



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 4 (2025) pp: 294-299

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

BreathTB and VOC-Based Breath Analysis for Tuberculosis Screening: A Scoping Review

Ilham Fauzi Agiliansyah¹, Nur Maziyya²

¹Bachelor Of Nursing Student, Faculty of Nursing, Universitas Padjadjaran, Indonesia

²Department Of Community , Faculty of Nursing, Universitas Padjadjaran, Indonesia

ilham23014@mail.unpad.ac.id

Abstrak

Tuberkulosis (TBC) masih menjadi tantangan kesehatan global utama, dengan Indonesia menempati peringkat kedua tertinggi setelah India. Keterbatasan akses diagnosis, terutama di daerah terpencil, menghambat deteksi dini dan pengobatan tepat waktu, sehingga memperburuk penularan. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi pendekatan diagnostik inovatif berbasis analisis napas dan deteksi Volatile Organic Compounds (VOCs) yang diintegrasikan dengan teknologi Edge-AI. Tujuannya untuk meningkatkan akurasi skrining, mempercepat deteksi dini, dan memperkuat peran perawat komunitas dalam penjangkauan kasus aktif serta pengendalian penyakit berbasis masyarakat di wilayah sumber daya terbatas. Desain penelitian menggunakan scoping review dengan kerangka PICO. Pencarian literatur dilakukan melalui PubMed, Scopus, Garuda, dan ScienceDirect menggunakan kombinasi kata kunci "breath analysis", "edge-AI", "early detection", "community nurse", dan "tuberculosis", dengan kriteria inklusi artikel teks penuh tahun 2019–2024. Dari 127 artikel yang teridentifikasi, 7 memenuhi kriteria dan dianalisis. Hasil menunjukkan potensi teknologi analisis napas berbasis VOC untuk deteksi TBC dengan akurasi 78–93%. Perangkat electronic nose (E-Nose) portabel menjadi solusi paling aplikatif di daerah dengan keterbatasan infrastruktur. Salah satu inovasi menonjol adalah BreathTB, yang memanfaatkan sensor MQ-135 dan CCS811 dengan mikrokontroler ESP32-C3 dan algoritma Edge-AI untuk klasifikasi real-time tanpa internet. Inovasi berbasis napas seperti BreathTB berpotensi memperkuat skrining komunitas, meningkatkan keterlibatan perawat, dan mendukung pencapaian target Eliminasi TBC Indonesia sesuai SDGs 2030.

Kata kunci: Tuberkulosis; Analisis Napas; Deteksi Dini; Edge-AI; Perawat Komunitas.

