
PUBLIC HEALTH RESEARCH

Gema Ekologi: Meneroka Interaksi Antara Persekitaran Hutan dan Vektor Malaria

Shahrul Azhar Md Hanif,¹ Mohd Rohaizat Hassan,^{1} Mohd Hasni Ja'afar,¹ Nazarudin Safian,¹ Alabed Ali A. Alabed,³ Muhammad Ridzwan Rafi'I,¹ Nurul Athirah Naserrudin,⁴ Aliff Faisal Ahmad Kamar¹*

¹Jabatan Perubatan Kesihatan Awam, Fakulti Perubatan, Universiti Kebangsaan Malaysia, Jalan Yaacob Latif, Cheras, Kuala Lumpur, Malaysia.

²University of Cyberjaya, Persiaran Bestari, Cyber 11, 63000 Cyberjaya, Selangor, Malaysia.

³Community Medicine Department, Faculty of Medicine, University of Cyberjaya, Persiaran Bestari, Cyber 11, 63000 Cyberjaya, Selangor, Malaysia.

⁴Pusat Penyelidikan Perkhidmatan Kesihatan, Institut Penyelidikan Sistem Kesihatan, Institut Kesihatan Negara, Kementerian Kesihatan Malaysia, Shah Alam, Selangor, Malaysia.

*Corresponding: rohaizat@ppukm.ukm.edu.my

ABSTRAK

Pendahuluan	Malaria kekal sebagai salah satu cabaran kesihatan awam yang penting di seluruh dunia, dengan kemajuan telah terbantut dalam kebelakangan ini. Memandangkan peningkatan kes malaria terutamanya di beberapa kawasan tropika, pemahaman yang lebih baik tentang hubungan ekologi yang mendasari penularan vektor malaria perlu diberikan fokus. Pendekatan pelbagai disiplin yang melibatkan ekologi, entomologi dan kesihatan awam adalah diperlukan untuk memahami kaitan antara malaria dan habitat persekitaran. Ulasan ini bertujuan untuk mensintesis penyelidikan sedia ada tentang bagaimana ekosistem hutan mempengaruhi dinamik penularan malaria.
Metodologi	Menggunakan pangkalan data PubMed, Google Scholar dan Scopus, kajian literatur komprehensif telah dijalankan menggunakan kata kunci tertentu. Artikel yang berkaitan telah dinilai untuk aliran tematik. Secara keseluruhan, 42 artikel telah dipilih untuk naratif ini.
Hasil	Iklim mikro hutan mempengaruhi kecergasan, tingkah laku, corak aktiviti dan fisiologi organisma. Relung biologi berbeza yang disebabkan oleh suhu, kelembapan, pendedahan cahaya dan kerpasan boleh memberi kesan kepada populasi nyamuk. Ciri-ciri fiziko-biokimia badan air, termasuk suhu, pH, jumlah pepejal terlarut (TDS), kandungan nitrat, dan paras oksigen terlarut, mempunyai kesan yang ketara ke atas banyaknya larva nyamuk anopheline. Kelimpahan vektor mungkin dipengaruhi oleh kehadiran perumah dan pemangsa semulajadi. Interaksi rumit geografi, tumbuh-tumbuhan hutan, kepadatan vektor malaria, dan tingkah laku mempunyai pengaruh besar ke atas dinamik penularan malaria. Penebangan hutan mengubah landskap dan ekosistem serpihan, yang mempunyai kesan besar ke atas habitat larva vektor Plasmodium. Perubahan iklim menimbulkan ancaman besar kepada kelimpahan vektor malaria dan dinamik penghantaran.
Kesimpulan	Terdapat banyak aspek kepada interaksi kompleks antara persekitaran hutan dan penyebaran malaria, memerlukan pengetahuan yang mendalam dan lebih banyak penyiasatan. Kerjasama antara ahli ekologi, entomologi dan pakar kesihatan awam adalah penting dalam menghasilkan model komprehensif yang meramalkan risiko malaria dengan tepat dalam persekitaran yang berubah-ubah
Keywords	Malaria; persekitaran; Anopheles; nyamuk; penularan

ABSTRACT

Introduction	Malaria remains one of the most significant public health challenges worldwide, with progress has stagnated in recent years. Given the rise in malaria cases especially in some tropical regions, a better comprehension of the ecological relationships underlying malaria vector transmission is crucial. A multidisciplinary approach involving ecology, entomology, and public health is necessary to comprehend the connection between malaria and forest habitats. This review aims to synthesize existing research on how forest ecosystems influence malaria transmission dynamics.
Methodology	Using PubMed, Google Scholar and Scopus databases, a comprehensive literature review was conducted using specific keywords. Relevant articles were assessed for thematic trends. Overall, 42 articles were selected for this narrative.
Results	Forest microclimates affect an organism's fitness, behavior, activity patterns, and physiology. Different biological niches created by temperature, humidity, light exposure, and precipitation can have an impact on mosquito populations. The physico-biochemical characteristics of water bodies, including temperature, pH, total dissolved solids (TDS), nitrate content, and dissolved oxygen levels, have significant effects on the abundance of anopheline mosquito larvae. Vector abundance may be influenced by the presence of natural hosts and predators. The intricate interactions of geography, forest vegetation, malaria vector density, and behavior have a major influence on the dynamics of malaria transmission. Deforestation changes the landscape and fragments ecosystems, which has a major effect on Plasmodium vector larval habitats. Climate change poses a significant threat to malaria vector abundance and transmission dynamics.
Conclusion	There are many facets to the complex interaction between forest settings and the spread of malaria, which calls for in-depth knowledge and more investigation. Collaborations between ecologists, entomologists, and public health experts are vital to create comprehensive models that accurately predict malaria risk in changing environments.
Keywords	Malaria; environment; Anopheles; mosquito; transmission

Article history:

Received: 22 January 2025

Accepted: 21 March 2025

Published date: 12 September 2025

PENDAHULUAN

Malaria kekal sebagai salah satu cabaran kesihatan awam yang paling ketara di seluruh dunia, terutamanya di kawasan tropika dan subtropika. Usaha global dalam memerangi malaria telah mencapai kejayaan yang ketara disertai dengan cabaran yang berterusan. Menurut Laporan Malaria Antarabangsa Pertubuhan Kesihatan Sedunia (WHO) 2023, pada tahun 2022, ia dianggarkan sebanyak 249 juta kes malaria di 85 negara dan kawasan endemik malaria, meningkat 5 juta kes berbanding tahun 2021.¹ Negara-negara utama yang menyumbang kepada peningkatan adalah terutamanya dari negara-negara Afrika dan Asia. Pengenalan intervensi yang berkesan, seperti jaring yang dirawat insektisida (*insecticide treated nets*, ITN), terapi gabungan berasaskan artemisinin (*artemisinin-based combination therapy*, ACTs), dan penyemburan sisa dalaman (*indoor residual spraying*, IRS), telah menyumbang kepada penurunan yang ketara dalam kejadian dan kematian malaria sepanjang dua dekad yang lalu.¹ Mengikut statistik laporan malaria tersebut, antara tahun 2015 dan 2022, insidens malaria menurun 2%, daripada 59.8 kepada 58.4 bagi setiap 1000 penduduk yang berisiko, dan kadar kematian menurun 6%, daripada 15.2 kepada 14.3 bagi setiap 100,000 penduduk di seluruh dunia.¹ Walau bagaimanapun, kemajuan telah terbantut dalam beberapa tahun kebelakangan ini, terutamanya disebabkan oleh pelbagai faktor seperti peningkatan rintangan racun serangga, rintangan dadah yang muncul, dan gangguan yang disebabkan oleh pandemik COVID-19, yang mengganggu perkhidmatan pencegahan dan rawatan malaria.^{1,2} Selain itu, kemajuan semasa dalam kawalan malaria semakin dikaitkan dengan faktor persekitaran, kerana dinamik ekologi mempengaruhi corak penghantaran malaria dengan ketara.³

