Pemodelan Risiko Epidemi pada Budidaya Massal Magot (*Hermetia Illucens*) Menggunakan Model SIR

kasgot (Setiawan et al., 2024). Oleh karena itu, biomassa dipandang lebih sesuai untuk merepresentasikan dinamika epidemi pada koloni larva berskala besar.



Gambar 1. Alur Penelitian

Pemodelan matematis dilakukan menggunakan pendekatan dengan tiga kompartemen *Susceptible–Infected–Removed* (SIR) dan simulasi numerik menggunakan *Software MATLAB R2025a*. Sistem persamaan diferensial yang digunakan pada model SIR ini adalah:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N} \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - (\gamma + \mu)I \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = (\gamma + \mu)I \quad (3)$$

dengan $N = S + I + R$.

Tabel 1. Definisi Simbol dan Parameter dalam Model SIR

Simbol	Keterangan	Satuan
$S(t)$	Biomassa larva sehat pada waktu t	gram
$I(t)$	Biomassa larva terinfeksi pada waktu t	gram
$R(t)$	Biomassa larva dikeluarkan (mati/isolasi) pada waktu t	gram
β	Laju penularan efektif (tergantung kepadatan & sanitasi)	/hari
γ	Laju pemulihan/isolasi (pengeluaran biomassa terinfeksi)	/hari
μ	Laju mortalitas akibat penyakit (kehilangan biomassa)	/hari
t	Waktu	hari
N	Total biomassa larva ($N = S + I + R$)	gram

Tabel 1 memuat definisi simbol dan parameter pada model. Nilai β , γ , dan μ ditetapkan secara asumptif berdasarkan literatur epidemiologi serangga. Bilangan reproduksi dasar dihitung menggunakan:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma + \mu} \quad (4)$$

Nilai R_0 digunakan untuk menilai potensi timbulnya wabah, dengan kriteria $R_0 > 1$ menunjukkan epidemi dapat berkembang dan $R_0 < 1$ menunjukkan wabah akan mereda.

Tabel 2. Asumsi Parameter untuk Setiap Skenario Simulasi

Skenario	β (per hari)	γ (per hari)	μ (per hari)	Keterangan
Tanpa Kontrol	0,35	0,05	0,05	Kondisi sanitasi buruk, tanpa upaya karantina.
Sanitasi	0,20	0,05	0,05	Kebersihan media ditingkatkan sehingga penularan berkurang.
Karantina cepat	0,35	0,20	0,05	Larva terinfeksi segera dipisahkan sehingga pemulihan/isolasi meningkat.

Nilai parameter pada Tabel 2 ditetapkan secara asumptif dengan mengacu pada literatur epidemiologi serangga serta kondisi umum budidaya magot. Nilai β (0,35/hari) diadaptasi dari studi infeksi pada koloni serangga berpopulasi padat, di mana kepadatan dan sanitasi memengaruhi frekuensi kontak antarindividu (Khan et al., 2023). Nilai γ (0,20/hari) merepresentasikan peningkatan isolasi dalam kondisi karantina cepat, sesuai prinsip pengendalian epidemi pada populasi serangga (Kalachev et al., 2023). Sementara itu, nilai μ (0,05/hari) berasal dari kisaran mortalitas harian yang dilaporkan dalam uji coba budidaya magot dengan sanitasi rendah (Alagappan et al., 2025). Dengan dasar tersebut, skenario tanpa kontrol menggambarkan kondisi paling berisiko karena tingginya peluang penularan. Skenario sanitasi mencerminkan penurunan laju infeksi melalui peningkatan kebersihan media, sedangkan skenario karantina cepat menekankan isolasi larva terinfeksi sehingga penyebaran penyakit dapat ditekan lebih efektif.

Model SIR yang digunakan dalam penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain nilai parameter yang masih bersifat asumptif serta belum mempertimbangkan tahap perkembangan larva, variasi kepadatan koloni, dan kemungkinan infeksi multi-patogen. Oleh karena itu, validasi parameter dengan data lapangan dan pengembangan model lanjutan diperlukan pada penelitian berikutnya.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Simulasi model dilakukan dengan kondisi awal biomassa populasi sebesar 10.000 gram, dengan 100 gram di antaranya diasumsikan terinfeksi pada hari

Pemodelan Risiko Epidemi pada Budidaya Massal Magot (*Hermetia Illucens*) Menggunakan Model SIR

pertama. Dinamika epidemi larva dimodelkan menggunakan sistem Persamaan (1)–(3) pada bagian Metode Penelitian. Tiga skenario simulasi dianalisis, yaitu tanpa kontrol, sanitasi, dan karantina cepat. Berdasarkan persamaan (4) diperoleh hasil sebagai berikut:

- **Tanpa kontrol:**

$$\gamma + \mu = 0.05 + 0.05 = 0.10 \rightarrow R_0 = \frac{0.35}{0.10} = 3.50$$

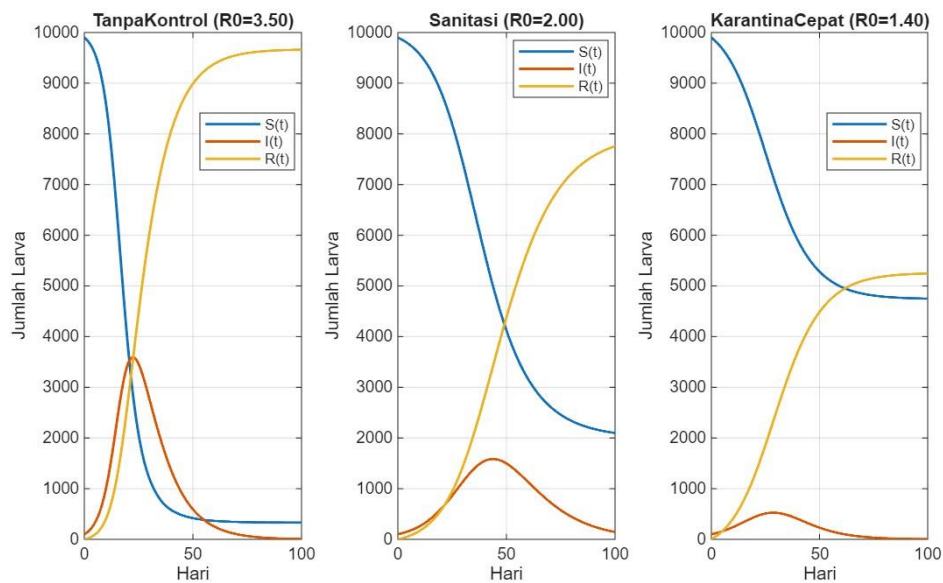
- **Sanitasi:**

$$\gamma + \mu = 0.05 + 0.05 = 0.10 \rightarrow R_0 = \frac{0.20}{0.10} = 2.00$$

- **Karantina Cepat:**

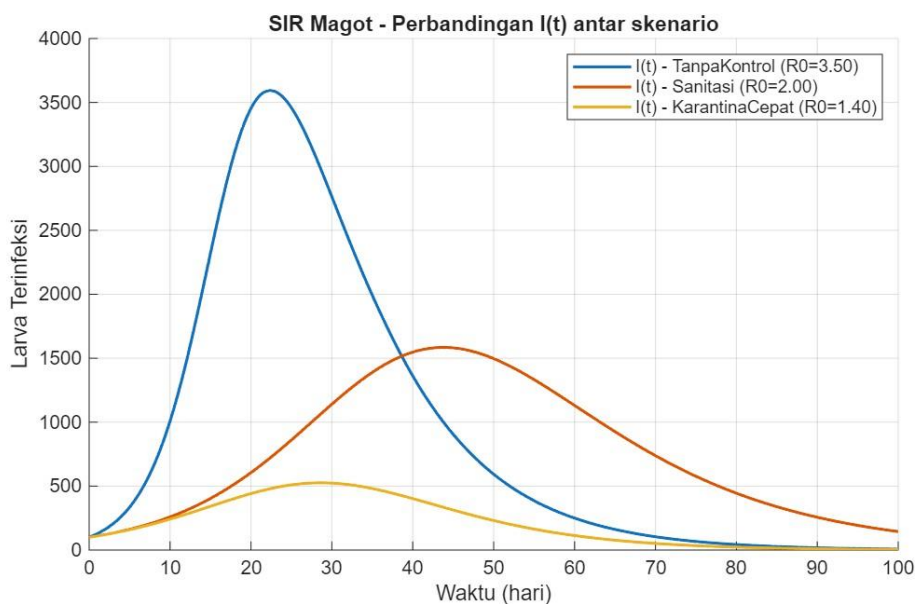
$$\gamma + \mu = 0.20 + 0.05 = 0.25 \rightarrow R_0 = \frac{0.35}{0.25} = 1.40$$

Nilai R_0 ini memberikan gambaran awal mengenai potensi wabah sebelum simulasi numerik dilakukan.



Gambar 1. Kurva SIR (S(t), I(t), R(t)) pada tiga skenario pengendalian budidaya magot BSF

Gambar 1 dihasilkan menggunakan *MATLAB R2025a* yang memperlihatkan dinamika jumlah larva sehat (S), terinfeksi (I), dan dikeluarkan (R) pada masing-masing skenario. Tanpa kontrol, kurva $I(t)$ meningkat sangat cepat, sedangkan jumlah $S(t)$ turun drastis. Pada skenario sanitasi, kurva infeksi lebih landai dan wabah berlangsung lebih lama. Sementara itu, karantina cepat menghasilkan jumlah infeksi yang jauh lebih kecil dan penyebaran mereda lebih



cepat.