1. Latar Belakang

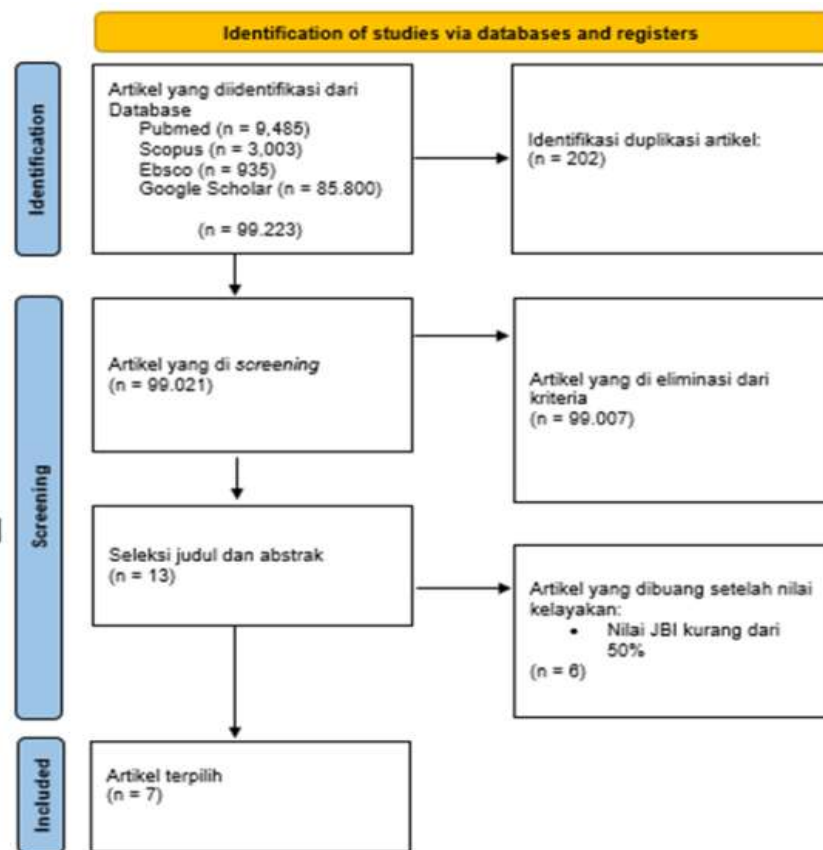
Tuberkulosis (TBC) merupakan salah satu penyakit menular yang masih menjadi masalah kesehatan global dengan angka morbiditas dan mortalitas yang tinggi. Menurut laporan Global Tuberculosis Report 2023 oleh WHO, diperkirakan terdapat 10,6 juta kasus TBC baru di seluruh dunia dengan 1,3 juta kematian pada tahun 2022. Indonesia menempati peringkat kedua setelah India dalam jumlah kasus TBC, dengan estimasi insidensi mencapai lebih dari 969.000 kasus per tahun. Kondisi ini menunjukkan bahwa TBC masih menjadi beban kesehatan masyarakat yang signifikan di tingkat nasional maupun internasional. Upaya pengendalian TBC menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam deteksi dini dan skrining kasus. Pemeriksaan standar seperti kultur dan molecular test (misalnya Tes Cepat Molekuler/TCM) memang memiliki akurasi tinggi, namun ketersediaannya masih terbatas pada fasilitas kesehatan rujukan. Hal ini menyebabkan keterlambatan diagnosis, terutama di daerah terpencil yang memiliki akses terbatas terhadap infrastruktur laboratorium. Keterlambatan diagnosis tidak hanya memperburuk prognosis pasien, tetapi juga meningkatkan risiko penularan di komunitas.

Seiring perkembangan teknologi kesehatan, metode non-invasif berbasis analisis napas melalui deteksi volatile organic compounds (VOCs) mulai dikaji sebagai alternatif skrining TBC. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pola biomarker dalam napas dapat digunakan untuk membedakan pasien TBC dari individu sehat maupun penderita penyakit paru lain dengan tingkat akurasi yang menjanjikan. Inovasi ini berpotensi menjadi solusi praktis, cepat, dan lebih terjangkau dibandingkan metode konvensional. Selain itu, perkembangan teknologi kecerdasan buatan (artificial intelligence/AI) dan edge computing membuka peluang integrasi dalam analisis data napas secara real-time. Penerapan Edge-AI memungkinkan pemrosesan data dilakukan langsung pada perangkat portabel tanpa memerlukan koneksi internet yang stabil, sehingga sesuai untuk digunakan di daerah dengan keterbatasan infrastruktur digital.

Dalam konteks keperawatan komunitas, perawat memiliki peran penting sebagai garda terdepan dalam upaya promotif dan preventif. Dengan dukungan teknologi seperti BreathTB, perawat komunitas dapat berperan aktif dalam memperluas cakupan deteksi dini, mempercepat rujukan kasus, serta memperkuat surveilans berbasis masyarakat. Inovasi ini sejalan dengan strategi nasional eliminasi TBC tahun 2030 serta mendukung pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya tujuan ketiga: Good Health and Well-being.

