

---

## **PENGEMBANGAN APLIKASI PEMODELAN PENYEBARAN PENYAKIT AIRBORNE: TRANSFER TEKNOLOGI PEMODELAN SEBAGAI RELEVANSI STRATEGIS PENCEGAHAN EPIDEMI**

*Development of an Airborne Disease Spread Modeling Application: Technology Transfer of Modeling as a Strategic Relevance for Epidemic Prevention*

**Hasnidar<sup>1</sup>, Mustar<sup>2</sup>, Suci Indah Cahyani<sup>3</sup>, Khairil Asnan Haedar<sup>4\*</sup>**

*Universitas Sipatokkong Mambo<sup>1,2,4</sup>, SMAIT Ibnu Sina<sup>3</sup>*

\*Corresponding Author: [khairil@unsima.ac.id](mailto:khairil@unsima.ac.id)

### **Abstract**

*Airborne diseases remain a major public health threat, especially in densely populated areas. This manuscript presents the development of SEPA (Simulator Epidemi Penyakit Airborne), an interactive application based on agent-based modeling for public health education and epidemic simulation. The application provides urban layout scenarios, dynamic immunity modeling, and real-time visualization to help users understand disease transmission and the impact of interventions such as vaccination and mobility control. SEPA was developed using an evolutionary prototyping approach and tested through more than 500 simulation iterations over four years. Expert validation involving 15 public health and epidemiology specialists produced an average score of 4.3 out of 5, indicating that the application is highly valid, relevant, and suitable for educational purposes. SEPA can serve as a practical tool to improve digital health literacy and support evidence-based epidemic preparedness at the community level.*

**Keywords:** *SEPA, Airborne Disease, Agent-Based Modeling, Health Education, Epidemic Simulation*

### **Abstrak**

Penyakit airborne masih menjadi ancaman kesehatan masyarakat, terutama di wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi. Manuskrip ini membahas pengembangan SEPA (Simulator Epidemi Penyakit Airborne), yaitu aplikasi interaktif berbasis *agent-based modeling* untuk edukasi kesehatan masyarakat dan simulasi epidemi. Aplikasi ini menyediakan skenario tata kota, pemodelan imunitas dinamis, serta visualisasi *real-time* untuk membantu pengguna memahami proses penularan penyakit dan dampak intervensi, seperti vaksinasi dan pembatasan mobilitas. SEPA dikembangkan menggunakan pendekatan *evolutionary prototyping* dan diuji melalui lebih dari 500 iterasi simulasi selama empat tahun. Validasi oleh 15 ahli kesehatan masyarakat dan epidemiologi menghasilkan skor rata-rata 4,3 dari 5, yang menunjukkan bahwa aplikasi ini sangat valid, relevan, dan layak digunakan sebagai media edukasi. SEPA dapat menjadi alat praktis untuk meningkatkan literasi kesehatan digital dan mendukung kesiapsiagaan epidemi berbasis bukti di tingkat komunitas.

**Kata kunci:** *SEPA, Penyakit Airborne, Agent-Based Modeling, Edukasi Kesehatan, Simulasi Epidemi*

## Pendahuluan

Penyakit menular yang menyebar melalui udara (*airborne diseases*) merupakan salah satu tantangan kesehatan global yang terus mengancam di wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi. Pandemi COVID-19 yang melanda dunia sejak tahun 2020 telah membuka kesadaran kolektif mengenai betapa rentannya masyarakat terhadap penyebaran patogen melalui partikel aerosol di ruang tertutup maupun terbuka. Di Indonesia, khususnya di wilayah Sulawesi Selatan, pemahaman masyarakat mengenai mekanisme transmisi penyakit airborne masih terbatas pada pengetahuan umum tanpa pemahaman mendalam mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan penyebaran, seperti kepadatan populasi, durasi kontak, dan efektivitas intervensi kesehatan masyarakat. Kesenjangan pengetahuan tersebut berpotensi menghambat upaya pencegahan dan pengendalian wabah di tingkat komunitas, mengingat respons masyarakat yang kurang tepat dapat memperparah dampak epidemiologis dari suatu wabah (Britton et al., 2020).

