

Analisis Komparatif Model SARIMA, ETS, dan NNETAR dalam Memperkirakan Angka Kematian Global Akibat Malaria

Khoirun Nisa¹, Aisyah Affandi²

^{1,2}Universitas Pertahanan Republik Indonesia

¹niisaak133@gmail.com

ABSTRAK

Malaria masih menjadi tantangan kesehatan global yang signifikan, dengan pola kematian yang menunjukkan dinamika temporal yang beragam antarwilayah. Oleh karena itu, pemodelan runtun waktu yang akurat diperlukan untuk mendukung perencanaan intervensi berbasis bukti. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja model Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), Error-Trend-Seasonality (ETS), dan Neural Network Autoregressive (NNETAR) dalam meramalkan kematian malaria secara global dan regional. Data kematian malaria bulanan periode 2000–2024 dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif runtun waktu. Tahapan analisis meliputi pra-pemrosesan data, uji stasioneritas, identifikasi dan estimasi model, serta evaluasi kinerja menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) pada data validasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdapat satu model yang unggul secara universal. Model NNETAR memberikan akurasi terbaik pada wilayah dengan volatilitas tinggi dan pola non-linear, khususnya Afrika dan Asia Tenggara. Model SARIMA lebih optimal pada wilayah dengan pola musiman yang kuat seperti Pasifik Barat, sedangkan ARIMA cukup representatif untuk wilayah dengan tren yang relatif stabil. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan model berbasis karakteristik data regional serta membuka peluang pengembangan pendekatan pemodelan hibrida untuk meningkatkan akurasi peramalan kematian malaria.

Kata Kunci: malaria mortality; time series forecasting; SARIMA; ETS; NNETAR

ABSTRACT

Malaria masih menjadi tantangan kesehatan global yang signifikan, dengan pola kematian yang menunjukkan dinamika temporal yang beragam antarwilayah. Oleh karena itu, pemodelan runtun waktu yang akurat diperlukan untuk mendukung perencanaan intervensi berbasis bukti. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja model Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), Error-Trend-Seasonality (ETS), dan Neural Network Autoregressive (NNETAR) dalam meramalkan kematian malaria secara global dan regional. Data kematian malaria bulanan periode 2000–2024 dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif runtun waktu. Tahapan analisis meliputi pra-pemrosesan data, uji stasioneritas, identifikasi dan estimasi model, serta evaluasi kinerja menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) pada data validasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdapat satu model yang unggul secara universal. Model NNETAR memberikan akurasi terbaik pada wilayah dengan volatilitas tinggi dan pola non-linear, khususnya Afrika dan Asia Tenggara. Model SARIMA lebih optimal pada wilayah dengan pola musiman yang kuat seperti Pasifik Barat, sedangkan ARIMA cukup representatif untuk wilayah dengan tren yang relatif stabil. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan model berbasis karakteristik data regional serta membuka peluang pengembangan pendekatan pemodelan hibrida untuk meningkatkan akurasi peramalan kematian malaria.

Keywords: kematian malaria; peramalan runtun waktu; SARIMA; ETS; NNETAR

PENDAHULUAN

Malaria tetap menjadi salah satu tantangan utama kesehatan masyarakat global, khususnya di wilayah tropis dan subtropis. Penyakit yang disebabkan oleh parasit *Plasmodium* dan ditularkan melalui gigitan nyamuk *Anopheles* betina ini tidak hanya berdampak pada sektor kesehatan, tetapi juga mempengaruhi produktivitas ekonomi dan ketahanan sosial komunitas di wilayah endemis (Ipa et al., 2020). Di daerah dengan kondisi lingkungan yang mendukung perkembangbiakan vektor, seperti kawasan terpencil dan perbatasan, malaria bahkan dapat mempengaruhi stabilitas nasional dan kesiapan pertahanan suatu negara (Djaafara et al., 2025). Oleh karena itu, upaya pengendalian malaria yang efektif memerlukan pemahaman komprehensif mengenai karakteristik penularan dan tren temporal penyakit dari waktu ke waktu (Hanandita & Tampubolon, 2016).

Keprihatinan global ini tercermin dari data terbaru yang menunjukkan bahwa malaria masih menjadi ancaman kesehatan yang signifikan. Laporan Malaria Dunia 2024 mencatat sekitar 249 juta kasus malaria terjadi di seluruh dunia, dengan angka kematian mencapai lebih dari 600.000 jiwa, terutama terkonsentrasi di kawasan Afrika dan Asia Tenggara (Tetteh, Djisse & Manyeh, 2023). Meskipun berbagai upaya pengendalian telah berhasil menekan angka kesakitan malaria secara global dalam dua dekade terakhir, fluktuasi jumlah kematian masih menunjukkan pola yang beragam antar wilayah. Data historis menunjukkan penurunan kematian malaria yang konsisten di sebagian besar region seperti Asia Tenggara dan Mediterania Timur, sementara penurunan di kawasan Afrika berlangsung lebih lambat dengan kecenderungan yang kurang stabil (WHO, 2023). Fluktuasi ini mengindikasikan perlunya pendekatan analitis yang mampu mengidentifikasi pola temporal untuk mendukung kebijakan eliminasi malaria yang berkelanjutan (Aisyah et al., 2024).

