

Portable CBW sensors performance, military communications, and strategic recommendations for Indonesia

Lila Irawati Tjahjo Widuri^{1b}, Sovian Aritonang², and Faonaso Harefa³

¹Calon Doktor Kesehatan Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia, Jakarta

²Dosen Kesehatan Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia, Jakarta

³Calon Doktor Kesehatan Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia, Jakarta

Article Info

Article history

Received : Jun 30, 2026

Revised : Jul 14, 2026

Accepted : Jul 20, 2026

Abstrak

Latar Belakang Ancaman Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive (CBRNE), khususnya chemical warfare agents (CWA) dan biological warfare agents (BWA), dapat menimbulkan dampak sistemik terhadap operasi militer, kesehatan masyarakat, dan keamanan nasional. Sensor portabel memungkinkan deteksi cepat di lapangan, tetapi literatur masih didominasi evaluasi sensitivitas analitik dan belum secara memadai menghubungkan kinerja sensor dengan kesiapan operasional, interoperabilitas komunikasi, dan pengambilan keputusan komando. Tujuan: Penelitian ini bertujuan menyintesis kinerja analitik sensor portabel CWA dan BWA, menilai kelengkapan pelaporan validasi diagnostik, mengevaluasi kematangan bukti dan kesiapan operasionalnya, serta mengembangkan kerangka integrasi sensor dengan Military Communication Systems dan sistem kesehatan pertahanan Indonesia. Metode: Tinjauan sistematis dilakukan berdasarkan PRISMA 2020 dan SWiM melalui pencarian PubMed, Cochrane Library, dan Embase hingga Juni 2026. Risiko bias dinilai menggunakan QUADAS-2 yang diadaptasi untuk studi validasi analitik. Nilai limit of detection dinormalisasi menurut jenis target dan disintesis berdasarkan transduser, elemen pengenalan, waktu respons, spesifisitas, validasi lapangan, serta kesiapan integrasi komunikasi. Hasil: Dari 37 rekaman, sembilan studi memenuhi kriteria inklusi, terdiri atas empat sensor optik, tiga elektrokimia, dan dua quartz crystal microbalance. LOD *Bacillus anthracis* berkisar $3,5 \times 10^2$ CFU mL⁻¹ hingga 4×10^4 spora mL⁻¹, sedangkan target molekuler berkisar 2×10^{-17} M hingga $2,5 \times 10^{-3}$ M. Bukti berada pada tingkat kematangan awal hingga menengah karena terbatasnya validasi lapangan, reproduisibilitas, data sensitivitas-spesifisitas berpasangan, dan kajian interoperabilitas komunikasi. Kontribusi: Penelitian ini menghasilkan Kerangka Integrasi Sensor-Komando CBRN yang menghubungkan deteksi, validasi, transmisi data aman, fusi informasi pada sistem komando dan pengendalian, serta respons kesehatan pertahanan. Kesimpulan: Efektivitas sensor CBW tidak hanya ditentukan oleh sensitivitas analitik, tetapi oleh ketahanan lapangan, standarisasi validasi, keamanan data, interoperabilitas komunikasi, dan kemampuan mengubah hasil deteksi menjadi keputusan operasional dan medis secara cepat.

Abstract

Kata Kunci:

Biological warfare agents;
CBRN defense; Chemical warfare agents; Military Communication Systems; Portable biosensors.

Background: Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive threats, particularly chemical warfare agents and biological warfare agents, can produce systemic consequences for military operations, public health, and national security. Portable sensors enable rapid field detection; however, existing literature remains predominantly focused on analytical sensitivity and rarely connects sensor performance with operational readiness, communication interoperability, and command decision-making. Objective: This study synthesized the analytical performance of portable CWA and BWA sensors, assessed the completeness of diagnostic validation reporting, evaluated evidence maturity and operational readiness, and developed a framework for integrating sensors with Military Communication Systems and Indonesia's defense health system. Methods: A systematic review was conducted following PRISMA 2020 and SWiM guidance. PubMed, the Cochrane Library, and Embase were searched through June 2026. Risk of bias was assessed using an adapted QUADAS-2 instrument. Limits of detection were normalized by target type and synthesized according to transducer type, recognition element, response time, specificity, field validation, and

communication-integration readiness. Results: Of 37 identified records, nine studies met the eligibility criteria, comprising four optical, three electrochemical, and two quartz crystal microbalance sensors. Reported limits of detection for *Bacillus anthracis* ranged from 3.5×10^2 CFU mL⁻¹ to 4×10^4 spores mL⁻¹, while molecular targets ranged from 2×10^{-17} M to 2.5×10^{-3} M. The evidence was judged to be at an early-to-intermediate maturity level because of limited field validation, reproducibility assessment, paired sensitivity-specificity data, and communication interoperability evaluation. Contribution: This review develops a CBRN Sensor-to-Command Integration Framework linking detection, validation, secure data transmission, command-and-control information fusion, and defense health response. Conclusion: The operational effectiveness of portable CBW sensors depends not only on analytical sensitivity but also on field robustness, standardized validation, data security, communication interoperability, and the ability to translate detection results into rapid operational and medical decisions.

Corresponding Author:

Faonaso Harefa,
Konsentrasi Kesehatan Pertahanan
Universitas Pertahanan Indonesia
Jl. Salemba Raya No.14, RT.3/RW.6, Kenari, Kecamatan Senen, Kota Jakarta Pusat (Kode Pos 10430)
faonaso.harefa@doktoral.idu.ac.id

This is an open access article under the [CC BY-NC](#) license.