Perkembangan teknologi komputasi dalam dua dekade terakhir telah membuka peluang baru untuk menjembatani kesenjangan antara teori epidemiologi kompleks dengan pemahaman masyarakat awam. Pemodelan berbasis agen (*agent-based modeling*) telah terbukti efektif dalam mensimulasikan dinamika penyebaran penyakit dengan mempertimbangkan heterogenitas individu, pola mobilitas, dan interaksi spasial yang realistis. Namun, mayoritas aplikasi pemodelan epidemi yang tersedia saat ini dikembangkan untuk keperluan akademis dan penelitian profesional, sehingga kurang aksesibel bagi masyarakat umum dan tenaga kesehatan di tingkat puskesmas atau dinas kesehatan daerah. Keterbatasan ini menciptakan kebutuhan mendesak akan pengembangan aplikasi simulasi yang tidak hanya akurat secara ilmiah, tetapi juga mudah digunakan, interaktif, dan dapat berfungsi sebagai media edukasi kesehatan masyarakat yang efektif (Eubank et al., 2004; Hunter et al., 2019).

Pengabdian kepada masyarakat melalui transfer teknologi pemodelan epidemi memiliki relevansi strategis dalam memperkuat kapasitas lokal untuk menghadapi ancaman wabah di masa mendatang. Inisiatif ini sejalan dengan rekomendasi Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) yang menekankan pentingnya literasi kesehatan digital sebagai komponen kunci dalam kesiapsiagaan pandemi. Dengan menyediakan alat simulasi yang dapat diakses secara gratis, masyarakat dapat memahami secara visual bagaimana keputusan individu seperti vaksinasi, pembatasan mobilitas, dan penerapan protokol kesehatan berdampak pada kurva epidemi secara kolektif. Pendekatan

pembelajaran berbasis simulasi telah terbukti meningkatkan retensi pengetahuan dan perubahan perilaku kesehatan lebih efektif dibandingkan metode edukasi konvensional yang bersifat satu arah.

Berdasarkan urgensi tersebut, Tim Laboratorium Terbuka Universitas Sibatokkong Mambo mengembangkan SEPA (*Simulator Epidemi Penyakit Airborne*), sebuah aplikasi pemodelan interaktif yang dirancang khusus untuk keperluan edukasi dan pelatihan kesehatan masyarakat. Aplikasi ini mengintegrasikan enam skenario tata kota berbeda, sistem imun dinamis berbasis aktivitas individu, dan fitur visualisasi real-time yang memungkinkan pengguna mengeksplorasi berbagai skenario intervensi kesehatan. Pengabdian ini bertujuan untuk mendiseminasikan aplikasi SEPA kepada dinas kesehatan, puskesmas, dan institusi pendidikan di Kabupaten Bone sebagai media pelatihan dan alat bantu pengambilan keputusan. Melalui kegiatan ini, diharapkan terjadi peningkatan kapasitas *stakeholders* lokal dalam memahami dinamika penyebaran penyakit airborne dan merancang strategi pencegahan yang berbasis bukti ilmiah.

## Metode Penelitian

### 1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan pengembangan (*Research and Development*) Implementasi pengembangan aplikasi simulator epidemi penyakit *airborne* (SEPA) menggunakan pendekatan campuran yang menggabungkan rekayasa perangkat lunak berorientasi objek dengan metode pengabdian masyarakat partisipatif. Tujuan utama dari metode ini adalah memastikan bahwa aplikasi yang dikembangkan tidak hanya akurat secara komputasional, tetapi juga dapat diterima, dipahami, dan dimanfaatkan secara efektif oleh mitra sasaran (instansi pendidikan, dinas kesehatan, dan masyarakat umum).