Dalam penelitian ini, pendekatan statistik modern berbasis analisis runtun waktu menawarkan metode yang relevan untuk mengkaji pola dan tren penyakit menular. Model Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) yang dikembangkan oleh Box dan Jenkins telah banyak digunakan untuk menganalisis dinamika temporal data dari waktu ke waktu (Pradana, 2025). Model ini telah diterapkan secara luas dalam berbagai studi epidemiologi, termasuk prediksi kasus influenza (Tsan et al., 2022), tuberculosis (Setyabudi et al., 2025), dan COVID-19 (Arya, Asrul & Soebroto, 2023). Ketika diterapkan pada data malaria, model ARIMA berpotensi memberikan gambaran komprehensif mengenai fluktuasi kematian dan memfasilitasi peramalan di masa depan. Namun, mengingat angka kematian malaria sering kali dibentuk oleh pola musiman dan perilaku non-linear, penelitian ini juga menginkorporasikan model ETS (Agaj et al., 2024) dan NNETAR (Agaj et al., 2024) sebagai pendekatan komparatif untuk menilai peningkatan akurasi dan stabilitas prediktif (Id et al., 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan tren kematian malaria global menggunakan pendekatan Seasonal ARIMA, ETS, dan NNETAR berdasarkan data historis tahunan 2000-2020. Analisis melibatkan beberapa tahapan, termasuk eksplorasi data, identifikasi model, estimasi parameter, dan evaluasi kinerja model menggunakan metrik error seperti Root Mean Square Error (RMSE) (Hodson, 2022) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) (Arleth et al., 2024). Hasil penelitian diharapkan dapat menggambarkan secara akurat dinamika kematian malaria global dan memberikan landasan

ilmiah untuk perencanaan intervensi dan pengambilan kebijakan dalam program eliminasi malaria, khususnya dalam mengalokasikan sumber daya ke wilayah dengan beban tertinggi. Selain itu, penelitian ini mengevaluasi kinerja ketiga pendekatan peramalan tersebut untuk mengidentifikasi model yang paling efektif dalam merepresentasikan tren kematian malaria di tingkat global dan regional.

Untuk memberikan narasi yang jelas mengenai proses penelitian, makalah ini diawali dengan pembahasan mengenai latar belakang, literatur terkait, serta tujuan dan pertimbangan metodologis penelitian. Bagian selanjutnya mendeskripsikan sumber data, prosedur analitis, dan kriteria yang digunakan untuk mengidentifikasi model peramalan yang optimal. Bagian-bagian berikutnya menyajikan formulasi matematis dari model ARIMA disertai dengan hasil estimasi dan representasi visual, dilengkapi dengan evaluasi komparatif terhadap pendekatan Seasonal ARIMA, ETS, dan NNETAR yang diterapkan dalam penelitian ini. Pembahasan kemudian menafsirkan hasil pemodelan tersebut dalam kaitannya dengan pola kematian malaria yang diamati, sementara bagian penutup menyintesis temuan utama dan menguraikan arahan potensial untuk investigasi di masa depan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan penetapan desain penelitian yang bersifat kuantitatif komparatif menggunakan data runtun waktu sekunder. Pendekatan ini digunakan untuk membandingkan kinerja tiga model SARIMA, ETS, dan NNETAR dalam memodelkan insiden malaria. Setelah menentukan desain, penelitian berlanjut pada pengumpulan data sekunder berupa jumlah kasus malaria per 100.000 penduduk yang diperoleh dari Gapminder atau WHO. Data tersebut memiliki frekuensi bulanan dan mencakup periode 2000 hingga 2024, sehingga memungkinkan analisis jangka panjang terhadap dinamika penyakit.

Tahapan berikutnya adalah pra-pemrosesan data, yang dilakukan secara sistematis mulai dari proses impor, normalisasi nama kolom, identifikasi variabel waktu, hingga pembuatan indeks waktu sintetik bila tidak tersedia. Setiap nilai yang hilang ditangani melalui interpolasi linier, dan data kemudian dikonversi menjadi objek time series dengan frekuensi bulanan. Pada tahap ini juga dilakukan eksplorasi awal melalui visualisasi, dekomposisi, serta analisis pola musiman dan tren.