Kebangkitan semula kes malaria di beberapa kawasan, ditambah pula dengan penyakit yang berterusan di kawasan endemik, memerlukan pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi ekologi yang mendasari penularannya.^{3,4} Di antara pelbagai faktor persekitaran, ekosistem hutan menonjol kerana kepelbagaian biologi yang unik dan interaksi ekologi yang kompleks. Hutan bukan sahaja menyediakan habitat kritikal untuk pelbagai jenis spesies, termasuk nyamuk *Anopheles sp.* yang berfungsi sebagai vektor malaria, tetapi ia juga mempengaruhi tingkah laku dan dinamik populasi vektor ini.⁵ Komposisi persekitaran hutan—dicirikan oleh pelbagai peringkat penutupan kanopi, iklim mikro dan ketersediaan perumahan—boleh memberi kesan ketara kepada corak pembiakan nyamuk, kadar kemandirian, dan akhirnya, penularan malaria.^{6,7} Tambahan pula, hubungan rumit antara aktiviti antropogenik, perubahan guna tanah, dan ekosistem hutan menambah satu lagi lapisan kerumitan kepada epidemiologi malaria.⁸

Memahami hubungan antara persekitaran hutan dan malaria memerlukan pendekatan pelbagai disiplin yang merangkumi ekologi, entomologi dan kesihatan awam. Kajian ini bertujuan untuk mensintesis penyelidikan sedia ada tentang bagaimana ekosistem hutan mempengaruhi dinamik penularan penyakit malaria, terutamanya vektor malaria. Naratif ini diharap dapat meningkatkan pemahaman mengenai faktor ekologi yang mempengaruhi penularan malaria. Pengetahuan ini amat penting dalam merangka intervensi yang lebih berfokus, termasuk strategi kawalan vektor, sistem pemantauan yang lebih baik, dan program pencegahan berasaskan komuniti. Akhirnya, naratif ini diharapkan dapat menyumbang kepada usaha penyelidikan masa depan dan dasar berasaskan bukti yang bertujuan mengurangkan penularan malaria serta melindungi populasi berisiko, terutamanya mereka yang berada di kawasan terpencil dan kurang mendapat perkhidmatan kesihatan.

METODOLOGI

Soalan panduan ulasan naratif ini ialah: Bagaimanakah ekosistem hutan mempengaruhi dinamik penularan penyakit malaria? Rangka kerja populasi, pendedahan dan hasil (*Population, Exposure, Outcome*; PEO) adalah seperti berikut:

- Populasi: Seluruh dunia, terutamanya di kawasan endemik malaria.
- Pendedahan: Faktor ekologi dalam ekosistem hutan
- Hasil: Dinamik penularan penyakit malaria, termasuk populasi dan kelimpahan vektor malaria

Menggunakan pangkalan data PubMed, Google Scholar dan Scopus, kajian literatur komprehensif telah dijalankan untuk menyiasat hubungkait berkaitan persekitaran hutan (*forest environment*) dengan penyakit malaria. Istilah "*malaria*", "*Plasmodium*", "*zoonotic malaria*", "*forest*", "*environment*" dan "*transmission*", "*Anopheles*", "*mosquito*" ialah kata-kata kunci yang digunakan dalam pencarian artikel. Kata kunci/frasa ini digunakan dalam pelbagai kombinasi, dan termasuk sinonim, istilah alternatif, ejaan alternatif, istilah berkaitan dan variasi dalam pengakhiran perkataan. Pengendali Boolean menggabungkan dan mengecualikan istilah daripada strategi carian. Contoh topik yang diterokai termasuk: adaptasi nyamuk, sifat nyamuk, persekitaran hutan, hutan tropika, cuaca, iklim, kepadatan hutan, struktur hutan, flora dan fauna, alam sekitar, geografi dan lain-lain. Kesemua artikel di seluruh dunia dipilih dalam ulasan ini, dimana kebanyakan kes malaria adalah dari benua Afrika dan Asia. Artikel tambahan diperoleh melalui penilaian artikel yang dipetik oleh pengkaji dari carian awal. Carian telah dijalankan dalam tempoh sepuluh tahun dalam mendapatkan skop yang lebih terkini, dan termasuk rujukan yang

diterbitkan sehingga hari terakhir carian pada 30 November 2024. Semua penerbitan yang terhasil daripada carian ini telah disaring dan rekod berkaitan dikumpulkan menggunakan Endnote©. Kriteria pemilihan untuk ulasan naratif ini termasuk: 1) penerbitan berbahasa Inggeris dan Melayu, 2) pelaporan dan penyelidikan asli merangkumi kajian kualitatif dan kuantitatif, dan 3) kajian malaria seluruh dunia dalam sepuluh tahun dari tarikh akhir carian. Editorial, surat-menyurat dan artikel ulasan tidak dimasukkan. Semua dokumen yang memenuhi kriteria kemasukan kertas semakan telah diambil dan dinilai oleh tiga daripada pengarang. Walaupun pengarang berusaha untuk mengenal pasti semua dokumen yang berkaitan, mungkin terdapat beberapa kesusasteraan yang ditinggalkan secara tidak sengaja, seperti semakan yang tidak diterbitkan dan kesusasteraan kelabu (grey literature). Sebarang perselisihan faham semasa fasa pemilihan dokumen telah dibincangkan sebagai satu kumpulan antara tiga pengarang. Artikel yang berkaitan telah dinilai untuk aliran tematik, manakala pendapat dan pengalaman penulis dan pakar membimbing struktur semakan dan mengenal pasti jurang dalam pengetahuan dan penyelidikan semasa. Pendekatan induktif digunakan dalam analisis tematik, membolehkan corak dan tema muncul secara langsung daripada data tanpa dipandu oleh kategori yang telah ditetapkan. Pendekatan ini amat berguna dalam meneroka faktor kompleks dan kontekstual yang mempengaruhi penularan malaria, kerana ia membolehkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai penentu ekologi bagi penyakit ini. Dengan menganalisis pelbagai sumber secara sistematik, tema-tema yang berulang dapat dikenal pasti. Akhir sekali, sebanyak 42 artikel telah dipilih dalam ulasan naratif ini.

HASIL KAJIAN

Bahagian ini membentangkan tema keseluruhan yang terhasil daripada artikel yang dipilih berkenaan bagaimana ekosistem hutan mempengaruhi dinamik penularan penyakit malaria. Ia merangkumi enam bidang topik: 1) iklim mikro hutan dan biodiversiti, 2) badan air bertakung, fisiko-biokimia dan ekologi vektor, 3) hos semulajadi dan hubungan pemangsa 4) topografi dan tumbuhan hutan dan 5) aktiviti penebangan dan pemecahan kawasan dan 6) perubahan iklim.

