JIKES: JURNAL ILMU KESEHATAN
Tahun 2026, Volume 5, Nomor 1, Bulan Juli-Desember: hlm 1631-1646
e-ISSN: 2963-069X | URL: https://yptb.org/index.php/jik | e-Mail: jurnalq17@gmail.com

Lisensi: CC-BY

DOI: https://doi.org/10.71456/jik.v5i1.2916

RADIOGRAFI TORAKS DALAM DETEKSI TUBERKULOSIS PARU: TINJAUAN LITERATUR TENTANG TEMUAN, AKURASI SKRINING, DAN *COMPUTER-AIDED DETECTION*

Niken Kasati

RS Tk.II Udayana Denpasar Bali
e-Mail: Nikenkasatie@gmail.com

Submit Tgl: 04-Oktober-2026 Diterima Tgl: 05-Oktober-2026 Diterbitkan Tgl: 20-Oktober-2026

Abstrak: Tuberkulosis (TB) paru masih merupakan masalah kesehatan masyarakat yang substansial, sementara Indonesia menyumbang sekitar 10% beban TB global. Penemuan kasus tetap menjadi tantangan karena sebagian individu berada pada fase subklinis dan berpotensi tidak teridentifikasi melalui skrining berbasis gejala semata. Tinjauan ini menganalisis peran radiografi toraks (*chest X-ray*/CXR) dalam deteksi TB paru dengan menitikberatkan pada pola radiografis, kinerja skrining dan triase, keterbatasan diagnostik, serta perkembangan *computer-aided detection* (CAD). Tinjauan naratif terstruktur dilakukan melalui penelusuran PubMed, PubMed Central, dan dokumen resmi *World Health Organization* (WHO), terutama untuk publikasi tahun 2020–2026, kemudian bukti disintesis secara tematik tanpa meta-analisis. Bukti yang tersedia menunjukkan bahwa CXR memiliki sensitivitas tinggi sebagai alat skrining, yaitu sekitar 94% dengan spesifisitas 89% ketika setiap abnormalitas dianggap positif, serta sekitar 85% dengan spesifisitas 96% ketika penilaian dibatasi pada abnormalitas yang sugestif TB. Konsolidasi, opasitas nodular, kavitas, limfadenopati hilus atau mediastinum, efusi pleura, fibrosis, dan pola milier dapat meningkatkan kecurigaan terhadap TB paru; namun, tidak satu pun bersifat patognomonik, dan radiograf yang tampak normal tidak menyingkirkan penyakit aktif. Sistem CAD menunjukkan kinerja yang menjanjikan dan telah direkomendasikan WHO untuk skrining individu berusia 15 tahun atau lebih, meskipun performanya dipengaruhi oleh ambang skor, karakteristik populasi, dan versi perangkat lunak. Dengan demikian, CXR paling tepat ditempatkan sebagai modalitas skrining, triase, dan pemeriksaan penunjang yang terintegrasi dengan konfirmasi mikrobiologis atau molekuler. Dalam konteks negara dengan beban TB tinggi seperti Indonesia, manfaat klinis dan programatiknya sangat bergantung pada validasi lokal ambang CAD, efektivitas sistem rujukan, dan kesinambungan tindak lanjut pasien.

Kata Kunci: Radiografi Toraks; Tuberkulosis Paru; Skrining; *Computer-Aided Detection*; Pencitraan Diagnostik

Abstract: *Pulmonary tuberculosis (TB) remains a major global public health challenge, with Indonesia accounting for approximately 10% of the global TB burden. Case detection is complicated by the substantial proportion of individuals who may remain subclinical and therefore escape symptom-based screening. This review examines the role of chest radiography (CXR) in pulmonary TB detection, with particular emphasis on radiographic manifestations, screening and triage performance, diagnostic limitations, and the evolving application of computer-aided detection (CAD). A structured narrative review was conducted using PubMed, PubMed Central, and official World Health Organization (WHO) documents published predominantly between 2020 and 2026. Evidence was synthesized thematically without meta-analysis. Available evidence indicates that CXR has high sensitivity for screening, reaching*

Copyright©2026: Niken Kasati

approximately 94% with 89% specificity when any radiographic abnormality is considered positive, and approximately 85% sensitivity with 96% specificity when only abnormalities suggestive of TB are considered. Consolidation, nodular opacities, cavitation, hilar or mediastinal lymphadenopathy, pleural effusion, fibrosis, and miliary patterns may increase suspicion of pulmonary TB; however, none is pathognomonic, and a normal radiograph does not exclude active disease. CAD systems demonstrate promising diagnostic performance and are recommended by WHO for screening individuals aged 15 years and older, although performance varies according to threshold selection, population characteristics, and software version. Accordingly, CXR should be positioned primarily as a screening, triage, and supportive diagnostic modality integrated with microbiological or molecular confirmation. In high-burden settings such as Indonesia, its clinical and programmatic value depends on appropriate local validation of CAD thresholds, effective referral pathways, and continuity of patient follow-up..