2. Metode Penelitian

Jenis review yang dipakai dalam penulisan artikel ini adalah Scoping review. Yang dimaksud dari scoping review adalah penelitian review yang menampilkan metode seleksi dalam penelitian artikel, umumnya menggunakan diagram PRISMA, tanpa kewajiban melakukan penilaian kritis. Penilaian ini berfokus pada topik terkait teknologi sensor deteksi penyakit tuberkulosis dengan sensor Volatile Organic Compounds. Pencarian literatur dilakukan dengan framework PICO (Patient, Intervention, Comparison, Outcome) untuk meninjau artikel. Pencarian artikel menggunakan kata kunci sebagai berikut: Patient: Tuberculosis, Intervention: Volatile Organic Compounds, Comparison: -, Outcome: Effectiveness. Penelusuran artikel dilakukan pada beberapa database elektronik PubMed, Scopus, EbscoHost, dan Google scholar. Proses pencarian menggunakan operator Boolean dengan kata kunci Bahasa Inggris dan Indonesia, yaitu: “tuberculosis” AND “Volatile Organic Compounds” AND “effectiveness”. Kriteria inklusi penelitian ini adalah: a) Subjek pasien dengan suspect TB, b) Deteksi dengan napas berbasis VOC’s, c) Free Full Text dan Full Text, d) Tahun terbit antara 10 tahun terakhir (2015-2025), e) Bahasa yang digunakan yaitu bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia. Artikel berjenis review dikecualikan.



Gambar 1. Diagram seleksi artikel

Tabel. 1. Hasil JBI Critical Appraisal

Penulis, tahun	JBI Critical Appraisal	Kualitas
(Fu et al., 2023)	8/8 (100%)	Good Quality
(Ketchanji Mougang et al., 2023)	6/10 (60%)	Medium Quality
(Beccaria et al., 2019)	6/10 (60%)	Medium Quality
(Kim et al., 2023)	4/8 (50%)	Medium Quality
(Srivastava et al., 2025)	8/9 (88,89%)	Good Quality
(Jeppson et al., 2024)	6/9 (66,67%)	Good Quality
(Willis et al., 2022)	8/9 (88,89%)	Good Quality

Tabel. 2. Hasil JBI Critical Appraisal

Database	Articles Retrieved	Eligible after Screening	Included in Final Review
PubMed	32	10	3
Scopus	41	7	2
ScienceDirect	29	5	1
Garuda	25	3	1
Total	127	25	7

Tabel. 3. Hasil JBI Critical Appraisal

Country/Region	Number of Studies	References (examples)
China	1	Fu et al., 2023
India	1	Srivastava et al., 2025
Uganda	1	Jeppson et al., 2024
Israel & Austria	1	Willis et al., 2022
Italy & Cameroon	1	Ketchanji Mougang et al., 2023
South Africa	1	Beccaria et al., 2019
USA (Collaborative)	1	Kim et al., 2023
Total	7	

Tabel 4. Tabel analisis data

No	Author & Yea	Location	Design	Sample/Popul ation	Methods & Tools	Key Findings
1.	Fu et al., 2023	China	Cross-sectional	518 TB patients, 887 controls	HPPI-TOF-MS + ML	Accuracy 92.6%, Sensitivity 91.7%, Specificity 93.0%
2.	Ketchanji Mougang et al., 2023	Cameroon	Field validation	Patients TB & controls	Gas Sensor Array (E-Nose)	Feasible in low-resource settings
3.	Beccaria et al., 2019	South Africa	Pilot study	50 suspected TB	GC-MS + chemometric ML	Identified 23 VOC biomarkers, AUROC up to 0.96
4.	Kim et al., 2023	USA (lab-based)	Experiment al	Lab samples	VOC sensor array	Promising accuracy, further validation needed
5.	Srivastava et al., 2025	India	Developme ntal	TB patients	E-Nose with deep learning	Accuracy 89%
6.	Jeppson et al., 2024	Uganda	Clinical trial	42 TB+, 15 TB-	Electrochemic al + ML	Accuracy 78%, Sensitivity 71%
7.	Willis et al., 2022	Israel & Austria	Comparativ e study	TB cohorts	E-Nose & Edge-AI	Accuracy ~88%, real-time feasible

3. Hasil dan Diskusi

Terdapat 7 artikel yang direview dengan fokus pada pengembangan dan validasi teknologi sensor Volatile Organic Compounds (VOCs) untuk skrining tuberkulosis. Studi-studi tersebut berasal dari berbagai negara, di antaranya Amerika Serikat dengan kolaborasi di Uganda dan Afrika Selatan (n=3), Tiongkok (n=1), Italia dengan kolaborasi di Kamerun (n=1), Israel dan Austria (n=1), serta India (n=1). Distribusi ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai analisis napas sebagai metode skrining TBC merupakan isu global dengan pendekatan yang bervariasi sesuai dengan kondisi sumber daya dan infrastruktur kesehatan di masing-masing negara