Iklim Mikro Hutan dan Biodiversiti

Iklim mikro hutan mempengaruhi fisiologi, corak aktiviti, tingkah laku dan kecergasan organisma. Secara amnya, berdasarkan perbezaan saiz, mobiliti dan jangka hayatnya, organisma bertindak balas secara berbeza terhadap keadaan iklim mikro berkenaan dengan proses kitaran hayat mereka. Iklim mikro ini, dicirikan oleh variasi dalam bentuk suhu, kelembapan dan pendedahan cahaya, mencipta sebuah relung ekologi yang berbeza yang

boleh menjejaskan populasi nyamuk dengan ketara. Sebagai contohnya, kawasan terlindung atau teduhan dalam hutan cenderung mengekalkan tahap kelembapan yang lebih tinggi, yang kondusif untuk kemandirian dan perkembangan nyamuk. Larva *Anopheles* hidup subur di habitat akuatik yang dilindungi daripada cahaya matahari langsung dan suhu yang melampau, menjadikan mikrohabitat yang terbentuk oleh timbunan daun, pokok tumbang, dan air bertakung sangat sesuai untuk pertumbuhan larva. Kajian telah menunjukkan bahawa ketumpatan larva selalunya lebih tinggi dalam persekitaran terlindung ini berbanding dengan kawasan terbuka, yang lebih mudah terdedah kepada kekeringan dan perubahan suhu.⁹⁻¹¹ Satu kajian di Tanzania mendapati bahawa lebih daripada 50% habitat, sama ada dalam cahaya matahari separa atau teduhan, mempunyai kepadatan larva nyamuk yang tinggi.¹⁰ Selain itu, kehadiran tumbuh-tumbuhan bukan sahaja menyediakan tempat pembiakan tetapi juga menawarkan tempat perlindungan untuk nyamuk dewasa, sekali gus meningkatkan kadar kemandirian mereka. Kajian oleh Che Dom et al menunjukkan bahawa habitat pembiakan fizikal *Anopheles sp.* lebih suka kewujudan banyak penutup kanopi dan dalam beberapa liputan tumbuhan.¹¹ Keutamaan untuk kawasan terlindung/teduhan ini telah dikaitkan dengan mengelakkan kehilangan air yang berlebihan, kerana dehidrasi mempengaruhi fisiologi, kemandirian dan kecergasan nyamuk secara negative.¹² Selain itu, pendedahan yang mencukupi kepada cahaya matahari memanaskan air kepada suhu yang sesuai, kerana suhu juga merupakan faktor utama yang mempengaruhi perkembangan dan kemandirian larva nyamuk. Pendedahan yang tidak mencukupi kepada cahaya matahari yang disebabkan oleh penutupan tumbuh-tumbuhan yang tinggi menjejaskan kecekapan fotosintesis biojisim alga yang berfungsi sebagai makanan untuk larva nyamuk.^{13,14}

Suhu dan kelembapan sebaliknya, mempunyai kesan langsung ke atas nyamuk pada ambang tertentu, yang membawa kepada peningkatan dan penurunan komposisi malaria. Suhu antara 20 °C sehingga 30 °C didapati sesuai untuk kemandirian nyamuk dewasa manakala parasit mempunyai suhu optimum 32-33 °C (15). Satu kajian mengenai hubungan antara suhu dan kehadiran malaria di Afrika dan Asia mendapati corak unimodal, dimana kajian itu menunjukkan bahawa peningkatan suhu meningkatkan kehadiran malaria sehingga ambang tertentu, selepas itu kesannya menjadi negatif. (16). Ia meramalkan suhu optimum untuk kehadiran malaria *Plasmodium* kira-kiranya 24°C hingga 24.9°C (model GLM) dan 24.7°C hingga 24.8°C (model CART), dengan julat suhu di mana kehadiran malaria tidak boleh diabaikan antara 12°C dan 36 °C. Pemerhatian ini boleh dikaitkan dengan rizab teneral yang diperolehi dari peringkat belum matang dalam mencapai usia

dewasa. Rizab teneral menentukan jumlah tenaga yang boleh diakses untuk kebanyakan ciri kehidupan dewasa seperti umur panjang, saiz badan, vitellogenesis, dan penerbangan nyamuk.¹⁷ Nyamuk yang lebih besar (yang muncul pada suhu rendah) biasanya mempunyai lebih banyak rizab dan berkemungkinan bertahan lebih lama daripada nyamuk yang lebih kecil (yang muncul pada suhu tinggi).¹⁸ Satu lagi kemungkinan penjelasan bagi jangka hayat yang berkurang pada suhu tinggi ialah kehabisan simpanan tenaga dengan cepat akibat tempoh metabolisme yang tinggi yang berpanjangan.¹⁷ Suhu yang lebih tinggi boleh mempercepatkan kadar tindak balas pelbagai proses metabolik yang menjejaskan pertumbuhan dan perkembangan nyamuk. Tambahan pula, iklim mikro hutan mempengaruhi tingkah laku nyamuk *Anopheles sp.* dewasa, termasuk tabiat pemakanan dan pilihan berehat. Tahap suhu dan kelembapan menentukan corak aktiviti vektor ini, dengan keadaan yang lebih baik membawa kepada peningkatan tingkah laku mencari hos. Oleh itu, hutan dengan iklim mikro yang stabil boleh mengekalkan kepadatan nyamuk yang lebih tinggi, akhirnya meningkatkan kemungkinan penularan malaria kepada manusia. Tahap kelembapan yang lebih tinggi meningkatkan jangka hayat dan kejayaan pembiakan nyamuk. Penyelidikan mendapati bahawa kelembapan relatif melebihi 60% adalah kondusif untuk aktiviti nyamuk, terutamanya pada waktu malam apabila kadar menggigit paling tinggi.¹⁹ Suhu mempengaruhi ciri-ciri utama sejarah hidup seperti kesuburan, saiz sayap, jangka hayat dewasa, tingkah laku pemakanan darah, tempoh kitaran gonotrofik, dan kadar gigitan.^{17,20} Fisiognomi ini boleh menjejaskan kemandirian nyamuk, perkembangan parasit, dan mempengaruhi penghantaran dengan menjejaskan kesuburan. Suhu juga boleh mempengaruhi kecekapan vektor serta keupayaan semula jadi nyamuk untuk membiak dan menularkan patogen.^{17,20}