PENDAHULUAN

Agen perang kimia dan biologis atau chemical and biological warfare (CBW) agents masih menjadi salah satu ancaman paling serius terhadap keamanan global karena berpotensi menimbulkan korban massal, mengganggu stabilitas sosial dan ekonomi, serta menghasilkan dampak jangka panjang terhadap kesehatan masyarakat dan pertahanan negara. Meningkatnya akses terhadap bahan kimia berbahaya, pesatnya perkembangan bioteknologi, serta meningkatnya risiko bioterorisme telah memperkuat kekhawatiran terhadap kemungkinan pelepasan secara sengaja agen perang kimia atau chemical warfare agents (CWAs) dan agen perang biologis atau biological warfare agents (BWAs) terhadap personel militer maupun populasi sipil (Page et al., 2021). Berbagai insiden internasional terkini yang melibatkan agen saraf, bersama dengan terus munculnya ancaman biologis berdampak tinggi, menunjukkan bahwa risiko CBW tidak lagi terbatas pada medan perang konvensional, tetapi juga meluas pada konflik asimetris, terorisme, respons bencana, dan kedaruratan kesehatan masyarakat. Kondisi tersebut menegaskan urgensi kebutuhan terhadap teknologi deteksi yang cepat, andal, dan dapat digunakan di lapangan guna mendukung respons medis, taktis, dan strategis secara tepat waktu (Campbell et al., 2020).

Teknik analitik konvensional berbasis laboratorium, termasuk gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS), polymerase chain reaction (PCR), enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), dan kultur mikroba, masih menjadi standar rujukan dalam identifikasi agen kimia dan biologis berbahaya. Metode-metode tersebut memiliki sensitivitas dan spesifisitas analitik yang tinggi; namun, umumnya memerlukan infrastruktur laboratorium yang canggih, tenaga ahli terlatih, prosedur pemrosesan sampel yang terkendali, serta waktu analisis yang relatif lama. Akibatnya, penggunaannya sering kali terbatas pada lingkungan operasional yang membutuhkan pengambilan keputusan secara cepat, seperti operasi militer, wilayah bencana terpencil, daerah perbatasan, operasi maritim, atau situasi tanggap darurat CBRN. Keterbatasan ini mendorong pengembangan sensor portabel dan biosensor yang mampu memberikan deteksi cepat di lokasi kejadian dengan tetap mempertahankan kinerja analitik yang dapat diterima (Arduini, 2021).

Penelitian terdahulu telah melaporkan berbagai platform sensor portabel untuk deteksi CWA dan BWA, termasuk sistem optik, elektrokimia, imunologis, berbasis asam nukleat, berbantuan nanomaterial, dan mikrofluidik. Teknologi-teknologi tersebut menawarkan berbagai keunggulan, seperti miniaturisasi, waktu respons cepat, kebutuhan volume sampel yang lebih kecil, serta potensi kompatibilitas dengan operasi lapangan. Meskipun demikian, transformasi inovasi berbasis laboratorium menjadi kapabilitas operasional masih menghadapi tantangan. Kinerja analitik yang

dilaporkan sangat bervariasi antarstudi karena setiap penelitian menggunakan agen target, simulasi, mekanisme sensor, elemen pengenalan molekuler, strategi amplifikasi sinyal, luaran analitik, dan satuan pelaporan yang berbeda. Heterogenitas metodologis ini menyulitkan perbandingan langsung antarteknologi sensor dan membatasi identifikasi platform yang paling sesuai untuk diterapkan dalam lingkungan operasional nyata (O'Brien et al., 2021). Keterbatasan lain dalam literatur saat ini adalah belum lengkapnya pelaporan akurasi diagnostik. Banyak studi validasi analitik lebih menekankan limit of detection (LOD) sebagai indikator utama kinerja sensor, sementara informasi mengenai spesifisitas analitik, reaktivitas silang, angka positif palsu dan negatif palsu, repeatability, reproducibility, serta validasi lapangan masih terbatas [8]. Kurangnya pelaporan yang terstandar mengurangi daya banding, transparansi, dan kegunaan praktis dari temuan-temuan yang telah dipublikasikan. Oleh karena itu, diperlukan sintesis sistematis untuk mengevaluasi tidak hanya sensitivitas sensor portabel yang dilaporkan, tetapi juga kelengkapan pelaporan kinerja analitik dan diagnostik pada berbagai platform (Kumar et al., 2022).

Isu penting lain yang masih kurang dieksplorasi adalah integrasi sensor CBW portabel ke dalam Military Communication Systems (MCS). Deteksi yang cepat tidak serta-merta menjamin respons darurat yang efektif apabila hasil deteksi tidak dapat ditransmisikan secara aman, cepat, dan akurat ke jaringan komando dan pengendalian atau command-and-control (C2). Operasi militer modern semakin bergantung pada infrastruktur komunikasi yang saling terhubung, termasuk jaringan tactical Internet Protocol (IP), Terrestrial Trunked Radio (TETRA), komunikasi satelit, Very Small Aperture Terminal (VSAT), dan platform Internet of Things (IoT) berorientasi pertahanan, untuk mendukung kesadaran situasional real-time dan respons terkoordinasi selama insiden CBRN. Namun, tinjauan terdahulu umumnya masih berfokus pada pengembangan sensor dan kinerja analitik, serta jarang mengkaji bagaimana teknologi tersebut dapat diintegrasikan ke dalam arsitektur komunikasi militer untuk memperkuat kesiapan operasional (Meng et al., 2022). Untuk memverifikasi kesenjangan tersebut, penelusuran pendahuluan dilakukan terhadap artikel tinjauan dan tinjauan sistematis pada basis data yang digunakan dalam penelitian ini dengan menggabungkan istilah chemical warfare agents, biological warfare agents, portable sensors, biosensors, systematic review, military communication systems, command-and-control, dan interoperability. Penelusuran tersebut menemukan sejumlah tinjauan yang membahas sensor CWA atau BWA berdasarkan mekanisme deteksi dan kinerja analitik, serta kajian lain mengenai komunikasi CBRN dan sistem komando secara terpisah. Namun, tidak ditemukan tinjauan sistematis yang secara bersamaan mengevaluasi sensor portabel CWA dan BWA, kualitas validasi analitik, kesiapan operasional, dan integrasinya dengan MCS atau sistem C2. Dengan demikian, kesenjangan penelitian ini didasarkan pada hasil penelusuran terstruktur, bukan semata-mata pada asumsi penulis (Pohanka, 2023).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini tidak hanya menempatkan sensor portabel sebagai instrumen analitik, tetapi sebagai bagian dari sistem deteksi, komunikasi, komando, dan respons kesehatan pertahanan. Pendekatan ini diperlukan karena sensor dengan limit of detection yang sangat rendah belum tentu memiliki nilai operasional apabila tidak tahan terhadap kondisi lapangan, tidak menghasilkan data yang dapat diverifikasi, atau tidak terhubung dengan jaringan komunikasi dan pusat pengambilan keputusan. Tinjauan sistematis ini diarahkan oleh tiga pertanyaan penelitian. Pertama, bagaimana kinerja analitik, karakteristik teknis, dan kelengkapan pelaporan validasi sensor portabel untuk mendeteksi CWA dan BWA? Kedua, sejauh mana bukti yang tersedia menunjukkan kematangan teknologi dan kesiapan sensor untuk digunakan dalam lingkungan operasional CBRN? Ketiga, bagaimana sensor portabel dapat diintegrasikan dengan Military Communication Systems, sistem komando dan pengendalian, serta respons kesehatan pertahanan Indonesia?