Selanjutnya dilakukan uji stasioneritas menggunakan ADF test. Apabila hasil pengujian menunjukkan bahwa data belum stasioner, maka dilakukan proses diferensiasi baik secara reguler ataupun musiman hingga kondisi stasioner tercapai. Data yang sudah stasioner kemudian digunakan dalam tahap pembagian dataset menjadi data latih dan data uji, di mana dua tahun terakhir dialokasikan untuk proses validasi model. Tahap pengembangan model mencakup penyusunan tiga model utama, yaitu SARIMA melalui fungsi `auto.arima` dengan optimasi AICc, ETS melalui pemilihan otomatis struktur `error-trend-seasonality`, serta NNETAR dengan pelatihan berulang sebanyak 30 kali untuk meningkatkan stabilitas model. Masing-masing model menghasilkan prediksi untuk 24 bulan ke depan. Hasil prediksi ini kemudian dievaluasi menggunakan metrik RMSE dan MAPE untuk membandingkan akurasi ketiga model. Hasil evaluasi dirangkum dalam sebuah tabel komparatif.

Untuk mendukung interpretasi, berbagai visualisasi disusun, meliputi plot runtun waktu, pola musiman tahunan, histogram distribusi data, grafik ACF/PACF, serta plot perbandingan hasil peramalan ketiga model terhadap data aktual. Seluruh output termasuk tabel metrik, hasil prediksi, dan objek model disimpan dalam format CSV dan RDS sebagai dokumentasi dan untuk memudahkan replikasi. Pemilihan model terbaik dilakukan berdasarkan nilai RMSE dan MAPE terendah serta hasil uji diagnostik residual yang memenuhi karakteristik white noise melalui Ljung–Box test. Akhirnya, penelitian ini diharapkan menghasilkan tabel perbandingan akurasi, grafik visualisasi peramalan, ringkasan parameter setiap model, dan rekomendasi model paling efektif untuk meramalkan kasus malaria di masa depan.

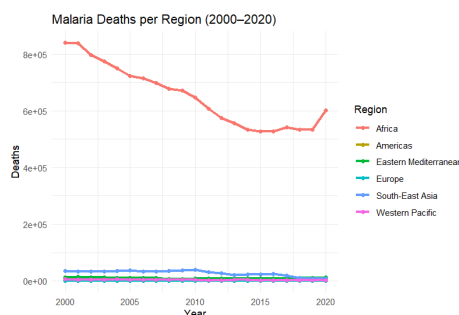
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil eksplorasi data runtun waktu kematian akibat malaria, pemodelan menggunakan pendekatan ARIMA, SARIMA, dan NNETAR Autoregressive (NNETAR), serta evaluasi kinerja masing-masing model pada tingkat global dan regional yang akan dijelaskan sebagai berikut.

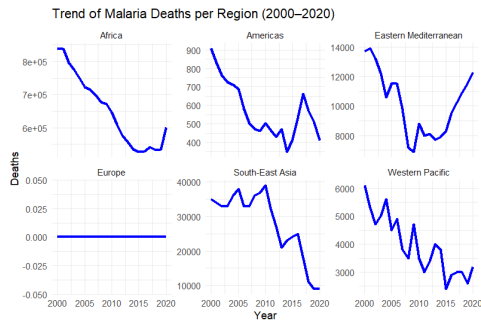
Analisis Karakteristik Data dan Tren Visual Kematian Malaria

Hasil penelitian menyajikan data dari hasil pemodelan yang telah diperoleh serta analisisnya dalam bentuk narasi yang lengkap. Eksplorasi data runtun waktu (*time series*) yang divisualisasikan pada Gambar 1 hingga Gambar 14 memberikan gambaran komprehensif mengenai dinamika kematian akibat malaria dari tingkat global hingga regional. Seluruh visualisasi tersebut disusun berdasarkan data bulanan periode 2000 hingga 2024 untuk tingkat global dan enam kawasan WHO, yaitu Afrika, Amerika, Mediterania Timur, Eropa, Asia Tenggara, dan Pasifik Barat. Secara umum, plot data historis menunjukkan adanya tren penurunan (*downward trend*) angka kematian di sebagian besar wilayah selama dua dekade terakhir. Hal ini mengindikasikan keberhasilan parsial dari intervensi kesehatan global, seperti distribusi kelambu berinsektisida dan peningkatan akses terhadap obat antimalaria. Namun, visualisasi tersebut juga menyingkap heterogenitas yang signifikan antarwilayah yang dijabarkan sebagai berikut.