Selain itu, interaksi antara iklim mikro dan faktor persekitaran seperti hujan boleh menyebabkan peningkatan dan penurunan populasi nyamuk secara berkala. Hujan mempengaruhi oviposisi, kelimpahan, dan kelangsungan hidup nyamuk dalam beberapa cara: dengan membentuk takungan air tempat nyamuk bertelur dan berkembang menjadi larva; dengan melembapkan tanah untuk meningkatkan kelembapan berhampiran permukaan dan berfungsi sebagai sumber air minuman; dengan mencairkan dan mengurangkan sumber untuk larva, yang seterusnya mengurangkan kadar kelangsungan hidup; serta dengan meningkatkan kelembapan relatif semasa fasa rehat dan pencarian hos.¹⁴ Kajian yang dijalankan di Nigeria menunjukkan peranan penting hujan dalam mempengaruhi banyaknya vektor malaria, terutamanya nyamuk *Anopheles sp.*¹⁹ Hujan adalah penting untuk mewujudkan habitat pembiakan,

kerana nyamuk *Anopheles sp.* memerlukan air untuk bertelur. Penyelidikan menunjukkan bahawa musim hujan dikaitkan oleh peningkatan populasi nyamuk, dengan bilangan larva memuncak pada awal dan akhir musim hujan berbanding musim kemarau.¹⁹ Risiko digit nyamuk vektor malaria didapati meningkat sembilan kali ganda pada musim hujan berbanding dengan musim kemarau.²¹ Satu lagi kajian di Ghana menunjukkan korelasi sederhana yang signifikan secara statistik antara hujan dan insidens malaria di zon agroekologi.¹⁵ Interaksi dinamik vektor ini dengan persekitarannya, bagaimanapun, menjadikannya mustahil untuk mewujudkan satu kesimpulan bahawa hujan adalah berkadar terus dengan ketumpatan vektor malaria. Trend yang berbeza untuk setiap rantau didedahkan oleh korelasi yang diunjurkan antara kajian pemodelan ketumpatan hujan dan malaria.¹⁶ Kerpasan/Presipitasi mempengaruhi kejadian malaria *Plasmodium sp.* di Afrika dengan menunjukkan hubungan melengkung. Sehingga ambang tertentu, peningkatan hujan berkorelasi dengan peningkatan kes malaria, namun kerpasan berlebihan mengganggu pembiakan nyamuk, sekali gus mengurangkan penularan. Korelasi terkuat berlaku semasa suku paling basah, manakala suku paling kering menunjukkan hubungan negatif yang ketara dengan aktiviti malaria. Sebaliknya, Asia menunjukkan trend yang paradoks, di mana peningkatan purata kerpasan secara konsisten berkaitan dengan penurunan kehadiran malaria.¹⁶ Keputusan ini memberi satu pandangan bahawa penularan malaria dan dinamik ketumpatan nyamuk berbeza mengikut wilayah dan kawasan, dan faktor ekologi dan persekitaran mempengaruhi kemandirian dan pembiakan nyamuk.

Badan Air bertakung, Fisiko-biokimia dan Ekologi Vektor

Kelimpahan larva nyamuk anopheline sangat dipengaruhi oleh pelbagai faktor persekitaran, terutamanya suhu air, jumlah pepejal terlarut (*total dissolved solids*, TDS), kepekatan nitrat, dan paras oksigen terlarut yang berinteraksi dalam badan air bertakung.²²⁻²⁶ Suhu air memainkan peranan penting, kerana suhu yang lebih panas dikaitkan dengan peningkatan kelimpahan larva; ini berkemungkinan disebabkan oleh pertumbuhan mikrob yang dipertingkatkan yang berfungsi sebagai makanan untuk larva, serta kadar perkembangan yang lebih cepat pada suhu yang lebih panas. Secara khusus, kajian mendapati bahawa larva *Anopheles* menunjukkan peningkatan ketara dalam kelimpahan apabila suhu air berada antara 28°C hingga 34°C, menunjukkan keutamaan yang kuat terhadap keadaan yang lebih panas.²³ Suhu air di kawasan permukaan air sementara berbeza-beza mengikut kajian lain. Larva nyamuk yang menjajah akan terdedah kepada suhu antara kira-kira 21.6 hingga 39.3°C, dengan purata harian 27.2°C.²⁴ Jumlah

pepejal terlarut dan kepekatan nitrat juga berkorelasi positif dengan kelimpahan larva, menunjukkan bahawa faktor-faktor ini mungkin menyumbang kepada ketersediaan nutrien keseluruhan dalam air, yang penting untuk pertumbuhan dan perkembangan larva.^{22,23} Kepekatan TDS yang lebih tinggi boleh meningkatkan ketersediaan nutrien dalam habitat ini, yang penting untuk pertumbuhan mikroorganisma yang berfungsi sebagai makanan untuk larva nyamuk. Satu kajian menunjukkan bahawa apabila TDS meningkat, kelimpahan larva anopheline juga cenderung untuk meningkat, menunjukkan korelasi positif antara persekitaran yang kaya dengan nutrien dan kemandirian larva.²³ Sebaliknya, kadar kematian larva yang tinggi direkodkan dalam air dos nitrat tinggi, berdasarkan kajian Tchigossou et al.²⁵ Perubahan pigmen pembawa oksigen (hemoglobin dan hemocyanin) kepada bentuk terhalang (methaemoglobin), yang tidak dapat membawa oksigen, ialah tindakan berbahaya utama nitrat pada spesies akuatik. Akibatnya, larva nyamuk mungkin mati akibat kekurangan oksigen.²⁵ Memandangkan air bawah tanah secara sejarah telah dilaporkan mempunyai kepekatan nitrat yang berbahaya melebihi paras yang disyorkan, kandungan nitrat yang tinggi dalam air lubang gerudi mungkin dijelaskan oleh asal freatnya. Selain itu, bahan cemar tambahan yang mungkin terdapat dalam perairan akuatik ialah sisa fosfat dan nitrat daripada baja kimia yang digunakan dalam pertanian.²⁷

Sebaliknya, tahap pH mempunyai kesan yang besar terhadap kelimpahan larva nyamuk *Anopheles sp.* Secara khususnya, kajian telah menemui korelasi negatif antara pH dan kelimpahan larva *Anopheles sp.*, bermakna apabila pH meningkat, populasi larva ini cenderung untuk berkurangan.^{7,28} Ini bercanggah dengan beberapa spesies nyamuk lain yang menunjukkan korelasi yang ketara dengan pH.²⁹ Nyamuk *Anopheles sp.* matang boleh memilih persekitaran pH yang kurang berasid dan kurang asas untuk oviposisi mereka.³⁰ Sebaliknya, kesan tahap oksigen terlarut pada larva anopheline mempunyai konsensus bercampur. Akeju et al. mendapati bahawa tahap oksigen terlarut berkorelasi negatif dengan banyaknya larva *Anopheles sp.*, menunjukkan bahawa apabila oksigen terlarut berkurangan, populasi larva ini cenderung untuk meningkat.²⁸ Kajian ini menunjukkan bahawa larva nyamuk bergantung terutamanya pada oksigen atmosfera dan menggunakan oksigen terlarut sebagai sumber tambahan. Mereka boleh bertahan selama beberapa hari tanpa oksigen atmosfera, tetapi kadar kelangsungan hidup mereka menurun apabila paras oksigen terlarut berkurang.²⁸ Dalam kajian lain, seperti yang dilakukan oleh Dida et al., telah menunjukkan bahawa larva *Anopheles sp.* boleh hidup subur di habitat dengan paras oksigen terlarut

yang rendah, dengan Dida et al. melaporkan koleksi larva yang lebih tinggi dalam keadaan sedemikian.³¹

Sifat fiziko-biokimia dalam badan air menekankan dinamik ekologi faktor persekitaran ini adalah penting untuk memahami taburan dan kelimpahan larva anopheline, yang seterusnya mempunyai implikasi yang ketara untuk strategi kawalan vektor malaria. Menyasarkan takungan air sementara dengan keadaan optimum untuk perkembangan larva, sambil mengurus kehadiran pemangsa dan pesaing, boleh meningkatkan keberkesanan intervensi kawalan malaria di kawasan yang terjejas. Secara keseluruhannya, interaksi antara faktor abiotik dan interaksi biotik ini membentuk kesesuaian habitat untuk nyamuk anopheline, menonjolkan keperluan untuk pendekatan bersepadu dalam pengurusan vektor yang mempertimbangkan hubungan ekologi ini.