Penelitian ini memberikan tiga kontribusi ilmiah yang membedakannya dari tinjauan sistematis sebelumnya. Pertama, penelitian ini memperluas evaluasi sensor dari indikator analitik konvensional, seperti limit of detection dan waktu respons, menuju penilaian multidimensi yang mencakup kualitas validasi, kesiapan lapangan, dan interoperabilitas komunikasi (Kufakunesu et al., 2025). Kedua, penelitian ini mengubah unit analisis dari sensor sebagai perangkat tunggal menjadi kesiapan sistem sensor-to-decision, yaitu kemampuan mengubah sinyal deteksi menjadi informasi yang valid, aman, dapat ditransmisikan, dan dapat digunakan oleh sistem komando dan respons medis. Ketiga, penelitian ini mengembangkan Kerangka Integrasi Sensor-Komando CBRN yang

menghubungkan deteksi agen, validasi hasil, transmisi data aman, fusi informasi, keputusan komando, dan respons kesehatan pertahanan. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini bukan sekadar menggabungkan sensor CBW dan komunikasi militer, tetapi membangun kerangka evaluasi kesiapan sistem yang belum menjadi fokus utama tinjauan sebelumnya (Behera, 2026).

Kebaruan penelitian ini tidak semata-mata terletak pada penggabungan tema sensor dan komunikasi militer, tetapi pada perubahan unit analisis dari pendekatan yang berpusat pada sensor menjadi pendekatan kesiapan sistem. Dalam pendekatan ini, keberhasilan teknologi diukur berdasarkan kemampuannya mengubah sinyal deteksi menjadi informasi yang valid, aman, interoperabel, dan dapat digunakan untuk mendukung keputusan operasional dan medis (Rattanaamporn et al., 2025).

METODE

Desain Studi

Penelitian ini dilakukan sebagai tinjauan sistematis untuk mengevaluasi kinerja analitik sensor portabel dan biosensor dalam mendeteksi agen perang kimia atau chemical warfare agents (CWAs) dan agen perang biologis atau biological warfare agents (BWAs). Tinjauan ini mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020) dan dilaporkan berdasarkan panduan Synthesis Without Meta-analysis (SWiM). Protokol tinjauan disusun sebelum proses penyaringan literatur untuk memastikan transparansi metodologis dan reproduibilitas selama keseluruhan proses tinjauan (Purwanto et al., 2025).

Kriteria Kelayakan

Studi dinyatakan layak apabila memenuhi kriteria berikut: (1) mengevaluasi sensor atau biosensor portabel, genggam, wearable, atau dapat digunakan di lapangan yang dirancang untuk mendeteksi CWA, BWA, atau simulasi yang diakui; (2) melaporkan kinerja analitik kuantitatif, sekurang-kurangnya mencakup limit of detection (LOD); (3) menggunakan validasi eksperimental dalam kondisi laboratorium atau simulasi lapangan; dan (4) dipublikasikan sebagai artikel asli yang telah melalui proses telaah sejawat dalam bahasa Inggris. Studi dikeluarkan apabila hanya berfokus pada instrumen laboratorium konvensional tanpa aplikasi portabel, tidak memiliki data kinerja analitik kuantitatif, berupa abstrak konferensi, artikel tinjauan, editorial, bab buku, paten, atau diterbitkan dalam bahasa selain bahasa Inggris (Rashid et al., 2021).

Strategi Pencarian

Pencarian literatur secara komprehensif dilakukan melalui basis data PubMed, Cochrane, dan Embase sejak awal ketersediaan basis data hingga Juni 2026. Istilah pencarian mengombinasikan kosakata terkontrol dan kata kunci bebas yang berkaitan dengan agen perang kimia, agen perang biologis, biosensor, sensor portabel, diagnostik point-of-care, deteksi lapangan, sensitivitas analitik, spesifisitas analitik, dan aplikasi militer.

Seleksi Studi

Seluruh rekaman yang diperoleh diimpor ke dalam perangkat lunak manajemen referensi, kemudian publikasi duplikat dihapus sebelum proses penyaringan. Penyaringan dilakukan dalam dua tahap, yaitu berdasarkan judul dan abstrak, kemudian dilanjutkan dengan penilaian teks lengkap sesuai kriteria kelayakan yang telah ditetapkan sebelumnya. Perbedaan pendapat selama proses seleksi studi diselesaikan melalui diskusi hingga mencapai konsensus. Proses seleksi studi dirangkum menggunakan diagram alir PRISMA 2020.

Ekstraksi Data

Data diekstraksi menggunakan formulir ekstraksi data yang terstandar. Variabel yang diekstraksi meliputi: (1) identifikasi studi, yaitu penulis pertama dan tahun publikasi; (2) agen perang kimia atau biologis yang menjadi target; (3) matriks sampel atau format pengujian; (4) jenis transduser sensor; (5) elemen pengenalan molekuler; (6) strategi amplifikasi sinyal; (7) sensitivitas analitik yang dilaporkan dalam bentuk limit of detection (LOD); (8) waktu uji atau waktu respons; dan (9) spesifisitas analitik, termasuk reaktivitas silang atau panel spesifisitas terhadap agen terkait.