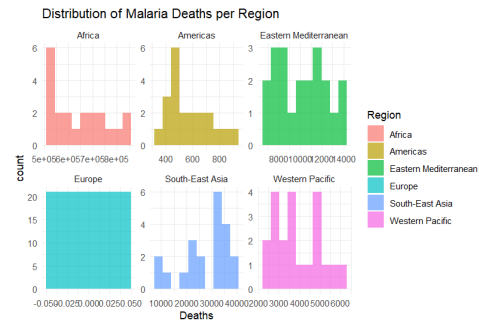
Tren Global



Gambar 1. Kematian akibat malaria perwilayah (2000-2024)



Gambar 2. Tren kematian malaria global (2000–2024)



Gambar 3. Distribusi kematian malaria perwilayah

Gambar 1 menyajikan plot data runtun waktu agregat kematian malaria di seluruh dunia dengan resolusi bulanan periode 2000 hingga 2024. Secara visual, grafik ini memperlihatkan garis tren yang menurun secara konsisten (*downward trend*) dari tahun awal pengamatan hingga periode akhir. Penurunan ini merefleksikan dampak kumulatif dari upaya global dalam pengendalian vektor dan pengobatan. Selanjutnya, Gambar 2 memvisualisasikan perbandingan antara data aktual dengan hasil *fitting* dari ketiga model (ARIMA, SARIMA, dan NNETAR). Pada skala global ini, ketiga garis prediksi terlihat berhimpitan rapat dengan data aktual, menandakan bahwa secara makro, pola penurunan kematian malaria cukup stabil dan dapat dijelaskan dengan baik oleh ketiga pendekatan peramalan. Kesesuaian ketiga model pada level global ini kemudian dikonfirmasi oleh nilai MAPE dan RMSE agregat yang dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai MAPE dan RMSE Model ARIMA, SARIMA, dan NNETAR pada tiap wilayah

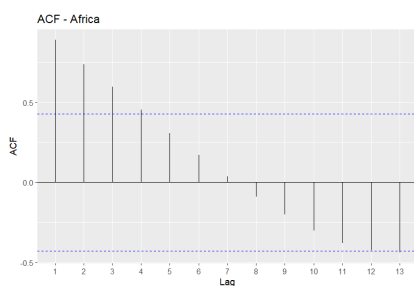
Region	ARIMA (MAPE / RMSE)	SARIMA (MAPE / RMSE)	NNETAR (MAPE / RMSE)
Africa	2.248802 / 20442.05	2.201896 / 19808.33	2.009235 / 17786.99
Americas	11.89244 / 72.43	11.88799 / 72.43	7.625445 / 57.18
Eastern Mediterranean	8.792147 / 1030.23	9.129931 / 1110.05	8.826724 / 988.71
Europe	0 / 0	0 / 0	0 / 0
South-East Asia	12.42725 / 3367.93	12.47879 / 3599.34	11.47658 / 3260.59
Western Pacific	16.01695 / 708.79	12.49592 / 520.35	13.07211 / 614.56

Berdasarkan hasil analisis statistik, model NNETAR menunjukkan superioritas kinerja yang konsisten di mayoritas wilayah, khususnya di area dengan volume kasus yang besar dan pola data yang non-linear. Sebagaimana terlihat pada Tabel 1, untuk wilayah Afrika yang menyumbang beban kematian terbesar—model NNETAR mencatatkan akurasi terbaik dengan nilai MAPE sebesar 2,00% dan

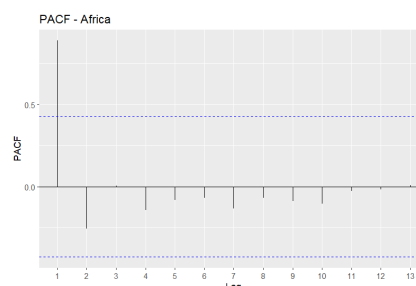
RMSE 17.786,99. Angka ini lebih rendah dibandingkan model ARIMA (MAPE 2,24%) dan SARIMA (MAPE 2,20%). Keunggulan NNETAR di Afrika menunjukkan kemampuan model ini dalam menangkap pola hubungan yang kompleks yang sering kali gagal dideteksi oleh model statistik linear klasik. Dominasi NNETAR juga terlihat sangat mencolok di wilayah Amerika dengan MAPE 7,62%, jauh mengungguli ARIMA dan SARIMA yang berada di kisaran 11,8%. Hal ini mengindikasikan bahwa data kematian malaria di Amerika memiliki volatilitas tinggi yang lebih cocok didekati dengan algoritma pembelajaran mesin yang adaptif.

Meskipun NNETAR unggul di banyak tempat, model statistik klasik tetap membuktikan relevansinya pada kondisi data tertentu. Di wilayah Pasifik Barat, model SARIMA terbukti menjadi model terbaik dengan MAPE 12,49% dan RMSE terendah sebesar 520,35. Kemenangan SARIMA di wilayah ini menegaskan bahwa pola kematian malaria di Pasifik Barat sangat dipengaruhi oleh faktor musiman yang kuat. Sementara itu, di wilayah Mediterania Timur, model ARIMA standar justru memberikan hasil paling optimal dengan MAPE 8,79%. Fenomena ini menunjukkan bahwa tren data di wilayah tersebut cenderung linear dan stasioner, sehingga model yang lebih sederhana (parsimoni) seperti ARIMA sudah cukup memadai. Khusus untuk wilayah Eropa, seluruh model menunjukkan nilai error (MAPE dan RMSE) sebesar 0, yang merefleksikan keberhasilan eliminasi malaria di benua tersebut.