Hos Semulajadi dan Hubungan Pemangsa

Parasit malaria secara semula jadi mendiami kera, terutamanya seperti kera ekor babi (*Macaca nemestrina*) dan kera ekor panjang (*Macaca fascicularis*).³² *Plasmodium knowlesi*, yang disebarkan kepada manusia melalui gigitan nyamuk yang dijangkiti, mungkin terdapat dalam primata ini.³³ Oleh kerana kera boleh mengekalkan dan mempergiatkan kitaran hayat parasit dalam persekitaran, kehadirannya di habitat tertentu meningkatkan risiko penularan malaria. Menurut kajian, kadar jangkitan *Plasmodium knowlesi* lebih tinggi di kawasan yang mempunyai populasi kera yang besar. Populasi monyet di Malaysia, sebagai contohnya, selalu didapati mengandungi parasit malaria, menunjukkan bahawa haiwan ini penting dalam epidemiologi malaria simian. Kehadiran primata ini di kawasan hutan berkorelasi dengan peningkatan kes malaria dalam komuniti manusia berdekatan, seterusnya menyokong perkaitan positif antara habitat kera dan kelimpahan malaria.^{34,35} Selain itu, kehadiran pemangsa invertebrata dan pesaing dalam habitat boleh menjejaskan hubungan ini, kerana kelimpahan pemangsa yang lebih tinggi biasanya membawa kepada pengurangan populasi larva. Kajian Mereta et al. mendapati bahawa satu faktor penting yang mengehadkan kuantiti larva nyamuk anopheline dalam habitat akuatik ialah kehadiran pemangsa invertebrate.²³ Khususnya, ekosistem dengan bilangan pesaing dan pemangsa makroinvertebrata yang lebih tinggi, seperti yang dilihat di tanah lembap kekal, mengekalkan ketumpatan larva anopheline yang jauh lebih rendah daripada habitat sementara, yang selalunya mempunyai lebih sedikit pemangsa. Kelimpahan larva anopheline dan kehadiran pemangsa ini ditunjukkan berkorelasi negatif, menandakan bahawa apabila bilangan pemangsa meningkat, perkembangan larva nyamuk dan kemandirian berkurangan.

Topografi dan Tumbuhan Hutan

Hubungan antara topografi, tumbuh-tumbuhan hutan, kepadatan dan tingkah laku vektor malaria ialah interaksi kompleks yang memberi kesan ketara kepada dinamik penularan malaria. Parameter topografi seperti ketinggian, cerun, aspek, dan kekasaran memainkan peranan penting dalam penularan malaria di kawasan tanah tinggi. Pelbagai kajian menunjukkan bahawa ketinggian memainkan peranan penting dalam mempengaruhi keadaan persekitaran yang mencerminkan kembali kesan suhu, kelembapan dan kerpasan, yang mana ia penting untuk pembiakan dan kemandirian vektor malaria. Topografi menjejaskan iklim mikro tempatan, mewujudkan habitat yang boleh menyokong atau menghalang populasi nyamuk. Satu kajian menunjukkan bahawa apabila altitud meningkat, kemungkinan menjumpai larva anopheline berkurangan dengan ketara. Kawasan altitud rendah, terutamanya di sepanjang tebing sungai, lebih kondusif untuk habitat larva anopheline.²⁶ Kawasan tinggi dalam kajian di Malaysia secara amnya menunjukkan kelimpahan nyamuk yang lebih rendah berbanding kawasan tanah rendah, terutamanya disebabkan oleh korelasi antara altitud, suhu, dan keadaan persekitaran.^{36,37} Apabila ketinggian meningkat, suhu cenderung menurun, yang memberi kesan buruk kepada kemandirian dan kadar pembiakan nyamuk *Anopheles sp.*, vektor utama malaria. Walaupun kawasan tinggi mungkin mempunyai air bertakung yang sesuai untuk pembiakan, suhu yang lebih sejuk boleh menghadkan kadar perkembangan larva nyamuk dan memendekkan tempoh kitaran gonotropik, akhirnya membawa kepada pengurangan populasi nyamuk dewasa.^{36,37} Satu lagi kajian mengenai hubungan ramalan antara ketinggian, indeks tumbuhan perbezaan normal (*normalized difference vegetation index*, NDVI), dan kehadiran malaria di Afrika dan Asia mendedahkan corak berbeza yang mempengaruhi dinamik penghantaran malaria.¹⁶ Di Afrika, hubungan antara ketinggian dan kehadiran malaria *Plasmodium falciparum* menunjukkan bahawa malaria diramalkan akan dimaksimumkan pada ketinggian sekitar 752 hingga 1,000 meter, dengan kejadian malaria berkurangan pada ketinggian yang lebih tinggi.¹⁶ Sebaliknya, situasi di Asia memperlihatkan interaksi yang lebih kompleks. Bagi *Plasmodium falciparum*, kehadiran malaria memuncak pada ketinggian yang lebih rendah berbanding dengan Afrika.¹⁶ NDVI dalam kajian ini juga mencadangkan bahawa kawasan dengan penutupan tumbuh-tumbuhan sederhana mungkin menyediakan habitat yang sesuai untuk pembiakan nyamuk, manakala tumbuh-tumbuhan yang berlebihan boleh menghalang dinamik penghantaran.¹⁶ Dalam kajian lain, bentuk lembah secara signifikan mempengaruhi penularan malaria di tanah tinggi Kenya Barat dengan menjejaskan

kelimpahan dan taburan habitat pembiakan nyamuk.²⁶ Lembah berbentuk U yang luas menyediakan keadaan yang lebih sesuai untuk pembiakan larva dan produktiviti vektor dewasa, yang membawa kepada risiko insidens malaria yang lebih tinggi berbanding lembah berbentuk V yang sempit, yang mengalami kestabilan habitat yang lemah akibat aliran air yang laju. Akibatnya, kawasan dalam lembah yang luas berisiko lebih besar untuk jangkitan malaria. Dengan memahami hubungan ini adalah penting untuk membangunkan strategi kawalan malaria yang didasarkan yang mempertimbangkan faktor alam sekitar dan ekologi unik yang terdapat di kawasan yang berbeza.