Penilaian Risiko Bias

Kualitas metodologis dan risiko bias dinilai menggunakan versi adaptasi dari Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies-2 (QUADAS-2) yang dimodifikasi untuk studi validasi analitik.

Sintesis Data

Tidak tersedianya data sensitivitas dan spesifisitas diagnostik secara berpasangan, serta tidak cukupnya data tabel kontingensi 2x2, menyebabkan meta-analisis kuantitatif menggunakan hierarchical summary receiver operating characteristic (HSROC) atau model diagnostik bivariat tidak dapat dilakukan. Sebagai gantinya, kinerja analitik disintesis secara deskriptif. Nilai LOD diseragamkan sejauh memungkinkan dengan mengonversi target sel utuh ke dalam satuan colony-forming units (CFU mL⁻¹) atau spora mL⁻¹, dan target molekuler ke dalam konsentrasi molar menggunakan berat molekul yang dilaporkan. Untuk memfasilitasi perbandingan antarsejumlah platform sensor, nilai LOD yang telah ditransformasi log₁₀ dirangkum berdasarkan jenis transduser, strategi pengenalan molekuler, dan pendekatan amplifikasi sinyal. Sintesis naratif selanjutnya mengkaji perbedaan spesifisitas analitik, karakteristik operasional, serta potensi integrasi platform sensor portabel ke dalam Military Communication Systems guna mendukung surveilans CBRN dan pengambilan keputusan secara real-time (Susetyo et al., 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Seleksi Studi

Pencarian basis data mengidentifikasi total 37 rekaman. Setelah penghapusan duplikasi, tersisa 24 rekaman unik untuk penyaringan berdasarkan judul dan abstrak. Setelah studi yang tidak memenuhi kriteria kelayakan yang telah ditetapkan sebelumnya dikeluarkan, penilaian teks lengkap dilakukan terhadap 21 artikel. Pada akhirnya, sembilan studi yang telah dipublikasikan memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dimasukkan ke dalam sintesis kualitatif. Karena tidak ada studi yang disertakan melaporkan sensitivitas dan spesifisitas diagnostik secara berpasangan atau data tabel kontingensi 2 × 2 yang memadai, meta-analisis kuantitatif tidak dapat dilakukan. Proses seleksi studi disajikan dalam diagram alir PRISMA 2020 (Kumar et al., 2022).

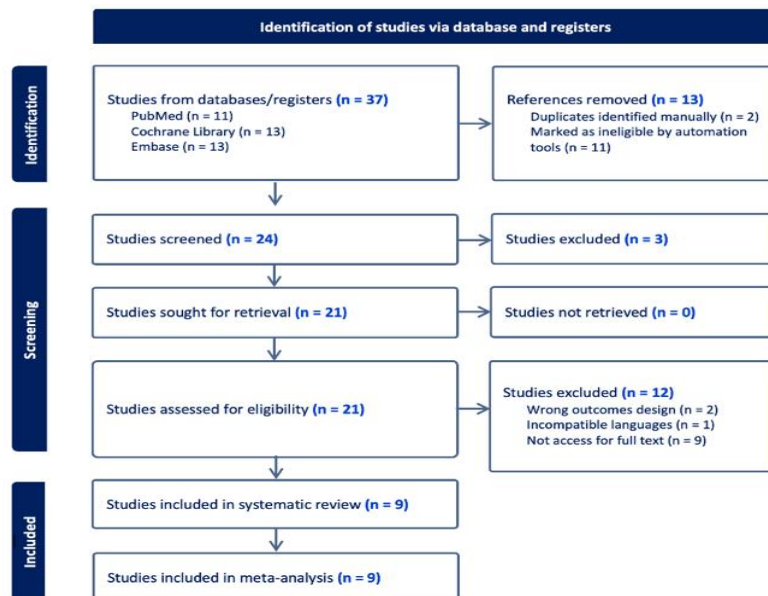


Fig 1. PRISMA flow diagram study selection

Diagram alir PRISMA tersebut menunjukkan bahwa proses seleksi studi dilakukan secara sistematis dan transparan, dimulai dari identifikasi 37 artikel dari tiga basis data, yaitu PubMed, Cochrane Library, dan Embase, kemudian 13 referensi dihapus karena duplikasi maupun alasan teknis

sehingga tersisa 24 studi untuk disaring. Dari hasil penyaringan awal, 3 studi dikeluarkan karena tidak sesuai dengan kriteria, sehingga 21 artikel masuk ke tahap penelusuran dan penilaian kelayakan teks penuh. Pada tahap eligibility, 12 artikel dikeluarkan karena memiliki luaran yang tidak sesuai, model yang tidak kompatibel dengan fokus kajian, atau tidak tersedia akses teks penuh, sehingga akhirnya 9 studi dinyatakan memenuhi kriteria inklusi. Secara metodologis, alur ini memperlihatkan bahwa artikel yang dianalisis telah melalui proses seleksi bertahap, ketat, dan berbasis kriteria, sehingga memperkuat validitas sintesis. Namun, perlu diperhatikan bahwa bagian akhir diagram tertulis “studies included in meta-analysis (n = 9)”, sedangkan dalam narasi sebelumnya disebutkan bahwa meta-analisis tidak dilakukan karena tidak tersedia data sensitivitas-spesifisitas berpasangan atau tabel 2×2 yang memadai; oleh karena itu, istilah tersebut sebaiknya diperbaiki menjadi “studies included in qualitative synthesis (n = 9)” atau “studies included in descriptive synthesis (n = 9)” agar konsisten dengan metode SWiM dan tidak menimbulkan kesan bahwa penelitian ini melakukan meta-analisis kuantitatif (Morawska et al., 2025)

Karakteristik Studi yang Disertakan

Studi yang disertakan mengkaji platform sensor portabel yang menargetkan *Bacillus anthracis*, botulinum neurotoxin type A (BoNT/A), abrin, agen saraf organofosfat, dan simulan sulfur mustard. Tiga jenis transduser utama diidentifikasi, yaitu optik (n = 4), elektrokimia (n = 3), dan *quartz crystal microbalance* (QCM) (n = 2). Elemen pengenalan molekuler yang digunakan meliputi antibodi, probe DNA, enzim, dan substrat peptida, sedangkan strategi amplifikasi sinyal mencakup nanopartikel emas, *fluorescence resonance energy transfer* (FRET), elektrokemiluminesensi, dan inhibisi enzim (Regency et al., 2021).