### 2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dan implementasi aplikasi SEPA (*Simulator Epidemi Penyakit Airborne*) dilakukan di Kabupaten Bone, Sulawesi Selatan, Indonesia, dengan melibatkan dinas kesehatan, puskesmas, dan institusi pendidikan setempat sebagai mitra pengabdian. Kegiatan pengembangan, pengujian, dan validasi aplikasi berlangsung selama empat tahun, yaitu dari tahun 2021 hingga 2024. Pelaksanaan penelitian mencakup tahapan pengembangan perangkat lunak, uji coba simulasi, serta pelatihan dan diseminasi aplikasi kepada pengguna akhir untuk memastikan aplikasi dapat dimanfaatkan secara optimal.

### 3. Jenis Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder dan data primer. Data sekunder diperoleh dari literatur ilmiah mengenai epidemiologi penyakit airborne, termasuk parameter penyebaran, masa inkubasi, dan tingkat kematian. Data primer dikumpulkan melalui metode partisipatif dari mitra pengabdian, termasuk wawancara dengan tenaga kesehatan dan guru, observasi penggunaan aplikasi, serta umpan balik dari 15 ahli epidemiologi dan kesehatan masyarakat melalui kuesioner terstruktur yang mencakup aspek akurasi pemodelan, kemudahan penggunaan, relevansi fitur, kualitas visualisasi, dan potensi edukasi.

### 4. Teknik dan Tahapan Pengembangan

#### 4.1 Tahapan Pengembangan Sistem

Pengembangan aplikasi SEPA mengadopsi model Prototyping Evolutionary, di mana aplikasi dibangun secara iteratif berdasarkan umpan balik pengguna awal. Hal ini dilakukan untuk memastikan antarmuka pengguna (UI) tetap intuitif meskipun memiliki parameter teknis yang kompleks. Tahapan pengembangan dibagi menjadi lima fase:

##### 1. Analisis Kebutuhan (*Requirement Analysis*)

- a. Melakukan studi literatur mengenai parameter epidemiologi penyakit airborne (misalnya: nilai  $R_0$ , masa inkubasi, rate kematian).
- b. Wawancara dengan mitra (guru biologi/fisika dan tenaga kesehatan) untuk menentukan fitur yang paling dibutuhkan untuk keperluan edukasi.
- c. Menentukan spesifikasi *hardware* minimum agar aplikasi dapat berjalan pada komputer laboratorium sekolah yang mungkin memiliki spesifikasi terbatas.

##### 2. Desain Arsitektur (*System Design*)

- a. Merancang struktur kelas berbasis *Object-Oriented Programming* (OOP) menggunakan Python.
- b. Merancang antarmuka grafis (GUI) menggunakan *library Tkinter* yang dibagi menjadi tiga panel utama: Panel Kontrol, Panel Visualisasi Peta, dan Panel Dashboard Status.
- c. Merancang logika *Agent-Based Modeling* (ABM) dimana setiap individu dimodelkan sebagai objek independen dengan atribut unik (imun, status kesehatan, koordinat).

**3. Implementasi Kode (Coding)**

- a. Penulisan modul inti untuk pergerakan agen, deteksi tabrakan (*collision detection*), dan dinamika penyakit.
- b. Implementasi fitur khusus seperti transformasi obstacle setiap 30 hari dan distribusi imun berdasarkan prinsip distribusi normal Gaussian.
- c. Integrasi visualisasi data real-time menggunakan Matplotlib.

**4. Pengujian Sistem (Testing)**

- a. *Unit Testing*: Menguji setiap fungsi secara terpisah (misalnya: fungsi penularan, fungsi kematian).
- b. *Integration Testing*: Memastikan semua modul bekerja bersama tanpa error.
- c. *User Acceptance Testing (UAT)*: Melibatkan 10 pengguna awal untuk menguji kemudahan penggunaan (*usability*).