Keywords: *Chest Radiography; Pulmonary Tuberculosis; Screening; Computer-Aided Detection; Diagnostic Imaging*

Cara mengutip Kasati, N. (2026). Radiografi Toraks dalam Deteksi Tuberkulosis Paru: Tinjauan Literatur tentang Temuan, Akurasi Skrining, dan Computer-Aided Detection. *JIKES : Jurnal Ilmu Kesehatan*, *5*(1), 1631–1646. https://doi.org/10.71456/jik.v5i1.2916

PENDAHULUAN

Tuberkulosis (TB) merupakan penyakit infeksi yang disebabkan oleh *Mycobacterium tuberculosis* dan paling sering melibatkan paru. Meskipun tersedia intervensi pencegahan dan pengobatan yang efektif, TB tetap menimbulkan beban morbiditas dan mortalitas yang tinggi di berbagai negara. *World Health Organization* (WHO) memperkirakan sekitar 10,7 juta orang mengalami TB pada tahun 2024. Sekitar dua pertiga kasus global terkonsentrasi di delapan negara, dengan Indonesia berkontribusi sekitar 10% terhadap keseluruhan beban tersebut (*World Health Organization* [WHO], 2025a). Besarnya beban ini menegaskan bahwa penemuan kasus secara dini merupakan komponen esensial dalam memutus rantai transmisi sekaligus mempercepat inisiasi terapi.

Penemuan kasus TB menghadapi tantangan karena manifestasi klinis TB paru bersifat heterogen. Sebagian pasien datang dengan batuk dan keluhan respiratorik yang nyata, sedangkan sebagian lainnya berada pada fase subklinis tanpa gejala khas. Pada kelompok subklinis, transmisi tetap dapat berlangsung sebelum diagnosis ditegakkan. Kondisi tersebut membatasi efektivitas skrining yang hanya bertumpu pada gejala. Dalam konteks ini, radiografi toraks (*chest X-ray*/CXR) memiliki peran strategis karena dapat mengidentifikasi abnormalitas paru sebelum etiologi dipastikan dan dapat diterapkan pada populasi dengan risiko tinggi (van't Hoog et al., 2022; WHO, 2021a).

Dibandingkan dengan *computed tomography* (CT), CXR memiliki keunggulan dalam aspek kecepatan pemeriksaan, biaya, dan ketersediaan layanan. Pada sistem radiografi digital, citra juga dapat ditransmisikan melalui teleradiologi maupun dianalisis menggunakan perangkat lunak *computer-aided detection* (CAD). Namun, keunggulan operasional tersebut tidak menjadikan CXR sebagai modalitas diagnostik yang dapat berdiri sendiri. Radiografi merekam perubahan morfologis jaringan, tetapi tidak secara langsung mengidentifikasi keberadaan M. tuberculosis. Oleh sebab itu, temuan radiografis yang mencurigakan lebih tepat digunakan untuk meningkatkan probabilitas klinis dan menentukan kebutuhan pemeriksaan konfirmasi (Nel et al., 2022; WHO, 2021a).

Copyright©2026: Niken Kasati

Dalam praktik klinis, penegakan diagnosis TB paru memerlukan integrasi antara temuan klinis, pemeriksaan mikrobiologis atau molekuler, dan pemeriksaan penunjang. Tes molekuler cepat yang direkomendasikan WHO berperan penting dalam mengonfirmasi etiologi, tetapi implementasinya dipengaruhi oleh ketersediaan alat, kualitas spesimen, biaya, dan alur layanan. Dalam situasi tersebut, CXR tetap relevan sebagai pemeriksaan awal karena bersifat noninvasif, dapat dilakukan secara cepat, dan memberikan informasi mengenai keberadaan abnormalitas paru yang memerlukan evaluasi lebih lanjut (van't Hoog et al., 2022; WHO, 2021a).