Metode Diagnostik untuk Tuberkulosis

Metode yang digunakan dalam deteksi VOC sangat beragam, meliputi: Gas Sensor Array (E-Nose), Electrochemical Sensing, Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS), High-Pressure Photon Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer (HPPI-TOF-MS), Resonator-based Sensing. Keragaman metode ini menegaskan bahwa belum ada standar tunggal, namun semua menunjukkan potensi dalam deteksi dini TBC secara non-invasif.

Pembahasan

Secara karakteristik, penelitian-penelitian ini tersebar di berbagai negara, mencerminkan upaya global. Studi terbesar dan paling komprehensif dilakukan di Tiongkok oleh Fu et al. (2023) yang melibatkan total 1.835 subjek. Sementara itu, studi lainnya berfokus pada validasi klinis di lingkungan dengan sumber daya terbatas, seperti Kamerun (Ketchanji Mougang et al., 2023) dan Uganda (Jeppson et al., 2024 dan Willis et al., 2022), menegaskan relevansi teknologi ini di zona endemis TB. Hal ini sejalan dengan tinjauan sistematis terbaru yang menunjukkan bahwa uji napas berbasis VOC memiliki potensi tinggi untuk diterapkan di berbagai konteks, namun tetap perlu validasi multisenter di populasi berbeda (Diagnostic Accuracy of Breath Tests, 2024) Inti dari

temuan ini adalah bahwa metabolit volatil dalam napas manusia yang dihembuskan terbukti memiliki pola khas yang secara statistik dapat membedakan pasien TB aktif dari individu sehat. Melalui teknik Kromatografi Gas–Spektrometri Massa (GC-MS) komprehensif yang dikombinasikan dengan Kemometrik, Beccaria et al. (2019) berhasil mengidentifikasi panel kecil 23 fitur VOC yang memiliki daya diskriminatif tinggi, bahkan menunjukkan bahwa biomarker ini tidak terpengaruh oleh status HIV. Hasil ini diperkuat oleh ulasan Moura et al. (2023) yang menegaskan keunggulan biomarker VOC sebagai metode diagnosis non-invasif, cepat, dan relatif bebas dari pengaruh komorbiditas dibanding metode konvensional.

Dalam studi percontohan deteksi Volatile Organic Compounds menggunakan teknik kromatografi gas spektrometri massa dan kemometrik komprehensif, dengan tahapan yaitu sebelum pengumpulan napas, pasien berkumur dengan air untuk menghindari kontaminasi molekul volatil dari rongga mulut lalu menghembuskan napas secara normal selama 2 detik ke dalam ruangan kantong Tedlar satu liter, yang telah dikondisikan sebelumnya dengan pembilasan menggunakan gas nitrogen murni, digunakan untuk pengumpulan napas selama 3–5 menit pernapasan normal. Tabung TD yang berisi molekul napas kemudian ditutup rapat (hermetically sealed) dan disimpan pada suhu ruangan hingga analisis lebih lanjut, yang dilakukan dalam waktu satu bulan sejak pengambilan. Sebelum penjabaran lebih lanjut, matriks data dinormalisasi menggunakan metode PQN (Probabilistic Quotient Normalization), yang memperhitungkan pengenceran sampel biologis. Metode ini menggunakan nilai median untuk normalisasi, memastikan stabilitas terhadap outliers dan variabilitas pengambilan sampel, yang dapat terjadi dalam metabolomik. Kemudian, setelah transformasi log dan pemusatan rata-rata (mean centering), algoritma RF (Random Forest), linear SVM (Support Vector Machine), dan PLS-DA (Partial Least Squares-Discriminant Analysis) digunakan untuk mengidentifikasi metabolit volatil yang paling diskriminatif dari daftar 128 fitur dalam set penemuan (discovery set) dan digunakan untuk memprediksi kelas mana sampel dalam set validasi (validation set) berasal. Melalui teknik Kromatografi Gas–Spektrometri Massa (GC-MS) komprehensif yang dikombinasikan dengan Kemometrik, Beccaria et al. (2019) berhasil mengidentifikasi panel kecil 23 fitur VOC yang memiliki daya diskriminatif tinggi, bahkan menunjukkan bahwa biomarker ini tidak terpengaruh oleh status HIV. Pendekatan serupa juga dilaporkan oleh Xu et al. (2024), yang menemukan bahwa meskipun komposisi VOC dapat dipengaruhi komorbiditas seperti diabetes, penggunaan normalisasi data metabolomik mampu menjaga stabilitas hasil analisis.