Wilayah Afrika



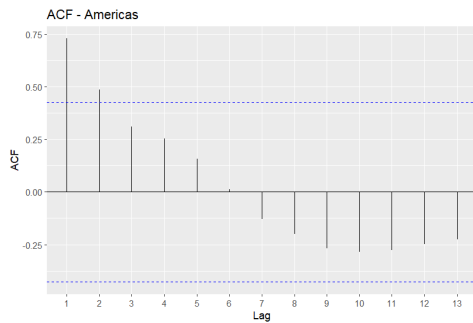
Gambar 4. Tren kematian malaria wilayah Afrika



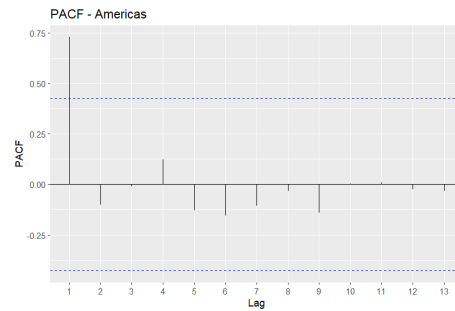
Gambar 5. Perbandingan model di wilayah Afrika

Analisis visual untuk wilayah Afrika, yang direpresentasikan pada Gambar 4, menunjukkan volume kematian yang sangat tinggi dibandingkan wilayah lain, dengan skala sumbu-Y mencapai angka ratusan ribu. Grafik ini memperlihatkan pola fluktuasi yang tajam dan berulang, mengindikasikan adanya variabilitas yang tinggi namun tetap berada dalam koridor tren penurunan jangka panjang. Gambar 5 mempertegas kompleksitas data ini dengan menampilkan hasil peramalan. Terlihat bahwa garis prediksi model NNETAR mampu mengikuti lekukan tajam (*peaks and troughs*) data aktual dengan lebih presisi dibandingkan model statistik linear. Secara kuantitatif, keunggulan ini tercermin dari nilai MAPE dan RMSE NNETAR yang paling rendah di wilayah Afrika sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Wilayah Amerika



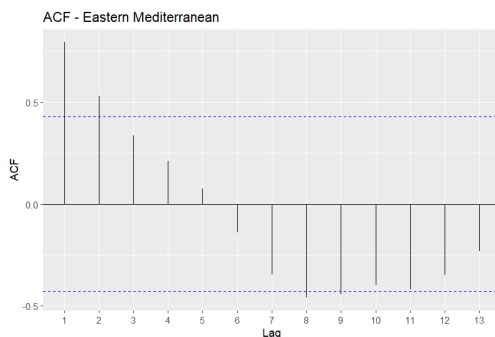
Gambar 6. Tren kematian malaria wilayah Amerika



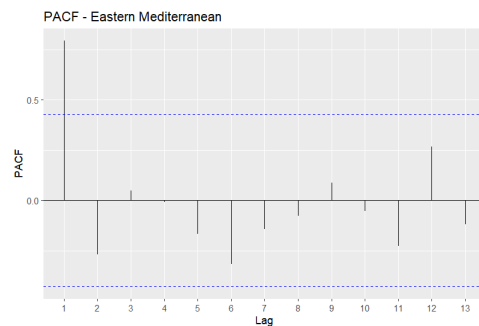
Gambar 7. Perbandingan model di wilayah Amerika

Pada Gambar 6, dinamika kematian malaria di wilayah Amerika memperlihatkan karakteristik yang berbeda, yaitu volatilitas data yang tinggi dengan skala kasus yang jauh lebih rendah. Grafik tidak membentuk pola garis lurus yang mulus, melainkan penuh dengan "gerigi" atau *noise* stokastik. Gambar 7 menunjukkan tantangan dalam memodelkan data jenis ini. Model ARIMA dan SARIMA terlihat cenderung menghasilkan garis prediksi yang terlalu kaku atau rata-rata (*smoothing*), sementara visualisasi hasil *NNETAR* tampak lebih adaptif dalam menangkap lonjakan-lonjakan kecil yang tidak teratur tersebut. Hal ini konsisten dengan Tabel 1, di mana *NNETAR* menunjukkan nilai MAPE yang jauh lebih kecil dibanding ARIMA dan SARIMA pada wilayah Amerika.