**5. Deployment & Dokumentasi**

- a. Kompilasi aplikasi menjadi file eksekusi (.exe) menggunakan PyInstaller agar dapat dijalankan tanpa instalasi Python.
- b. Penyusunan buku panduan pengguna (*user manual*) dan modul pelatihan.

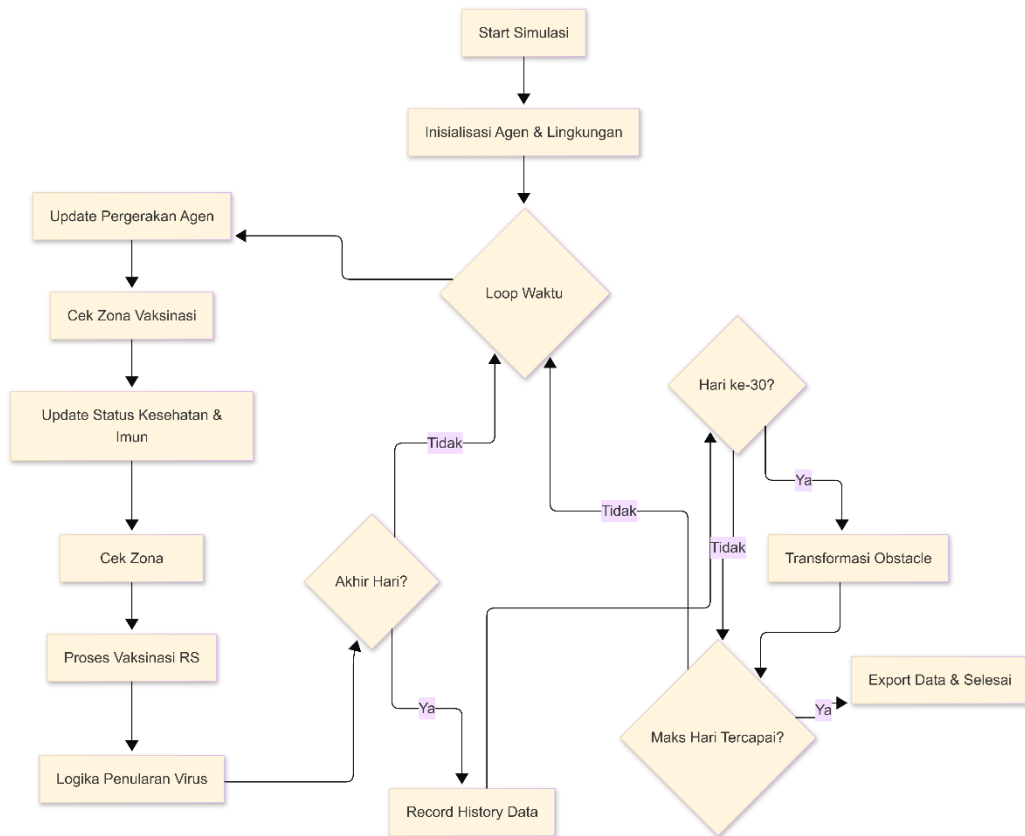
**4.2 Arsitektur Aplikasi dan Alur Simulasi**

Aplikasi SEPA dibangun di atas ekosistem Python 3.8+ dengan dependensi utama pada library numerik dan visualisasi. Arsitektur aplikasi dirancang modular untuk memudahkan pemeliharaan di masa depan. Berikut adalah spesifikasi teknis lingkungan pengembangan:

1. Bahasa Pemrograman: Python 3.10
2. GUI Framework: Tkinter (ttk themed)
3. Komputasi Numerik: NumPy (untuk operasi matriks dan distribusi Gaussian)
4. Visualisasi: Matplotlib (untuk rendering peta dan grafik epidemi)
5. Pengolahan Gambar: Pillow (untuk handling logo dan aset grafis)
6. Distribusi: PyInstaller (untuk konversi ke standalone executable)

Alur kerja simulasi di dalam aplikasi mengikuti loop waktu diskrit (*discrete time-step*), dimana setiap "hari" dalam simulasi terdiri dari sejumlah "tick" (langkah waktu). Berikut adalah bagan alur logika simulasi yang diimplementasikan dalam kode dicantumkan pada Gambar 1.