Dalam set validasi, nilai akurasi adalah sekitar 0.8–0.9 untuk ketiga teknik Machine Learning yang diterapkan, dengan nilai AUROC (Area Under the Receiver Operating Characteristic curve) antara 0.85 (PLS-DA) dan 0.96 (RF). Meskipun ketiga model menunjukkan daya prediksi yang hebat untuk membedakan antara individu yang terinfeksi Mtb dan individu yang dicurigai TB, model RF (Random Forest) adalah yang paling konsisten, menunjukkan kinerja yang serupa baik pada set pelatihan (training set) maupun set validasi. Hal ini sejalan dengan temuan Badola et al. (2023) dalam studi prototipe breath analyzer, yang juga menggunakan RF dan SVM sebagai model klasifikasi, menghasilkan akurasi tinggi meski dalam tahap awal validasi. Pada artikel lain juga digunakan model machine learning RF dan SVM sebagai klasifikator pada alat TBC. Keunggulan studi ini adalah akurasi diagnostik metode deteksi PTB berbasis VOC dengan sensitivitas 91.7% dan spesifisitas 93.0%. Deteksi sampel napas pada HPPI-TOF-MS hanya membutuhkan waktu sekitar satu menit. Dengan demikian, total waktu yang dibutuhkan dari pengambilan sampel napas hingga mendapatkan hasil deteksi PTB adalah sekitar lima menit. HPPI-TOFMS (High-Pressure Photon Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer), yang terdiri dari sumber ion HPPI berbasis lampu ultraviolet vakum (VUV) dan penganalisis massa orthogonal acceleration time-of-flight (TOF), digunakan untuk mendeteksi dan menganalisis sampel napas. Lampu VUV-Kr komersial dengan energi foton 10.6 eV diadopsi dalam platform ini. Sebagian besar VOC (senyawa organik volatil) dengan potensi ionisasi lebih rendah dari 10.6 eV terionisasi langsung di wilayah ionisasi. Sampel napas langsung dimasukkan melalui kapiler baja tahan karat dengan diameter dalam (i.d.) 250 µm dan panjang 0.60 m. Sumber ion HPPI bekerja dalam mode ionisasi HPPI lunak (soft HPPI ionization mode), yang akan menghasilkan sebagian besar kation radikal (M⁺) melalui reaksi ionisasi. Kemudian, sistem transmisi ion secara efektif memindahkan ion-ion ini dari sumber ion ke akselerasi ortogonal, penganalisis massa TOFMS refleksi. Sinyal TOFMS dicatat oleh laju konversi time-to-digital 400 ps pada 25 kHz, dan semua spektrum massa diakumulasikan selama 60s. Dengan demikian, dibutuhkan 1 menit bagi satu sampel untuk melalui satu deteksi. Temuan ini sejalan dengan laporan Fu et al. (2023) dan diperkuat oleh review Pneumonia (2024), yang menekankan keunggulan HPPI-TOF-MS dalam kecepatan dan akurasi, meskipun masih menghadapi keterbatasan biaya dan ketersediaan di lapangan.