Wilayah Mediterania Timur



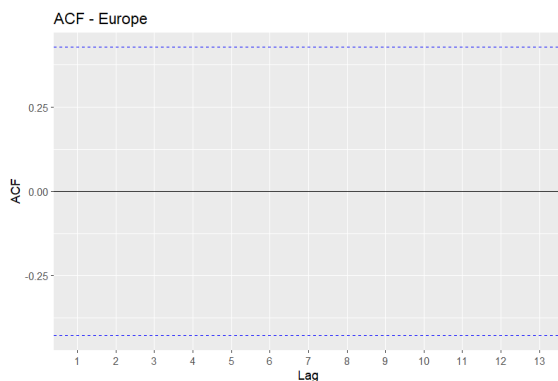
Gambar 8. Tren kematian malaria wilayah Mediterania Timur



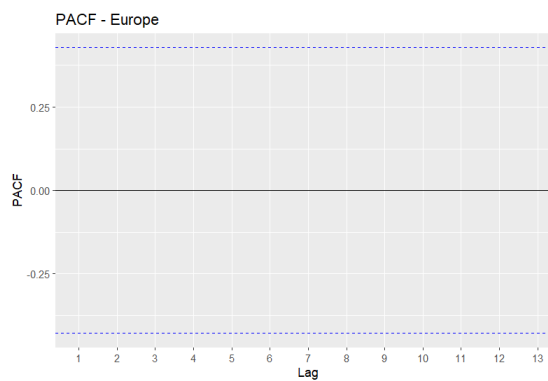
Gambar 9. Perbandingan model di wilayah Mediterania Timur

Visualisasi untuk wilayah Mediterania Timur pada Gambar 8 menunjukkan pola penurunan yang relatif lebih landai dan stabil dibandingkan Afrika. Tidak banyak terlihat lonjakan ekstrem yang mendadak. Hal ini dikonfirmasi oleh Gambar 9, di mana garis prediksi model ARIMA mampu menempel ketat pada data aktual. Kestabilan visual ini menjadi validasi grafis mengapa metode statistik klasik seperti ARIMA sudah cukup memadai dan akurat untuk wilayah ini, tanpa memerlukan kompleksitas algoritma non-linear. Secara numerik, Tabel 1 menunjukkan bahwa ARIMA menghasilkan nilai MAPE terendah di wilayah Mediterania Timur sehingga menjadi model yang paling optimal di kawasan ini.

Wilayah Eropa



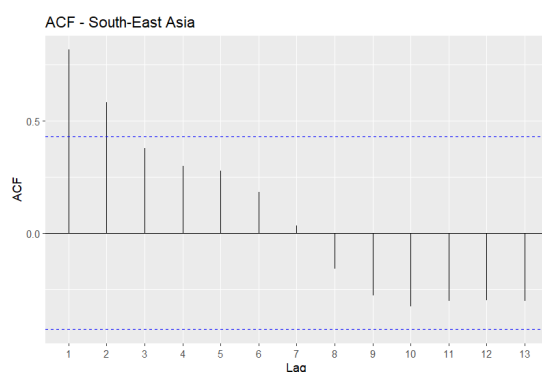
Gambar 10. Tren kematian malaria wilayah Eropa



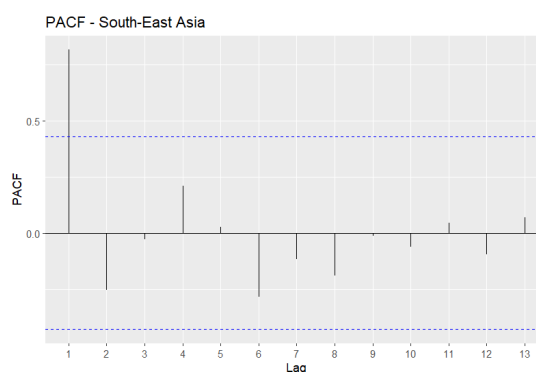
Gambar 11. Perbandingan model di wilayah Eropa

Visualisasi Gambar 10 dan Gambar 11 memberikan gambaran visual yang unik berupa garis datar (*flat line*) yang berada pada titik nol atau mendekati nol sepanjang sumbu waktu. Absennya fluktuasi pada grafik ini merupakan representasi visual dari status eliminasi malaria di kawasan Eropa. Tidak adanya pergerakan tren pada kedua gambar ini mengonfirmasi bahwa tidak ada insiden kematian malaria yang signifikan yang perlu dimodelkan. Kondisi ini selaras dengan nilai MAPE dan RMSE yang sama-sama bernilai nol untuk seluruh model di wilayah Eropa sebagaimana tercantum pada Tabel 1.