Aktiviti Penebangan dan Pemecahan Kawasan

Beberapa kumpulan nyamuk *Anopheles sp.* yang tinggal di hutan, biasanya ditemui di kawasan hutan dan pertanian. Tambahan pula, habitat larva *Anopheles sp.* ditemui di dalam poket air yang sangat teduh, bersih, semulajadi atau lopak berhampiran sungai. Oleh itu, kelimpahan vektor tinggi yang diramalkan adalah berhampiran kawasan hutan dan air bertakung. Penebangan hutan memberi kesan ketara kepada habitat larva vektor *Plasmodium sp.* dengan mengubah landskap dan mewujudkan ekosistem yang berpecah-belah. Apabila hutan ditebang untuk pertanian, seperti ladang kelapa sawit dan getah, pemecahan habitat yang terhasil mengubah landskap. Ini meningkatkan nisbah perimeter-ke-kawasan hutan yang tinggal, mewujudkan corak mozek dengan lebih banyak kawasan pinggir hutan yang terdedah. Perubahan ini boleh memberi kesan besar terhadap dinamika ekologi, mempengaruhi kedua-dua hidupan liar dan corak penularan penyakit.³⁸ Pemecahan kawasan ini mungkin mewujudkan habitat pembiakan akuatik baharu untuk nyamuk *Anopheles sp.*, kerana persekitaran yang terganggu selalunya menyokong kepadatan vektor ini yang lebih tinggi berbanding dengan hutan primer yang tidak diubah suai. Oleh kerana pemecahan habitat sedia ada boleh mengubah ekologi vektor atau mewujudkan zon peralihan dengan lebih banyak pertindihan ruang antara populasi manusia, nyamuk dan hidupan liar, ia juga boleh meningkatkan kekerapan penghantaran penyakit.^{39,40} Penyelidikan mendapati hubungkait positif antara kehadiran larva *Anopheles sp.* dan faktor seperti jarak dari pertanian dan pemecahan hutan, menunjukkan bahawa penebangan hutan boleh meningkatkan ketersediaan tapak pembiakan yang sesuai.^{33,41-43} Selain itu, kajian menunjukkan bahawa iklim mikro dan komposisi tanah berubah akibat penebangan hutan boleh memudahkan populasi nyamuk. Akibatnya, peningkatan jarak penempatan manusia dengan habitat yang diubah ini meningkatkan risiko penularan malaria zoonosis. Hutan yang berpecah-belah boleh mengganggu keseimbangan ekologi yang secara semula jadi seterusnya mengawal populasi nyamuk. Di hutan

yang utuh, pelbagai spesies, termasuk pemangsa nyamuk, membantu mengawal bilangannya. Namun, pemecahan habitat boleh menyebabkan penurunan biodiversiti, mengurangkan kehadiran pemangsa semula jadi ini dan membolehkan populasi nyamuk berkembang.⁴⁴ Walau bagaimanapun, penularan menurun dengan peningkatan penebangan hutan.^{41,42} Namun begitu, kehadiran sisa-sisa hutan dalam kawasan yang ditebang meningkatkan risiko malaria. Kajian di Lao PDR menunjukkan hubungan yang kompleks dan pelbagai rupa antara penebangan hutan dan penghantaran malaria.⁴² Kajian awal menunjukkan bahawa penebangan hutan boleh menyebabkan peningkatan kes malaria, terutamanya dalam dua tahun pertama selepas penebangan hutan. Peningkatan ini sering dikaitkan dengan perubahan dalam habitat yang memihak kepada pembiakan nyamuk dan pendedahan manusia kepada vektor malaria. Walau bagaimanapun, dalam jangka panjang, dinamik berubah. Apabila penebangan hutan semakin meningkat, landskap mungkin menjadi kurang sesuai untuk penularan malaria disebabkan oleh perubahan dalam penggunaan tanah dan corak penempatan manusia.⁴² Ini selaras dengan kebanyakan teori epidemiologi yang mantap bahawa penebangan hutan mengurangkan risiko malaria di Asia Tenggara.^{6,45,46} Walaupun penebangan hutan secara progresif boleh mengurangkan risiko malaria di Asia, mungkin terdapat juga risiko nyamuk vektor lain (contohnya, *Anopheles darlingi*, yang lebih suka kawasan pinggir hutan dan tanah pertanian, boleh memasuki ekosistem baharu yang menyebabkan kemunculan semula malaria.⁴⁵

Perubahan Iklim

Perubahan iklim memberi kesan yang ketara kepada kelimpahan dan penghantaran vektor malaria, terutamanya disebabkan oleh perubahan suhu, kerpasan dan kelembapan, yang mempengaruhi ekologi nyamuk *Anopheles sp.* Peningkatan suhu global boleh meningkatkan kadar perkembangan parasit malaria dalam perumah nyamuk, sekali gus meningkatkan potensi penularan. Kajian telah menunjukkan suhu berkorelasi negatif dengan tempoh inkubasi ekstrinsik (*extrinsic incubation period*, EIP) parasit malaria dalam nyamuk. Apabila suhu meningkat, EIP berkurangan, membawa kepada perkembangan lebih cepat parasit dalam nyamuk, yang meningkatkan risiko penularan penyakit.⁴⁷ Selain itu, suhu yang lebih tinggi boleh mengembangkan julat geografi nyamuk *Anopheles sp.*, membolehkan mereka mendiami kawasan yang sebelum ini tidak sesuai. Sebagai contoh, turun naik suhu mempengaruhi pelbagai aspek biologi nyamuk, termasuk kesuburan, umur panjang, dan kadar menggigit, yang semuanya penting untuk penghantaran penyakit yang berkesan.^{17,20,47} Suhu yang lebih tinggi juga boleh mengubah taburan dan kemandirian populasi nyamuk, membolehkan

Anopheles sp. untuk berkembang maju dalam persekitaran yang sebelum ini tidak menguntungkan.^{17,47} Spesies vektor tertentu dijangka mendapat manfaat lebih daripada yang lain daripada perubahan kelembapan dan hujan. Ini mungkin disebabkan oleh perbezaan interspesifik dalam toleransi fisiologi, seperti keutamaan untuk penyimpanan air dan ketahanan terhadap pengeringan. Kepelbagaian *Anopheles sp.* dalam kedua-dua habitat basah dan kering telah dikaitkan dengan variasi dalam ciri fisiologi ini. Perubahan dalam kepelbagaian dan ketersediaan habitat larva akuatik di bawah perubahan iklim juga boleh mengakibatkan perubahan dalam solek spesies.^{48,49} Selain itu, hubungan antara kebolehubahan iklim dan penghantaran malaria adalah tidak mudah; sementara suhu yang lebih panas boleh meningkatkan kapasiti vektor, ia juga boleh menyebabkan peningkatan kadar kematian dalam populasi nyamuk akibat tekanan haba, yang berpotensi mengimbangi beberapa peningkatan yang dijangkakan dalam penghantaran.⁵⁰ Walaupun perubahan iklim menimbulkan ancaman besar kepada kelimpahan vektor malaria dan dinamik penghantaran, interaksi antara faktor persekitaran dan tindakan manusia akhirnya akan menentukan beban malaria pada masa hadapan di pelbagai wilayah. Penyelidikan yang berterusan adalah penting untuk lebih memahami dinamik ini dan memaklumkan strategi kesihatan awam yang berkesan untuk mengurangkan kesan perubahan iklim terhadap penularan malaria.