Pengembangan aplikasi SEPA mengadopsi model Prototyping Evolutionary, di mana aplikasi dibangun secara iteratif berdasarkan umpan balik pengguna awal. Hal ini dilakukan untuk memastikan antarmuka pengguna (UI) tetap intuitif meskipun memiliki parameter teknis yang kompleks. Tahapan pengembangan dibagi menjadi lima fase:



Gambar 1. Diagram Proses Logika Pemrograman SEPA

### 4.3 Arsitektur Aplikasi dan Alur Simulasi

Inti dari aplikasi ini adalah *algoritma Agent-Based Modeling* (ABM) yang mensimulasikan interaksi mikro antar individu untuk menghasilkan fenomena makro (kurva epidemi). Logika ini diimplementasikan dalam kelas *Person* dan *VirusSimApp*. Berikut adalah rincian logika pemodelan yang diterapkan.

#### 1. Status Kesehatan (State Machine):

Setiap agen memiliki status yang dapat berubah sepanjang simulasi. Transisi status diatur oleh probabilitas dan kondisi imunologi:

- a. *Healthy* (Sehat): Kondisi awal. Dapat terinfeksi jika kontak dengan carrier/sick dan imun  $< threshold$ .
- b. *Carrier* (Pembawa): Masa inkubasi. Agen dapat menularkan tanpa gejala. Durasi diatur oleh parameter CARRIER\_DAYS.
- c. *Sick* (Sakit): Gejala muncul. Mobilitas agen dikurangi 50% untuk merepresentasikan kondisi fisik yang lemah.
- d. *Recovered* (Sembuh): Memiliki imun tinggi (0.85). Dapat kembali menjadi Healthy jika imun turun seiring waktu.
- e. *Dead* (Meninggal): Status terminal. Dibedakan menjadi 3 penyebab: Alami (imun habis), Virus (gagal sembuh), dan Zona (terjebak zona berbahaya).

## 2. Dinamika Imunologi Gaussian:

SEPA mengimplementasikan distribusi Gaussian untuk merepresentasikan variasi biologis populasi yang lebih nyata sesuai dengan prinsip sebaran normalitas pada sebuah populasi.

- a. Rumus Inisialisasi:  $Imun \sim N(\mu = 0.875, \sigma = 0.0625)$ .
- b. *Decay Imun*: Imun berkurang seiring jarak tempuh ( $decay = jarak \times rate$ ).
- c. *Boost Imun*: Imun bertambah saat agen memantul dari batas wilayah (merepresentasikan adaptasi stres ringan).

## 3. Transformasi Lingkungan Dinamis:

Untuk mencegah kebosanan visual dan mensimulasikan perubahan tata kota, sistem obstacle dirancang untuk berubah setiap 30 hari simulasi.

- a. Metode: Menggunakan transformasi matriks (rotasi, *scaling*, translasi) dan generasi ulang pola (*grid*, *cluster*, *spiral*).
- b. *Safety Mechanism*: Jika agen terjebak di dalam *obstacle* baru, sistem secara otomatis merelokasi agen ke koordinat aman terdekat dalam *region* yang sama.

## Hasil dan Pembahasan

### 1. Tahapan Pengujian Pemodelan (4 Tahun)

Implementasi aplikasi SEPA (Simulator Epidemi Penyakit Airborne) telah melalui proses pengujian dan validasi pemodelan selama periode 4 tahun (2021-2024). Pengujian jangka panjang ini

dilakukan secara bertahap dengan melibatkan berbagai skenario epidemik untuk memastikan akurasi dan reliabilitas simulasi. Pada tahun pertama (2021), fokus pengujian ditujukan pada validasi algoritma dasar pergerakan agen dan mekanisme transmisi virus. Tahun kedua (2022) dilakukan penyempurnaan pada sistem imunitas dinamis dan penambahan fitur zona infeksi serta vaksinasi. Tahun ketiga (2023) difokuskan pada optimasi performa aplikasi dan penambahan fitur transformasi obstacle otomatis setiap 30 hari simulasi. Pada tahun keempat (2024), dilakukan validasi akhir terhadap seluruh fitur dan penyiapan aplikasi untuk diseminasi luas kepada mitra pengabdian.