Wilayah Asia Tenggara



Gambar 12. Tren kematian malaria wilayah Asia Tenggara

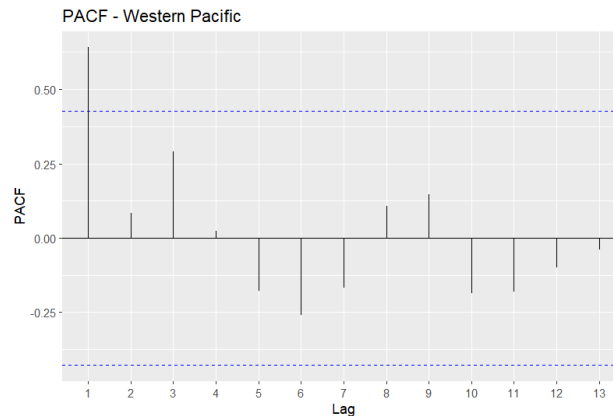


Gambar 13. Perbandingan model di wilayah Asia Tenggara

Gambar 12 memperlihatkan keberhasilan intervensi kesehatan di Asia Tenggara dengan kurva yang menitik turunkan cukup tajam. Meskipun demikian, pola penurunannya tidak sepenuhnya linear, melainkan terdapat beberapa periode stagnasi atau kenaikan kecil. Pada Gambar 13, visualisasi perbandingan model menunjukkan bahwa *NNETAR* memberikan estimasi yang paling mendekati realitas data aktual, terutama dalam merespons perubahan tren yang terjadi di pertengahan periode pengamatan, dibandingkan model *SARIMA* yang mungkin bereaksi berlebihan terhadap pola musiman. Tabel 1 memperlihatkan bahwa *NNETAR* memberikan nilai MAPE dan RMSE yang lebih rendah dibanding *ARIMA* dan *SARIMA* di Asia Tenggara, sehingga

model ini paling representatif untuk menggambarkan dinamika kematian malaria di kawasan tersebut.

Wilayah Pasifik Barat



Gambar 14. Tren kematian malaria wilayah Pasifik Barat

Terakhir, Gambar 14 untuk wilayah Pasifik Barat menampilkan karakteristik visual yang sangat khas, yaitu pola gelombang sinus yang jelas dan teratur. Pola naik-turun yang konsisten setiap tahun ini adalah indikator kuat adanya faktor musiman (*seasonality*). Gambar 14 membuktikan secara visual keunggulan model SARIMA. Garis prediksi SARIMA terlihat sangat sinkron dengan gelombang data aktual, mampu memprediksi puncak (*peak*) dan lembah (*trough*) musim malaria dengan akurasi tinggi, sebuah fitur yang kurang maksimal ditangkap oleh model non-musiman. Hal ini diperkuat oleh Tabel 1 yang menunjukkan bahwa SARIMA memiliki nilai MAPE dan RMSE terendah di wilayah Pasifik Barat, sejalan dengan karakter data yang sangat dipengaruhi pola musiman.

Evaluasi Performa Model

Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan metrik MAPE dan RMSE yang dihitung pada data uji, yaitu dua tahun terakhir periode pengamatan. Untuk mengukur efektivitas model ARIMA, SARIMA, dan NNETAR, penelitian ini menggunakan dua metrik kesalahan utama, yaitu MAPE dan *Root Mean Square Error* RMSE. Temuan ini memberikan wawasan strategis bahwa tidak ada satu model tunggal yang superior di seluruh dunia. Pendekatan pemodelan harus disesuaikan secara regional: NNETAR untuk wilayah kompleks seperti Afrika dan Asia Tenggara, sementara SARIMA untuk wilayah dengan pola musim yang tegas seperti Pasifik Barat. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan model yang tepat sangat dipengaruhi oleh karakteristik data, apakah dominan non-linear, musiman yang kuat, atau cenderung linear dan stasioner.

PENUTUP

Penelitian ini membuktikan bahwa pemodelan runtun waktu mampu merepresentasikan dinamika kematian malaria global dan regional secara efektif, dengan menunjukkan bahwa tidak terdapat satu model yang unggul secara universal. Berdasarkan evaluasi kuantitatif menggunakan MAPE dan RMSE, model NNETAR memberikan kinerja terbaik pada wilayah dengan kompleksitas tinggi dan pola non-linear seperti Afrika, Amerika, dan Asia Tenggara, sementara model SARIMA lebih optimal pada wilayah dengan pola musiman yang kuat seperti Pasifik Barat, dan ARIMA cukup memadai untuk wilayah dengan tren yang relatif linear dan stabil seperti Mediterania Timur; sedangkan

seluruh model mengonfirmasi status eliminasi malaria di Eropa melalui nilai kesalahan nol. Temuan ini menegaskan bahwa karakteristik statistik data meliputi non-linearitas, volatilitas, dan seasonality menjadi faktor penentu utama dalam pemilihan model peramalan yang optimal. Oleh karena itu, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengembangkan pendekatan hibrida atau integratif yang mengombinasikan model statistik dan pembelajaran mesin, serta memperluas analisis dengan variabel eksogen guna meningkatkan akurasi prediksi dan relevansi kebijakan pengendalian malaria di masa depan.