Gambar 2. Perbandingan $I(t)$ antar skenario pengendalian

Gambar 2 diolah menggunakan *MATLAB R2025a* memperlihatkan hasil simulasi model SIR pada koloni magot, yang menunjukkan adanya perbedaan dinamika infeksi pada tiga skenario pengendalian. Pada kondisi tanpa kontrol dengan nilai $R_0 = 3,50$, jumlah larva terinfeksi meningkat sangat cepat dan mencapai puncak sekitar 3.600 gram atau 40% dari populasi pada hari ke-20. Setelah itu, jumlah larva terinfeksi menurun drastis dan hampir habis menjelang hari ke-70. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya intervensi, wabah dapat menyebar cepat dan melibatkan sebagian besar populasi. Temuan ini sejalan dengan Joosten et al. (2020) yang menegaskan bahwa lemahnya protokol biosafety meningkatkan risiko transmisi silang pada budidaya BSF (Joosten et al., 2020).

Pada skenario sanitasi dengan nilai $R_0 = 2,00$, laju penularan berkurang sehingga kurva infeksi lebih landai. Puncak infeksi hanya mencapai sekitar 1.500 gram atau 15% dari populasi, terjadi pada hari ke-45, dan penyebaran berlangsung

lebih lama meskipun intensitas wabah lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kebersihan mampu menekan skala infeksi, walaupun wabah tetap bertahan lebih lama. Hasil ini konsisten dengan (Alagappan et al., 2025) yang melaporkan bahwa peningkatan sanitasi media mampu menurunkan kontaminasi mikroba pada koloni BSF (Alagappan et al., 2025).

Pada skenario karantina cepat dengan nilai $R_0 = 1,40$, jumlah larva terinfeksi tidak pernah melebihi 500 gram atau 10% dari populasi, dengan puncak terjadi di sekitar hari ke-30. Wabah mereda lebih cepat dibandingkan dua skenario lainnya, menunjukkan bahwa peningkatan laju pemulihan atau isolasi sangat efektif dalam membatasi penyebaran penyakit. Strategi ini sejalan dengan Kalachev et al. (2023) yang menunjukkan bahwa peningkatan laju isolasi pada individu terinfeksi menurunkan potensi wabah pada model epidemi serangga non-vektor (Kalachev et al., 2023).

Nilai bilangan reproduksi dasar (R_0) menjadi indikator utama keberhasilan strategi pengendalian. Kondisi tanpa kontrol menghasilkan $R_0 \approx 3,5$, menandakan wabah berkembang pesat. Penerapan sanitasi menurunkan nilai β sehingga R_0 turun menjadi sekitar 2,0, sedangkan karantina cepat meningkatkan nilai γ sehingga R_0 turun mendekati 1.

Analisis ini memperlihatkan bahwa kombinasi sanitasi dan isolasi larva terinfeksi jauh lebih efektif dibandingkan jika hanya dilakukan salah satunya. Secara praktis, hasil ini mendukung rekomendasi bagi peternak magot untuk menjaga kebersihan media, mengatur kepadatan larva, serta melakukan pemantauan rutin agar larva yang terinfeksi dapat segera dipisahkan (Surendra et al., 2020). Hal ini juga sejalan dengan tinjauan (Mufungwe et al., 2025) yang menegaskan bahwa produksi massal BSF memiliki risiko epidemi baru yang hanya dapat ditekan melalui manajemen kesehatan koloni yang ketat.

SIMPULAN

Penelitian ini memodelkan penyebaran penyakit pada koloni magot (*Hermetia illucens*) menggunakan model SIR dan menunjukkan bahwa variasi parameter penularan (β) dan pemulihan/isolasi (γ) berpengaruh signifikan

terhadap dinamika wabah. Kondisi tanpa kontrol menghasilkan $R_0 \approx 3,50$, wabah menyebar cepat dengan puncak infeksi sekitar 40% populasi. Peningkatan sanitasi menurunkan β sehingga R_0 menjadi 2,00 dan puncak infeksi turun hingga $\pm 15\%$ populasi. Karantina cepat meningkatkan γ sehingga R_0 mendekati ambang 1 ($\approx 1,40$), menghasilkan puncak infeksi sekitar $\pm 10\%$ populasi dan percepatan peredaan wabah. Temuan ini menegaskan bahwa strategi berbasis sanitasi dan karantina cepat efektif menekan intensitas wabah, dengan karantina cepat paling efisien dalam membatasi jumlah infeksi dan mempercepat pemulihan situasi.