Kinerja Analitik

Variasi yang cukup besar dalam sensitivitas analitik ditemukan pada berbagai platform sensor. Untuk *Bacillus anthracis*, nilai limit of detection (LOD) yang dilaporkan berkisar antara $3,5 \times 10^2$ CFU mL⁻¹ hingga sekitar 4×10^4 spora mL⁻¹. Pada target molekuler, LOD yang telah diseragamkan berkisar antara sekitar 2×10^{-17} M hingga $2,5 \times 10^{-3}$ M, yang merepresentasikan rentang hampir 14 orde magnitudo. Biosensor optik dan elektrokemiluminesensi mencapai batas deteksi terendah, sedangkan platform elektrokimia umumnya mendeteksi analit pada rentang nanomolar hingga milimolar. Waktu uji bervariasi dari kurang dari 30 menit hingga sekitar 2 jam, bergantung pada desain sensor dan analit target.

Risiko Bias dan Sintesis Bukti

Secara keseluruhan, kualitas metodologis studi yang disertakan berada pada tingkat sedang. Sebagian besar studi telah melaporkan fabrikasi sensor dan sensitivitas analitik secara memadai, tetapi masih memberikan informasi yang terbatas mengenai spesifisitas analitik, reaktivitas silang, reproduisibilitas, atau validasi diagnostik. Selain itu, format pelaporan yang heterogen dan tidak tersedianya data sensitivitas dan spesifisitas secara berpasangan menyebabkan sintesis kuantitatif tidak dapat dilakukan, sehingga diperlukan perbandingan deskriptif terhadap kinerja analitik pada berbagai platform sensor. Sembilan studi cukup untuk memetakan perkembangan teknologi dan mengidentifikasi kesenjangan penelitian, tetapi belum memadai untuk menjadi dasar rekomendasi pengadaan atau implementasi nasional. Oleh karena itu, hasil penelitian ini harus diposisikan sebagai dasar penentuan prioritas validasi laboratorium dan uji operasional, bukan sebagai rekomendasi adopsi teknologi secara definitif.

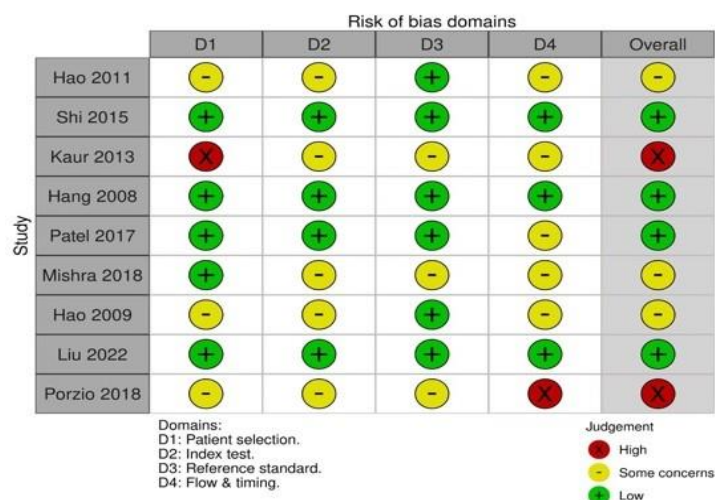


Fig 2. Risk of bias assessment using QUADAS-2

Gambar penilaian risiko bias menggunakan QUADAS-2 menunjukkan bahwa kualitas metodologis sembilan studi yang dianalisis berada pada kategori sedang, karena tidak seluruh studi memiliki risiko bias rendah pada semua domain. Dari keseluruhan penilaian, empat studi menunjukkan risiko bias rendah secara keseluruhan, tiga studi memiliki beberapa kekhawatiran, dan dua studi dinilai berisiko bias tinggi. Risiko bias tinggi terutama tampak pada domain patient selection pada studi Kaur 2013 dan domain flow and timing pada studi Porzio 2018, yang kemudian memengaruhi penilaian keseluruhan menjadi tinggi. Sebagian besar studi relatif baik pada domain index test dan reference standard, tetapi masih terdapat beberapa kekhawatiran terkait konsistensi prosedur pengujian, kesesuaian standar pembandingan, serta kelengkapan alur validasi. Temuan ini menguatkan argumen bahwa meskipun sensor CBW portabel menunjukkan potensi analitik yang menjanjikan, bukti yang tersedia belum sepenuhnya kuat untuk disimpulkan secara kuantitatif karena masih terdapat variasi kualitas metodologis, keterbatasan pelaporan, dan ketidakkonsistenan validasi antarstudi. Oleh karena itu, hasil tinjauan ini lebih tepat ditafsirkan sebagai sintesis deskriptif yang menunjukkan arah perkembangan teknologi, sekaligus menegaskan perlunya standarisasi validasi analitik dan pelaporan diagnostik pada penelitian sensor CBW portabel di masa depan (Tran et al., 2021).

Perbandingan Kinerja Analitik Sensor CBW Portabel

Sensor CBW portabel telah menunjukkan peningkatan yang cukup besar dalam kinerja analitik; namun, heterogenitas yang substansial antarplatform sensor masih membatasi perbandingan langsung. Biosensor optik berbasis afinitas menunjukkan sensitivitas analitik tertinggi, sedangkan sensor elektrokimia menawarkan keunggulan praktis untuk penggunaan di lapangan. Biosensor QCM berbasis probe DNA menunjukkan kinerja yang sangat baik untuk deteksi *Bacillus anthracis*. Meskipun demikian, pelaporan yang tidak konsisten mengenai spesifisitas, reproduibilitas, dan akurasi diagnostik menegaskan perlunya kerangka validasi analitik yang terstandar. Heterogenitas kinerja sensor dipengaruhi oleh perbedaan agen atau simulan, jenis transduser, elemen pengenal, strategi amplifikasi, matriks sampel, preparasi sampel, metode penentuan LOD, metode pembandingan, jumlah replikasi, dan kondisi pengujian. Oleh karena itu, perbedaan nilai LOD tidak dapat langsung digunakan untuk menyatakan bahwa satu platform lebih unggul secara universal.