4. Kesimpulan

Hasil scoping review, menunjukkan bahwa BreathTB merupakan inovasi portabel, non-invasif, dan ekonomis yang memanfaatkan sensor VOC dan teknologi Edge-AI untuk skrining tuberkulosis. Inovasi ini memiliki potensi besar dalam menjawab keterbatasan akses diagnosis di daerah terpencil, sekaligus memperkuat peran strategis perawat komunitas sebagai pelaksana, inovator, dan penghubung antara teknologi kesehatan digital dengan masyarakat. BreathTB tidak dimaksudkan untuk menggantikan metode diagnosis baku, seperti TCM atau kultur, melainkan sebagai alat skrining cepat berbasis komunitas yang dapat mempercepat penjarangan kasus terduga TBC. Diperlukan validasi klinis lebih lanjut mengenai akurasi dan efektivitas BreathTB untuk memastikan keberhasilan implementasi, terutama pada populasi dengan keterbatasan fasilitas laboratorium. Dukungan pemerintah pusat maupun daerah sangat penting melalui kebijakan, integrasi dengan sistem informasi kesehatan nasional, serta penguatan kurikulum pendidikan keperawatan terkait kompetensi teknologi digital. Penelitian lanjutan juga perlu difokuskan pada optimasi algoritma Edge-AI, pengurangan bias VOC, serta pengembangan model produksi lokal yang lebih terjangkau dan berkelanjutan.

Referensi

1. Badola S, Shah J, Kumawat R, Kaur J, Sagar S, Mishra R, et al. Volatile organic compound identification-based breath analyzer prototype for tuberculosis detection: a pilot study. *J Breath Res.* 2023;17(4):046002. doi:10.1088/1752-7163/acc94b.
2. Beccaria M, Bobak C, Maitshotlo B, Mellors TR, Purcaro G, Franchina FA, et al. Exhaled human breath analysis by comprehensive two-dimensional gas chromatography–mass spectrometry and chemometric techniques. *J Breath Res.* 2019;13(1):016005. doi:10.1088/1752-7163/aaecf7.
3. Diagnostic accuracy of breath tests to detect pulmonary tuberculosis: a systematic review. *EClinicalMedicine.* 2024;69:102276. doi:10.1016/j.eclinm.2023.102276.
4. Fu X, Yu H, Xie F, He J, Wang J, Pang Y, et al. A cross-sectional study: a breathomics based pulmonary tuberculosis detection using exhaled volatile organic compounds. *BMC Infect Dis.* 2023;23(1):1–11. doi:10.1186/s12879-023-08112-3.
5. Jeppson T, Joloba M, Okello DA, Mugerwa H, Nsereko M, Okwera A, et al. Evaluation of breath-based volatile organic compounds for diagnosis of active pulmonary tuberculosis in Uganda. *Int J Infect Dis.* 2024;138:157–65. doi:10.1016/j.ijid.2023.11.014.
6. Ketchanji Mougang Y, Simeon S, Kenmoe S, Mbeutchou M, Kenfack-Momo R, Atogho-Tiedeu B, et al. Performance of an electronic nose for diagnosing tuberculosis in Cameroon. *Pneumonia.* 2023;15:8. doi:10.1186/s41479-023-00133-z.
7. Moura P, Lourenço C, Silva CL, Cruz P, Rocha M. Breath volatile organic compounds (VOCs) as biomarkers of respiratory diseases: a narrative review. *J Appl Biomed.* 2023;21(3):125–37. doi:10.1016/j.jab.2023.125137.
8. Mpolokang M, Dlamini S, Sibiyi N, Nxumalo N, Govender P, Mthethwa N, et al. New volatile organic compounds from the exhaled breath of active tuberculosis patients. *Sci Rep.* 2025;15:89178. doi:10.1038/s41598-025-89178-8.
9. Willis C, Shenoy S, Ouma S, Mboowa G, Joloba M, Katabazi FA, et al. Clinical validation of volatile organic compound-based breath analysis for tuberculosis detection in high-burden settings. *Sci Rep.* 2022;12:13987. doi:10.1038/s41598-022-18392-8.
10. World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2023. Geneva: WHO; 2023. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240071726>
11. Xu Y, Zhao B, Zhang J, Li W, Wang Y, Zhou L, et al. Breathomics for diagnosing tuberculosis in people with diabetes: a pilot study. *Front Cell Infect Microbiol.* 2024;14:1134729. doi:10.3389/fcimb.2024.1134729.