Secara teoretis, penelitian ini merupakan salah satu kajian awal yang menerapkan model epidemiologi sederhana pada budidaya serangga non-vektor. Pendekatan berbasis biomassa memberikan perspektif baru dalam analisis epidemiologi serangga yang dipelihara dalam populasi besar. Secara praktis, temuan ini menegaskan pentingnya sanitasi media, pengaturan kepadatan, dan isolasi cepat larva terinfeksi sebagai strategi utama pengendalian wabah pada sistem budidaya BSF berskala industri. Ke depan, penelitian perlu melakukan validasi parameter dengan data lapangan serta mengembangkan model yang lebih kompleks, seperti SEIR atau multi-patogen, agar estimasi dinamika epidemi semakin akurat dan rekomendasi yang dihasilkan semakin aplikatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan masukan selama proses penelitian serta penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alagappan, S., Dong, A., Hoffman, L., Cozzolino, D., Mantilla, S. O., James, P., Yarger, O., & Mikkelsen, D. (2025). Microbial Safety of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia Illucens*) Reared on Food Waste Streams. *Waste Management*, *194*, 221–227.
- Atzzahra, H., Fitria, I., & Millah, N. (2021). Analisis Sensitivitas pada Model SIR Penyebaran COVID-19. *MUST Journal of Mathematics Education Science and Technology*, *6*(2).
- Blooi, M., Martel, A., Haesebrouck, F., Vercammen, F., Bonte, D., & Pasmans, F. (2025). Treatment of Urodelans Based on Temperature Dependent Infection Dynamics of *Batrachochytrium* Salamandrivorans. *Scientific Report*, *5*.
- Erickson, M. C., Islam, M., Sheppard, C., Liao, J., & Doyle, M. P. (2004).

Pemodelan Risiko Epidemi pada Budidaya Massal Magot (*Hermetia Illucens*) Menggunakan Model SIR

- Reduction of Escherichia Coli O157:H7 and Salmonella Enterica Serovar Enteritidis in Chicken Manure by Larvae of The Black Soldier Fly. *Journal of Food Protection*, 67(4), 685–690.
- Gold, M., Cassar, C. M., Zurbrugg, C., Kreuzer, M., Boulos, S., Diener, S., & Mathys, A. (2020). Biowaste Treatment With Black Soldier Fly Larvae: Increasing Performance Through The Formulation Of Biowastes Based On Protein And Carbohydrates. *Waste Management*, 102, 319–329.
- Gougbedjia, A., Agbohessoub, P., Laleye, P. A., Francisa, F., & Megidoa, R. C. (2021). Technical Basis For The Small-Scale Production Of Black Soldier Fly, *Hermetia Illucens* (L. 1758), Meal As Fish Feed In Benin. *Journal of Agriculture and Food Research*, 4.
- Johnson, E. E., Escobar, L. E., & Zambrana-Torrel, C. (2019). An Ecological Framework for Modeling the Geography of Disease Transmission. *Trends In Ecology & Evolution*, 34(7), 655–668.
- Joosten, L., Lecocq, A., Jensen, A. B., Haenen, O., Schmitt, E., & Eilenberg, J. (2020). Review Of Insect Pathogen Risks For The Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens*) And Guidelines For Reliable Production. *Entomologia Experimentalis et Applicata*.
- Kalachev, L., Landguth, E. L., & Graham, J. (2023). Revisiting Classical SIR mModelling In Light Of The COVID-19 Pandemic. *Infectious Disease Modelling*, 8(1), 72–83.
- Khan, S. A., Kojour, M. A. M., & Han, Y. S. (2023). Recent Trends In Insect Gut Immunity. *Frontiers in Immunology*.
- Mata, A. S., & Dourado, S. M. P. (2021). Mathematical Modeling Applied to Epidemics: An Overview. *São Paulo Journal of Mathematical Sciences*.
- Mufungwe, J., Namukonde, N., Mwaanga, P., Johnson, T., Siamujompa, M., Mwangi, N. C., Ngoma, J., & Hang'ombe, B. M. (2025). Critical Safety Concerns In The Production Of Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens*) Larvae In Africa. *Discover Food*, 5(1).
- Padmanabha, M., Kobelski, A., Hempel, A.-J., & Streif, S. (2020). A Comprehensive Dynamic Growth And Development Model Of *Hermetia Illucens* Larvae. *PLOS One*, 15(9).
- Setiawan, Y., Sarwono, E., & Asghaf, A. T. F. (2024). Analisis Kualitas Kasgot dari Larva Black Soldier Fly (BSF) dengan Menggunakan Sampah Organik Sayur dan Buah di TPS 3R Pasar Segiri, Kota Samarinda. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25.
- Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., Huis, A. van, Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking Organic Wastes Bioconversion: Evaluating The Potential Of The Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117.