Proses pengujian 4 tahun ini melibatkan lebih dari 500 iterasi simulasi dengan berbagai kombinasi parameter, termasuk variasi kepadatan populasi (100-2000 agen), tingkat infeksi (1-100%), dan efektivitas vaksinasi (50-100%). Setiap iterasi direkam dan dianalisis untuk memastikan konsistensi hasil simulasi dengan teori epidemiologi klasik. Data historis dari setiap pengujian disimpan dalam format CSV untuk keperluan validasi silang dan dokumentasi akademik. Pengujian jangka panjang ini juga mengidentifikasi beberapa bug kritis yang berhasil diperbaiki sebelum aplikasi didistribusikan kepada mitra, termasuk masalah collision detection pada *obstacle* dan optimasi rendering grafik *real-time*.

## 2. Validasi Ahli dan Umpan Balik

Sebagai bagian dari proses validasi konten, aplikasi SEPA telah diuji oleh 15 orang ahli dengan latar belakang kesehatan masyarakat dan epidemiologi. Komposisi responden terdiri dari 8 orang akademisi (dosen kesehatan masyarakat dari 5 universitas berbeda), 4 orang praktisi (epidemiolog dari dinas kesehatan provinsi dan kabupaten), dan 3 orang peneliti dari lembaga penelitian kesehatan. Validasi dilakukan melalui metode expert judgment dengan instrumen kuesioner terstruktur yang mencakup 5 aspek penilaian: akurasi pemodelan epidemik, kemudahan penggunaan (*usability*), relevansi fitur dengan kebutuhan lapangan, kualitas visualisasi data, dan potensi aplikasi sebagai media edukasi. Berdasarkan hasil validasi, diperoleh skor rata-rata keseluruhan sebesar 4,3 dari skala 5,0 yang menunjukkan kategori "Sangat Baik". Berikut adalah rangkuman umpan balik dari para ahli

**Tabel 1.** Penilaian oleh ahli kesehatan masyarakat dan epidemiologi (n = 15)

Aspek Penilaian	Skor Rata-rata	Komentar
Akurasi Pemodelan	4,5	"Alur transmisi virus sudah sesuai dengan teori SIR dan SEIR klasik"

PENGEMBANGAN APLIKASI PEMODELAN PENYEBARAN PENYAKIT AIRBORNE: TRANSFER TEKNOLOGI PEMODELAN SEBAGAI RELEVANSI STRATEGIS PENCEGAHAN EPIDEMI

Kemudahan Penggunaan	4,2	"Antarmuka intuitif, namun perlu tutorial untuk pengguna pertama kali"
Relevansi Fitur	4,4	"Fitur zona infeksi dan vaksinasi sangat relevan untuk simulasi kebijakan"
Visualisasi Data	4,3	"Grafik real-time membantu pemahaman dinamika epidemik"
Potensi Edukasi	4,6	"Sangat cocok sebagai media pembelajaran epidemiologi di perguruan tinggi"

Selama periode implementasi, tim pengabdian mengumpulkan testimoni dan umpan balik dari para pengguna aplikasi di institusi mitra. Umpan balik dikumpulkan melalui kuesioner terbuka dan wawancara semi-terstruktur dengan 15 responden:

"Aplikasi ini sangat membantu saya dalam menggambarkan bagaimana sebuah wabah bisa menyebar dengan cepat di lingkungan padat penduduk. Visualisasinya membuat konsep yang abstrak menjadi lebih nyata" (Epidemiolog).