KESIMPULAN

Ulasan naratif ini meneroka bagaimana ekosistem hutan mempengaruhi dinamik penularan malaria melalui pelbagai faktor yang saling berkaitan. Dengan mensintesis penyelidikan sedia ada dalam enam bidang utama, ulasan ini menekankan kepentingan iklim mikro hutan dan biodiversiti dalam membentuk populasi vektor, peranan takungan air dan sifat fiziko-biokimia dalam ekologi nyamuk, serta interaksi kompleks antara hos semula jadi dan pemangsa. Selain itu, topografi dan vegetasi hutan mempengaruhi habitat pembiakan nyamuk, manakala aktiviti pembalakan dan pemecahan habitat mengubah keseimbangan ekologi, berpotensi meningkatkan interaksi manusia-vektor. Perubahan iklim memperburuk dinamik ini dengan mengubah corak suhu, hujan, dan kelembapan, yang secara langsung mempengaruhi taburan vektor dan potensi penularan malaria. Hubungan antara faktor persekitaran ini menunjukkan bahawa risiko malaria bukan sahaja ditentukan oleh penempatan manusia dan strategi intervensi tetapi juga melibatkan ciri ekologi landskap hutan. Dengan ancaman berterusan daripada penebangan hutan, perubahan guna tanah, dan variabiliti iklim, pemahaman terhadap pemacu ekologi penularan malaria adalah penting untuk merancang langkah kawalan yang berkesan.

Penyelidikan masa depan perlu mengintegrasikan pemodelan ekologi, kajian entomologi lapangan, dan unjuran iklim bagi memperhalusi pemahaman terhadap hubungan ini. Selain itu, strategi kawalan malaria harus mengambil kira perubahan persekitaran di peringkat landskap dengan menggabungkan dasar guna tanah yang lestari dan usaha pemuliharaan biodiversiti. Pendekatan holistik ini akan membantu mengurangkan risiko malaria sambil mengekalkan ekosistem hutan dan fungsinya. Dengan menghubungkan pandangan epidemiologi dengan perspektif ekologi, ulasan ini menyumbang kepada pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai penularan malaria dan menyediakan asas bagi penyelidikan serta intervensi masa depan untuk mengurangkan beban malaria di kawasan hutan dan landskap yang sedang mengalami perubahan.

KONFLIK KEPENTINGAN

Pengarang mengisytiharkan tiada kepentingan bersaing.

PENGAKUAN/PENGIKTIRAFAN

Jabatan Perubatan Kesihatan Awam Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) menyokong penyelidikan ini. Penerbitan ini semata-mata mewakili pendapat pengarang, dan UKM tidak boleh dipertanggungjawabkan untuk sebarang penggunaan bahan yang terkandung di dalamnya.

RUJUKAN

1. Venkatesan P. The 2023 WHO World malaria report. *The Lancet Microbe*. 2024;5(3):e214.
2. Oladipo HJ, Tajudeen YA, Oladunjoye IO, Yusuff SI, Yusuf RO, Oluwaseyi EM, et al. Increasing challenges of malaria control in sub-Saharan Africa: Priorities for public health research and policymakers. *Annals of Medicine and Surgery*. 2022;81:104366.
3. World Health Organization. WHO Malaria Report 2022. *Malaria Report*. 2022.
4. World Health Organization, editor WHO Malaria Policy Advisory Group Meeting Report 2023.
5. Kar NP, Kumar A, Singh OP, Carlton JM, Nanda N. A review of malaria transmission dynamics in forest ecosystems. *Parasites & Vectors*. 2014;7(1):265.
6. Ranjha R, Sharma A. Forest malaria: the prevailing obstacle for malaria control and elimination in India. *BMJ Glob Health*. 2021;6(5).
7. Chaiphongpachara T, Yusuk P, Laojun S, Kunphichayadecha C. Environmental Factors Associated with Mosquito Vector Larvae in a Malaria-Endemic Area in Ratchaburi Province, Thailand. *The Scientific World Journal*. 2018;2018(1):4519094.
8. Fornace KM, Diaz AV, Lines J, Drakeley CJ. Achieving global malaria eradication in changing landscapes. *Malaria Journal*. 2021;20(1):69.
9. Debrah I, Afrane YA, Amoah LE, Ochwedo KO, Mukabana WR, Zhong D, et al. Larval ecology and bionomics of *Anopheles funestus* in highland and lowland sites in western Kenya. *PLoS One*. 2021;16(10):e0255321.
10. Mathania MM, Munisi DZ, Silayo RS. Spatial and temporal distribution of *Anopheles mosquito's* larvae and its determinants in two urban sites in Tanzania with different malaria transmission levels. *Parasite Epidemiology and Control*. 2020;11:e00179.
11. Mohamed N. Habitat Characterization of *Anopheles* sp. Mosquito Larvae in Malaria Risk Areas. *Asia Pacific Environmental and Occupational Health Journal*. 2019.
12. Debebe Y, Hill SR, Tekie H, Ignell R, Hopkins RJ. Shady business: understanding the spatial ecology of exophilic *Anopheles* mosquitoes. *Malar J*. 2018;17(1):351.
13. Hinne IA, Attah SK, Mensah BA, Forson AO, Afrane YA. Larval habitat diversity and *Anopheles* mosquito species distribution in different ecological zones in Ghana. *Parasites & Vectors*. 2021;14(1):193.
14. Holmes CJ, Benoit JB. Biological Adaptations Associated with Dehydration in Mosquitoes. *Insects*. 2019;10(11):375.
15. Oheneba-Dornyo TV, Amuzu S, Maccagnan A, Taylor T. Estimating the Impact of Temperature and Rainfall on Malaria Incidence in Ghana from 2012 to 2017. *Environmental Modeling & Assessment*. 2022;27(3):473-489.
16. Villena OC, Arab A, Lippi CA, Ryan SJ, Johnson LR. Influence of environmental, geographic, socio-demographic, and epidemiological factors on presence of malaria at the community level in two continents. *Scientific Reports*. 2024;14(1):16734.
17. Agyekum TP, Arko-Mensah J, Botwe PK, Hogarth JN, Issah I, Dwomoh D, et al. Effects of Elevated Temperatures on the Growth and Development of Adult *Anopheles gambiae* (s.l.) (Diptera: Culicidae) Mosquitoes. *J Med Entomol*. 2022;59(4):1413-1420.
18. Barreaux AMG, Stone CM, Barreaux P, Koella JC. The relationship between size and longevity of the malaria vector