Integrasi Sensor Portabel ke dalam Military Communication Systems

Efektivitas operasional sensor CBW portabel tidak hanya bergantung pada kinerja analitik, tetapi juga pada integrasinya ke dalam Military Communication Systems (MCS). Interoperabilitas secara real-time dengan jaringan komunikasi taktis berpotensi meningkatkan kesadaran situasional, mempercepat pengambilan keputusan komando dan pengendalian, serta memperkuat respons CBRN yang terkoordinasi. Namun, masih terbatasnya studi yang membahas integrasi sistem komunikasi

menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang penting dan memerlukan kajian lebih lanjut. Hasil penelitian ini sejalan dengan tinjauan sebelumnya yang menunjukkan tingginya sensitivitas sensor optik serta keunggulan portabilitas sensor elektrokimia. Namun, penelitian ini memperluas tinjauan terdahulu dengan menilai kualitas validasi, kesiapan lapangan, risiko bias, dan potensi integrasi sensor dengan sistem komunikasi dan komando. Perbandingan harus disertai nama dan tahun minimal dua systematic review sebelumnya.

Implikasi bagi Kesiapsiagaan CBRN Indonesia dan Arah Penelitian Masa Depan

Bukti yang tersedia belum cukup untuk menetapkan satu platform sebagai sensor terbaik bagi Indonesia. QCM berbasis probe DNA, sensor optik berbasis FRET, dan sensor elektrokimia hanya dapat diposisikan sebagai kandidat yang perlu diprioritaskan untuk validasi lebih lanjut. Pemilihannya harus mempertimbangkan sensitivitas, spesifisitas, reaktivitas silang, waktu respons, ketahanan lingkungan, portabilitas, kebutuhan daya, biaya, kemampuan operator, dan interoperabilitas dengan Military Communication Systems.

Makna Temuan terhadap Kematangan Bukti Ilmiah

Pembahasan perlu menambahkan interpretasi bahwa hanya sembilan studi yang memenuhi kriteria inklusi menunjukkan bahwa bukti ilmiah mengenai sensor CBW portabel masih terbatas dan berada pada tahap pengembangan awal menuju pemanfaatan operasional. Jumlah studi yang kecil tidak hanya menjadi keterbatasan metodologis, tetapi juga menunjukkan bahwa teknologi deteksi kimia dan biologis portabel belum sepenuhnya matang untuk dijadikan dasar kebijakan tanpa validasi tambahan. Oleh karena itu, temuan tinjauan ini perlu dipahami sebagai pemetaan awal terhadap teknologi yang potensial, bukan sebagai kesimpulan akhir mengenai efektivitas diagnostik seluruh platform sensor.

Keseimbangan antara Sensitivitas Analitik dan Kesiapan Operasional

Pembahasan juga perlu menekankan bahwa sensitivitas analitik yang tinggi tidak selalu identik dengan kesiapan operasional di lapangan. Biosensor optik dan elektrokemiluminesensi memang menunjukkan batas deteksi yang sangat rendah, tetapi penggunaannya di lingkungan militer dapat dipengaruhi oleh kebutuhan perangkat optik, stabilitas reagen, ketersediaan daya, kalibrasi, dan keterampilan operator. Sebaliknya, sensor elektrokimia mungkin memiliki sensitivitas yang lebih rendah, tetapi lebih unggul dari sisi portabilitas, kemudahan penggunaan, waktu respons, biaya, dan kesesuaian untuk skrining cepat di lapangan. Dengan demikian, pembahasan perlu menempatkan kinerja sensor dalam kerangka trade-off antara sensitivitas, kecepatan, ketahanan alat, kemudahan penggunaan, dan kebutuhan operasional CBRN

Pengaruh Matriks Sampel dan Kondisi Lingkungan terhadap Validitas Sensor

Bagian pembahasan perlu menambahkan uraian tentang pentingnya matriks sampel dan kondisi pengujian. Kinerja sensor yang baik dalam kondisi laboratorium belum tentu sama ketika digunakan pada sampel lingkungan, aerosol, air, tanah, makanan, darah, serum, atau permukaan benda yang terkontaminasi. Faktor suhu, kelembapan, debu, interferensi kimia, kontaminasi silang, serta stabilitas bahan biologis dapat memengaruhi akurasi deteksi. Oleh karena itu, studi masa depan perlu menguji sensor dalam kondisi yang lebih mendekati medan operasi, termasuk simulasi kontaminasi lapangan dan skenario tanggap darurat CBRN (Harefa, Harahap, Andriani, et al., 2026).

Spesifisitas, Reaktivitas Silang, dan Risiko Keputusan Operasional yang Keliru

Pembahasan perlu memperdalam isu spesifisitas analitik karena kesalahan deteksi dalam konteks CBRN dapat berdampak serius terhadap keputusan komando. Hasil positif palsu dapat memicu alarm berlebihan, pengalihan sumber daya yang tidak perlu, gangguan operasi, dan kepanikan, sedangkan hasil negatif palsu dapat menyebabkan keterlambatan dekontaminasi, evakuasi medis, isolasi area, dan perlindungan personel. Oleh karena itu, pelaporan reaktivitas silang terhadap agen yang mirip, simulant, patogen non-target, dan senyawa interferensi perlu menjadi bagian penting dalam validasi sensor CBW portabel.