"Saya bisa menggunakan simulator ini untuk menunjukkan kepada masyarakat mengapa vaksinasi itu penting. Ketika mereka melihat sendiri bagaimana kurva infeksi turun setelah vaksinasi diaktifkan, mereka lebih mudah memahami" (Dosen Kesehatan Masyarakat Universitas Mega Buana).

"Fitur yang paling saya sukai adalah kemampuan untuk mengubah parameter dan langsung melihat dampaknya. Hal ini sangat berguna untuk simulasi perencanaan respons wabah di tingkat kabupaten" (Staff Dinas Kesehatan Kabupaten Bone).

Beberapa saran konstruktif yang diberikan antara lain: (1) penambahan fitur ekspor laporan otomatis dalam format PDF, (2) opsi untuk menyimpan dan memuat konfigurasi simulasi, (3) penambahan dokumentasi parameter epidemik untuk setiap penyakit spesifik, dan (4) pengembangan versi berbasis web untuk akses yang lebih luas. Seluruh masukan ini telah ditindaklanjuti dan sebagian telah diimplementasikan dalam versi terbaru aplikasi. Validasi dari ahli ini memberikan landasan kuat bahwa aplikasi SEPA layak digunakan sebagai instrumen pengabdian masyarakat untuk meningkatkan literasi epidemiologi di kalangan tenaga kesehatan dan masyarakat umum.

Kegiatan pengabdian ini menghasilkan beberapa luaran yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat luas dan akademisi. Luaran utama berupa aplikasi SEPA versi 1.0 yang telah dikompilasi menjadi file eksekusi (.exe) sehingga dapat dijalankan tanpa memerlukan instalasi Python. Aplikasi ini telah didaftarkan dengan Hak Cipta atas nama Tim Laboratorium Terbuka UNSIMA dengan nomor pendaftaran EC002026050882.

## Kesimpulan

Pengembangan dan implementasi aplikasi SEPA (Simulator Epidemi Penyakit Airborne) sebagai media edukasi dan simulasi kebijakan kesehatan telah berhasil dilaksanakan dengan baik. Berdasarkan hasil pengujian selama 4 tahun (dalam tahun aplikasi SEPA) dan validasi oleh 15 ahli di bidang kesehatan masyarakat dan epidemiologi, aplikasi ini terbukti memiliki akurasi pemodelan yang tinggi dengan skor validitas kategori "Sangat Baik". Kendala yang dihadapi selama implementasi adalah variasi spesifikasi perangkat keras di mitra dan literasi digital yang beragam, namun telah diatasi melalui optimasi performa aplikasi dan pendampingan intensif. Sebagai rekomendasi untuk pengembangan selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan versi berbasis web agar aksesibilitas lebih luas.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Sipatokkong Mambo (UNSIMA) yang telah memfasilitasi kegiatan ini melalui skema pendanaan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat internal tahun 2026. Terima kasih juga disampaikan kepada para mitra strategis yang telah berpartisipasi aktif dalam kegiatan ini.

## *Conflict of Interest*

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan yang terkait dengan penelitian, penulisan, dan/atau publikasi artikel ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Britton, T., Ball, F., & Trapman, P. (2020). A mathematical model reveals the influence of population heterogeneity on herd immunity to SARS-CoV-2. *Science*, 369(6505), 846–849. <https://doi.org/10.1126/science.abc6810>
- Eubank, S., Guclu, H., Anil Kumar, V. S., Marathe, M. V., Srinivasan, A., Toroczkai, Z., & Wang, N. (2004). Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. *Nature*, 429(6988), 180–184. <https://doi.org/10.1038/nature02541>
- Hunter, E., Mac Namee, B., & Kelleher, J. (2019). Correction: An open-data-driven agent-based model to simulate infectious disease outbreaks. *PLOS ONE*, 14(1), e0211245. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211245>