- Anopheles gambiae (s.s.) depends on the larval environment. *Parasites & Vectors*. 2018;11(1):485.
19. Ezihe C, Chikezie F, Egbuche C, Nwankwo E, Onyido A, Aribodor DN, et al. Seasonal Distribution and Micro-Climatic Factors Influencing the Abundance of the Malaria Vectors in South-East Nigeria. *Journal of Mosquito Research*. 2017.
20. Shapiro LLM, Whitehead SA, Thomas MB. Quantifying the effects of temperature on mosquito and parasite traits that determine the transmission potential of human malaria. *PLOS Biology*. 2017;15(10):e2003489.
21. Koffi AA, Camara S, Ahoua Alou LP, Oumbouke WA, Wolie RZ, Tia IZ, et al. Anopheles vector distribution and malaria transmission dynamics in Gbêkê region, central Côte d'Ivoire. *Malaria Journal*. 2023;22(1):192.
22. Musonda M, Sichilima AM. The Effect Of Total Dissolved Solids, Salinity And Electrical Conductivity Parameters Of Water On Abundance Of Anopheles Mosquito Larvae In Different Breeding Sites Of Kapiri Mposhi District Of Zambia. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2019;8.
23. Mereta ST, Yewhalaw D, Boets P, Ahmed A, Duchateau L, Speybroeck N, et al. Physico-chemical and biological characterization of anopheline mosquito larval habitats (Diptera: Culicidae): implications for malaria control. *Parasites & Vectors*. 2013;6(1):320.
24. Asare EO, Tompkins AM, Amekudzi LK, Ermert V, Redl R. Mosquito breeding site water temperature observations and simulations towards improved vector-borne disease models for Africa. *Geospatial Health*. 2016;11(s1).
25. Tchigossou G, Akoton R, Yessoufou A, Djegbe I, Zeukeng F, Atoyebi SM, et al. Water source most suitable for rearing a sensitive malaria vector, Anopheles funestus in the laboratory. *Wellcome Open Res*. 2017;2:109.
26. Atieli HE, Zhou G, Lee M-C, Kweka EJ, Afrane Y, Mwanzo I, et al. Topography as a modifier of breeding habitats and concurrent vulnerability to malaria risk in the western Kenya highlands. *Parasites & Vectors*. 2011;4(1):241.
27. Kibuthu TW, Njenga SM, Mbugua AK, Muturi EJ. Agricultural chemicals: life changer for mosquito vectors in agricultural landscapes? *Parasit Vectors*. 2016;9(1):500.
28. Akeju AV, Olusi TA, Simon-Oke IA. Effect of physicochemical parameters on Anopheles mosquitoes larval composition in Akure North Local Government area of Ondo State, Nigeria. *The Journal of Basic and Applied Zoology*. 2022;83(1):34.
29. Nikookar SH, Fazeli-Dinan M, Azari-Hamidian S, Mousavinasab SN, Aarabi M, Ziapour SP, et al. Correlation between mosquito larval density and their habitat physicochemical characteristics in Mazandaran Province, northern Iran. *PLoS neglected tropical diseases*. 2017;11(8):e0005835.
30. Getachew D, Balkew M, Tekie H. Anopheles larval species composition and characterization of breeding habitats in two localities in the Ghibe River Basin, southwestern Ethiopia. *Malaria Journal*. 2020;19:1-13.
31. Dida GO, Gelder FB, Anyona DN, Abuom PO, Onyuka JO, Matano A-S, et al. Presence and distribution of mosquito larvae predators and factors influencing their abundance along the Mara River, Kenya and Tanzania. *Springerplus*. 2015;4:1-14.
32. Imai N, White MT, Ghani AC, Drakeley CJ. Transmission and control of Plasmodium knowlesi: a mathematical modelling study. *PLoS Negl Trop Dis*. 2014;8(7):e2978.
33. Byrne I, Aure W, Manin BO, Vythilingam I, Ferguson HM, Drakeley CJ, et al. Environmental and spatial risk factors for the larval habitats of Plasmodium knowlesi vectors in Sabah, Malaysian Borneo. *Scientific Reports*. 2021;11(1):11810.
34. Moyes CL, Shearer FM, Huang Z, Wiebe A, Gibson HS, Nijman V, et al. Predicting the geographical distributions of the macaque hosts and mosquito vectors of Plasmodium knowlesi malaria in forested and non-forested areas. *Parasit Vectors*. 2016;9:242.
35. Amir A, Shahari S, Liew JWK, de Silva JR, Khan MB, Lai MY, et al. Natural Plasmodium infection in wild macaques of three states in peninsular Malaysia. *Acta Tropica*. 2020;211:105596.
36. Pramasivan S, Ngui R, Jeyaprakasam NK, Liew JWK, Low VL, Mohamed Hassan N, et al. Spatial distribution of Plasmodium knowlesi cases and their vectors in Johor, Malaysia: in light of human malaria elimination. *Malaria Journal*. 2021;20(1):426.
37. Pramasivan S, Ngui R, Jeyaprakasam NK, Low VL, Liew JWK, Vythilingam I. Spatial analyses of Plasmodium knowlesi vectors with reference to control interventions in

- Malaysia. *Parasites & Vectors*. 2023;16(1):355.
38. Laporta GZ, Ilacqua RC, Bergo ES, Chaves LSM, Rodovalho SR, Moresco GG, et al. Malaria transmission in landscapes with varying deforestation levels and timelines in the Amazon: a longitudinal spatiotemporal study. *Scientific Reports*. 2021;11(1):6477.
39. Fornace KM, Abidin TR, Alexander N, Brock P, Grigg MJ, Murphy A, et al. Association between Landscape Factors and Spatial Patterns of *Plasmodium knowlesi* Infections in Sabah, Malaysia. *Emerg Infect Dis*. 2016;22(2):201-208.
40. Johnson E, Sunil Kumar Sharma R, Ruiz Cuenca P, Byrne I, Salgado-Lynn M, Suraya Shahar Z, et al. Landscape drives zoonotic malaria prevalence in non-human primates. *eLife*. 2024;12:RP88616.
41. Barros FS, Honório NA. Deforestation and Malaria on the Amazon Frontier: Larval Clustering of *Anopheles darlingi* (Diptera: Culicidae) Determines Focal Distribution of Malaria. *Am J Trop Med Hyg*. 2015;93(5):939-953.
42. Rerolle F, Dantzer E, Lover AA, Marshall JM, Hongvanthong B, Sturrock HJ, et al. Spatio-temporal associations between deforestation and malaria incidence in Lao PDR. *Elife*. 2021;10.
43. Fornace KM, Brock PM, Abidin TR, Grignard L, Herman LS, Chua TH, et al. Environmental risk factors and exposure to the zoonotic malaria parasite *Plasmodium knowlesi* across northern Sabah, Malaysia: a population-based cross-sectional survey. *The Lancet Planetary Health*. 2019;3(4):e179-e86.
44. Ma J, Li J, Wu W, Liu J. Global forest fragmentation change from 2000 to 2020. *Nature Communications*. 2023;14(1):3752.
45. Matsumoto-Takahashi ELA, Iwagami M, Oyoshi K, Sasaki Y, Hongvanthong B, Kano S. Deforestation inhibits malaria transmission in Lao PDR: a spatial epidemiology using Earth observation satellites. *Tropical Medicine and Health*. 2023;51(1):60.
46. Hoffman-Hall A, Puett R, Silva JA, Chen D, Bredder A, Shevade V, et al. Comparison of deforestation and forest land use factors for malaria elimination in Myanmar. *IJID Regions*. 2023;8:75-83.
47. Kripa PK, Thanzeen PS, Jaganathasamy N, Ravishankaran S, Anvikar AR, Eapen A. Impact of climate change on temperature variations and extrinsic incubation period of malaria parasites in Chennai, India: implications for its disease transmission potential. *Parasit Vectors*. 2024;17(1):134.
48. Kahamba N, Finda M, Ngowo H, Msugupakulya B, Baldini F, Koekemoer L, et al. Using ecological observations to improve malaria control in areas where *Anopheles funestus* is the dominant vector. *Malaria Journal*. 21.
49. Sinka M, Golding N, Massey N, Wiebe A, Huang Z, Hay S, et al. Modelling the relative abundance of the primary African vectors of malaria before and after the implementation of indoor, insecticide-based vector control. *Malaria Journal*. 15.
50. Christiansen-Jucht C, Parham PE, Saddler A, Koella JC, Basáñez M-G. Temperature during larval development and adult maintenance influences the survival of *Anopheles gambiae* s.s. *Parasites & Vectors*. 2014;7(1):489.