Kebutuhan Kerangka Standardisasi Validasi Sensor CBW

Pembahasan perlu menambahkan subbagian khusus mengenai perlunya kerangka validasi yang terstandar. Validasi tidak cukup hanya melaporkan LOD, tetapi juga perlu mencakup limit of quantification, rentang linear, akurasi, presisi, repeatability, reproducibility, recovery rate, stabilitas

penyimpanan, waktu respons, kebutuhan sampel, serta uji spesifisitas. Selain itu, pelaporan sensitivitas dan spesifisitas diagnostik, termasuk data tabel 2×2 , perlu didorong agar penelitian berikutnya memungkinkan meta-analisis kuantitatif. Standardisasi ini penting agar hasil antarstudi dapat dibandingkan secara objektif dan lebih mudah diterjemahkan menjadi standar operasional (Use, 2024)(Nath, 2024).

Arsitektur Integrasi Sensor dengan Sistem Komando dan Pengendalian

Bagian integrasi Military Communication Systems yang sudah ada masih perlu diperdalam dengan menggambarkan alur operasional data. Pembahasan dapat menjelaskan bahwa sensor portabel sebaiknya tidak berdiri sendiri, tetapi menjadi bagian dari rantai informasi mulai dari deteksi di lapangan, identifikasi lokasi berbasis GPS, pencatatan waktu kejadian, pengiriman data terenkripsi, validasi oleh pusat komando, hingga distribusi peringatan kepada satuan terkait. Integrasi ini penting agar hasil deteksi dapat mendukung common operational picture, pengambilan keputusan komando dan pengendalian, penentuan zona kontaminasi, serta prioritas evakuasi dan dekontaminasi (Harefa, Harahap, Dewi, Nurrobi, & Harsono, 2026b).

Keamanan Data, Interoperabilitas, dan Keandalan Komunikasi

Pembahasan perlu menambahkan aspek keamanan dan keandalan komunikasi karena data CBRN merupakan informasi sensitif yang dapat berdampak strategis. Integrasi sensor dengan MCS harus mempertimbangkan enkripsi, autentikasi perangkat, keamanan jaringan, perlindungan dari manipulasi data, serta kemampuan bekerja pada kondisi komunikasi terbatas atau terputus. Selain itu, interoperabilitas antara sensor, jaringan taktis, pusat komando, unsur kesehatan militer, satuan CBRN, dan pemangku kepentingan sipil perlu dibahas sebagai syarat agar deteksi cepat benar-benar menghasilkan respons cepat (Harefa, Harahap, Dewi, Nurrobi, & Harsono, 2026a).

Model Implementasi Bertahap untuk Kesiapsiagaan CBRN Indonesia

Pembahasan perlu menambahkan model implementasi bertahap bagi Indonesia. Tahap awal dapat diarahkan pada uji validasi laboratorium dan uji simulasi lapangan oleh satuan kesehatan pertahanan dan satuan CBRN. Tahap berikutnya mencakup penempatan sensor portabel pada wilayah prioritas, seperti pangkalan militer, pelabuhan, bandara, perbatasan, daerah rawan bencana, dan fasilitas strategis. Tahap lanjutan diarahkan pada integrasi sensor dengan Military Communication System TNI, sistem peringatan dini, serta prosedur respons medis dan dekontaminasi. Dengan demikian, rekomendasi penelitian menjadi lebih aplikatif dan sesuai dengan kebutuhan pertahanan Indonesia (Harefa, Harahap, Dewi, Nurrobi, Sutanto, et al., 2026).

Kontribusi terhadap Kesehatan Pertahanan dan Respons Medis CBRN

Pembahasan juga perlu mengaitkan sensor CBW portabel dengan fungsi kesehatan pertahanan. Deteksi dini tidak hanya penting untuk kepentingan intelijen dan operasi, tetapi juga menentukan kecepatan triase, penggunaan alat pelindung diri, dekontaminasi korban, isolasi area, evakuasi medis, dan distribusi logistik kesehatan. Dengan adanya sensor yang terintegrasi dalam sistem komunikasi militer, unsur kesehatan TNI dapat memperoleh informasi lebih cepat mengenai jenis ancaman, lokasi paparan, tingkat risiko, dan kebutuhan medis lapangan. Hal ini memperkuat kesiapan kesehatan pertahanan dalam menghadapi ancaman kimia dan biologis (Sawhani et al., 2026).

KESIMPULAN

Tinjauan sistematis ini menunjukkan bahwa sensor portabel dan biosensor memiliki potensi untuk mendukung deteksi agen perang kimia dan biologis. Kinerja analitik sensor dipengaruhi oleh jenis agen target, platform transduser, elemen pengenalan molekuler, strategi amplifikasi sinyal, matriks sampel, dan kondisi pengujian. Sensor optik menunjukkan sensitivitas analitik yang tinggi, QCM berbasis probe DNA menunjukkan potensi untuk deteksi *Bacillus anthracis*, sedangkan sensor elektrokimia memiliki keunggulan dalam portabilitas dan skrining cepat agen organofosfat. Namun, temuan tersebut belum dapat digunakan untuk menetapkan satu platform sebagai sensor terbaik karena jumlah studi terbatas, metode validasi heterogen, dan pelaporan spesifisitas, reaktivitas silang, reproduktibilitas, serta akurasi diagnostik belum memadai. Bukti yang tersedia juga belum cukup untuk menunjukkan bahwa sensor

tersebut telah terintegrasi secara empiris dengan Military Communication Systems. Oleh karena itu, integrasi sensor, transmisi data aman, sistem komando dan pengendalian, serta respons kesehatan pertahanan harus diposisikan sebagai arah pengembangan dan validasi selanjutnya. Bagi Indonesia, platform sensor yang diidentifikasi dalam tinjauan ini sebaiknya diperlakukan sebagai kandidat untuk validasi laboratorium dan uji operasional bertahap, bukan sebagai rekomendasi langsung untuk pengadaan nasional. Penelitian berikutnya perlu memprioritaskan standarisasi validasi, pengujian pada matriks dan kondisi lapangan, penilaian akurasi diagnostik, serta interoperabilitas sensor dengan sistem komunikasi militer.