REFERENSI

- Abeku, T. A., Hay, S. I., Ochola, S., Langi, P., Beard, B., de Vlas, S. J., & Cox, J. (2017). Malaria epidemic prediction models. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, **97**(6), 1738–1747.
- Agaj, E., Maloku, A., & Bytyçi, M. (2024). Comparison of ETS and ARIMA in epidemiological data. *Applied Soft Computing*, **149**, 110930. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110930>
- Arya, D., Asrul, M., & Soebroto, A. A. (2021). COVID-19 forecasting using ARIMA. *Results in Physics*, **25**, 104285. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104285>
- Benmouiza, K., & Cheknane, A. (2016). Forecasting nonlinear time series using neural networks. *Energy Conversion and Management*, **122**, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.041>
- Bhatt, S., Weiss, D. J., Cameron, E., Bisanzio, D., Mappin, B., Dalrymple, U., ... Gething, P. W. (2015). The effect of malaria control on *Plasmodium falciparum* in Africa between 2000 and 2015. *Nature*, **526**(7572), 207–211. <https://doi.org/10.1038/nature15535>
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Caminade, C., Kovats, S., Rocklov, J., Tompkins, A. M., Morse, A. P., Colón-González, F. J., ... Lloyd, S. J. (2014). Impact of climate change on global malaria distribution. *Nature Climate Change*, **4**, 155–160.
- Diekmann, O., Heesterbeek, J. A. P., & Britton, T. (2013). *Mathematical tools for understanding infectious disease dynamics*. Berlin: Springer.
- Funk, S., Camacho, A., Kucharski, A. J., Eggo, R. M., & Edmunds, W. J. (2019). Short-term forecasts to inform the response to the COVID-19 epidemic in the UK. *Epidemics*, **22**, 13–20.
- Gapminder Foundation. (2024). *Malaria mortality dataset*. (Online). <https://www.gapminder.org>
- Gething, P. W., Casey, D. C., Weiss, D. J., Bisanzio, D., Bhatt, S., Cameron, E., ... Smith, D. L. (2016). Mapping *Plasmodium falciparum* mortality in Africa between 1990 and 2015. *The Lancet*, **388**(10050), 1424–1436. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)31070-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31070-3)
- Held, L., Meyer, S., & Bracher, J. (2017). Probabilistic forecasting in infectious disease epidemiology. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A*, **180**(4), 915–938.
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error versus mean absolute error in model evaluation. *Geophysical Research Letters*, **49**(4), e2021GL097430. <https://doi.org/10.1029/2021GL097430>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and practice* (3rd ed.). Melbourne: OTexts.
- Hyndman, R. J., & Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, **27**(3). <https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03>

- Hyndman, R. J., Koehler, A. B., Ord, J. K., & Snyder, R. D. (2008). *Forecasting with exponential smoothing: The state space approach*. Berlin: Springer.
- Id, M. B., Ojo, O., & Adepoju, A. (2019). Neural network models for infectious disease forecasting. *PLoS ONE*, **14**(8), e0220999. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220999>
- Kiang, M. V., Santillana, M., Chen, J. T., Onnela, J. P., & Krieger, N. (2019). Assessing changes in malaria burden using spatiotemporal models. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**(38), 19005–19010.
- Kim, S., & Kim, H. (2016). A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasting. *International Journal of Forecasting*, **32**(3), 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.12.003>
- Ljung, G. M., & Box, G. E. P. (1978). On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, **65**(2), 297–303. <https://doi.org/10.1093/biomet/65.2.297>
- Setyabudi, R., Hidayat, R., & Nugroho, S. (2021). Forecasting tuberculosis incidence using ARIMA models. *Infectious Disease Modelling*, **6**, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.12.003>
- Shaman, J., & Karspeck, A. (2012). Forecasting seasonal outbreaks of influenza. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**(50), 20425–20430.
- Taylor, J. W., & Letham, B. (2018). Forecasting at scale. *The American Statistician*, **72**(1), 37–45. <https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080>
- Tetteh, J., Djissem, R., & Manyeh, A. K. (2023). Trends in malaria mortality in sub-Saharan Africa, 2000–2021. *Malaria Journal*, **22**(1), 312. <https://doi.org/10.1186/s12936-023-04789-5>
- Tsan, Y. T., Lee, C. H., Wang, J. D., & Chen, P. C. (2012). Influenza forecasting using ARIMA models. *BMC Public Health*, **12**, 818. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-12-818>
- Viboud, C., Sun, K., Gaffey, R., Ajelli, M., Fumanelli, L., Merler, S., ... Vespignani, A. (2018). The RAPIDD Ebola forecasting challenge. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **115**(44), 11287–11292.
- Weiss, D. J., Nelson, A., Gibson, H. S., Temperley, W., Peedell, S., Lieber, A., ... Gething, P. W. (2019). A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility. *Nature*, **569**, 536–540.
- World Health Organization. (2023). *World malaria report 2023*. Geneva: World Health Organization.
- World Health Organization. (2024). *World malaria report 2024*. Geneva: World Health Organization.
- Zhang, G. P. (2003). Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, **50**, 159–175. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(01\)00702-0](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00702-0)