Referensi

- Arduini, F. (2021). Nanomaterials and cross-cutting technologies for fostering smart electrochemical biosensors in the detection of chemical warfare agents. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(2), 1–12. <https://doi.org/10.3390/app11020720>
- Behera, S. (2026). Biosensors in bioterrorism defence: A review of detection strategies and security applications. *Next Research*, 3(July 2025), 101142. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101142>
- Campbell, M., McKenzie, J. E., Sowden, A., Katikireddi, S. V., Brennan, S. E., Ellis, S., Hartmann-Boyce, J., Ryan, R., Shepperd, S., Thomas, J., Welch, V., & Thomson, H. (2020). Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: Reporting guideline. *The BMJ*, 368, 1–6. <https://doi.org/10.1136/bmj.l6890>
- Harefa, F., Harahap, Y., Andriani, D., Dewi, R., Nurrobbi, R. M. T., & Harsono, C. F. (2026). (*Natural Sciences*) Risk-Based Modeling Approach for Strengthening Hospital Preparedness Against CBRNE Threats to Enhance Public Health 基于风险的建模方法：增强医院应对化学、生物、放射、核与爆炸威胁的准备能力以提升公共卫生水平. 53(1).
- Harefa, F., Harahap, Y., Dewi, D. A. R., Nurrobbi, R. M. T., & Harsono, C. F. (2026a). Risk-Based Modeling Approach for Strengthening Hospital Preparedness Against CBRNE Threats to Enhance Public Health. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 53(1).
- Harefa, F., Harahap, Y., Dewi, D. A. R., Nurrobbi, R. M. T., & Harsono, C. F. (2026b). The role of physiotherapy in a health maintenance strategy for retirees in Indonesia to support total defense. *Physical Therapy Journal of Indonesia*, 7(1), 70–78.
- Harefa, F., Harahap, Y., Dewi, D. A. R., Nurrobbi, R. M. T., Sutanto, S., & Harsono, C. F. (2026). An Integrated Risk Analysis Approach in Military Hospitals: Implications for Public Health Preparedness and Resilience. *Media Publikasi Promosi Kesehatan Indonesia (MPPKI)*, 9(1), 99–113.
- Kufakunesu, R., Myburgh, H., & De Freitas, A. (2025). The internet of battle things: a survey on communication challenges and recent solutions. *Discover Internet of Things*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00093-w>
- Kumar, V., Kim, H., Pandey, B., James, T. D., Yoon, J., & Anslyn, E. V. (2022). Recent advances in fluorescent and colorimetric chemosensors for the detection of chemical warfare agents: a legacy of the 21st century. *Chemical Society Reviews*, 52(2), 663–704. <https://doi.org/10.1039/d2cs00651k>
- Meng, W. Q., Sedgwick, A. C., Kwon, N., Sun, M., Xiao, K., He, X. P., Anslyn, E. V., James, T. D., & Yoon, J. (2022). Fluorescent probes for the detection of chemical warfare agents. *Chemical Society Reviews*, 52(September 2022), 601–662. <https://doi.org/10.1039/d2cs00650b>
- Morawska, K., Sikora, T., Grabka, M., Wiśnik-Sawka, M., & Witkiewicz, Z. (2025). Early Detection of Threat Agents, a Review of Bioimmunosensors and Their Prospects. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1080/10408347.2025.2507346>
- Nath, S. (2024). Advancements in food quality monitoring: integrating biosensors for precision detection. *Sustainable Food Technology*, 2(4), 976–992. <https://doi.org/10.1039/d4fb00094c>
- O'Brien, C., Varty, K., & Ignaszak, A. (2021). The electrochemical detection of bioterrorism agents: a review of the detection, diagnostics, and implementation of sensors in biosafety programs for Class A bioweapons. *Microsystems and Nanoengineering*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41378-021-00242-5>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Bmj*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pohanka, M. (2023). Immunosensors for Assay of Toxic Biological Warfare Agents. *Biosensors*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/bios13030402>
- Purwanto, I. E. D., Harsono, C. F., Harefa, F., & Siagian, S. B. U. (2025). Transformation of the research and development agency become a defense policy and technology development agency. *Lebah*, 18(3), 296–310.
- Rashid, A., Rasheed, R., Amirah, N. A., Yusof, Y., Khan, S., & Agha, A. A. (2021). A Quantitative Perspective of Systematic Research: Easy and Step-by-Step Initial Guidelines. *Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry*, 12(9).
- Rattanaamporn, S., Perera, A., Nguyen, A., Ngo, T. B., & Chahl, J. (2025). Drone Imaging and Sensors for Situational Awareness in Hazardous Environments: A Systematic Review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 14(5), 1–28. <https://doi.org/10.3390/jsan14050098>

- Regency, M., Java, E., Bachri, S., Shrestha, R. P., Yulianto, F., Sumarmi, S., Sastro, K., Utomo, B., & Aldianto, Y. E. (2021). Mapping Landform and Landslide Susceptibility Using Remote Sensing , GIS and Field Observation in the Southern Cross. *Geosciences*, 11(4).
- Sawhani, D. K., Harahap, Y., Subianto, Y., & Harefa, F. (2026). Integrating psychological reinforcement modalities to enhance the therapeutic efficacy of physical rehabilitation for disaster survivors. *Physical Therapy Journal of Indonesia*, 7(1), 141-146.
- Susetyo, E., Supriyadi, A. A., & Harefa, F. (2025). The use of statistical applications in defense. *Lebah*, 18(4), 403-412.
- Tran, T. H., Dam, N. D., Jalal, F. E., Al-Ansari, N., Ho, L. S., Phong, T. Van, Iqbal, M., Le, H. Van, Nguyen, H. B. T., Prakash, I., & Pham, B. T. (2021). GIS-Based Soft Computing Models for Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study of Pithoragarh District, Uttarakhand State, India. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9914650>
- Use, I. C. for H. of T. R. for P. for H. (2024). Validation of analytical procedures – ICH Q2(R2). *European Pharmaceutical Review*, 29(1), 5. https://database.ich.org/sites/default/files/ICH_Q2%28R2%29_Guideline_2023_1130.pdf