WHO memasukkan CXR sebagai salah satu modalitas skrining pada populasi dewasa yang memenuhi kriteria. Apabila setiap abnormalitas radiografis diklasifikasikan sebagai hasil skrining positif, sensitivitas yang dilaporkan mencapai sekitar 94% dengan spesifisitas sekitar 89%. Ketika kriteria dipersempit hanya pada abnormalitas yang sugestif TB, sensitivitas menurun menjadi sekitar 85%, sedangkan spesifisitas meningkat menjadi sekitar 96% (WHO, 2021a). Perbedaan tersebut menunjukkan adanya trade-off antara sensitivitas dan spesifisitas serta mempertegas fungsi CXR sebagai alat seleksi untuk menentukan individu yang memerlukan pemeriksaan konfirmasi, bukan sebagai dasar tunggal diagnosis.

Manifestasi TB pada CXR bersifat heterogen. Usia, status imun, fase penyakit, serta bentuk primer atau pascaprimer dapat memengaruhi pola radiografis yang terlihat. Temuan yang dilaporkan mencakup konsolidasi, opasitas nodular, kavitas, fibrosis, limfadenopati hilus atau mediastinum, efusi pleura, dan pola milier (Nel et al., 2022; Pattamapaspong et al., 2024; Rea et al., 2021; Wetscherek et al., 2022). Riwayat TB sebelumnya, imunosupresi, dan usia lanjut juga dapat menghasilkan pola yang tidak tipikal. Selain itu, sejumlah temuan tersebut dapat dijumpai pada pneumonia bakterial, infeksi jamur, keganasan, atau sekuela pasca-TB sehingga berpotensi menghasilkan positif palsu. Sebaliknya, lesi kecil atau lesi yang tersuperimposisi oleh struktur anatomis dapat luput dari deteksi. Interpretasi CXR karena itu harus ditempatkan dalam konteks klinis, epidemiologis, dan mikrobiologis pasien (Lau et al., 2022; Nel et al., 2022).

Perkembangan radiografi digital memperluas fungsi CXR melalui integrasi teknologi CAD. Sejak 2021, WHO merekomendasikan CAD sebagai alternatif pembacaan manusia pada skrining TB menggunakan radiografi digital untuk populasi tertentu, dan evaluasi produk CAD diperbarui pada 2025 (WHO, 2021a, 2021b, 2025b). Perkembangan tersebut menunjukkan pergeseran peran CXR dari pemeriksaan yang semata-mata bergantung pada interpretasi manusia menuju komponen dalam sistem skrining berbasis kecerdasan artifisial (artificial intelligence/AI).

Tinjauan sebelumnya cenderung membahas manifestasi radiologis TB, akurasi skrining, dan kinerja algoritme AI secara terpisah (misalnya, Hansun et al., 2023; Nel et al., 2022). Padahal, dalam sistem penemuan kasus, ketiga aspek tersebut saling berkaitan karena hasil radiografis memengaruhi keputusan triase, kebutuhan konfirmasi, dan efektivitas implementasi CAD. Oleh karena itu, tinjauan ini menganalisis posisi radiografi toraks dalam deteksi TB paru melalui empat aspek yang saling berhubungan, yaitu pola radiografis, kinerja skrining dan triase, keterbatasan diagnostik, serta perkembangan CAD. Kebaruan tinjauan terletak pada integrasi antara karakteristik radiografis klasik, bukti mutakhir mengenai CAD, dan penempatan CXR dalam alur penemuan kasus, khususnya untuk konteks negara dengan beban TB tinggi.

Copyright©2026: Niken Kasati

METODE PENELITIAN

Artikel ini menggunakan desain tinjauan literatur naratif dengan strategi penelusuran terstruktur. Literatur ditelusuri melalui PubMed, PubMed Central, dan dokumen resmi WHO dengan fokus utama pada publikasi tahun 2020–2026. Kata kunci disusun dari kombinasi istilah "pulmonary tuberculosis", "chest radiography", "chest X-ray", "screening", "diagnostic accuracy", "radiographic findings", dan "computer-aided detection" menggunakan operator Boolean. Selain penelusuran basis data, dilakukan backward citation searching terhadap artikel kunci untuk mengidentifikasi publikasi tambahan yang relevan, terutama terkait perbandingan CXR dengan CT serta implementasi CAD pada program skrining.

Kriteria inklusi mencakup penelitian asli, systematic review, meta-analisis, dan pedoman yang secara langsung membahas TB paru dan radiografi toraks; tersedia dalam bahasa Indonesia atau Inggris; serta memuat informasi mengenai temuan radiografis, fungsi skrining atau triase, akurasi diagnostik, maupun interpretasi berbantuan komputer. Publikasi yang hanya membahas TB ekstraparu tanpa informasi pencitraan paru, laporan kasus tunggal, artikel mengenai modalitas pencitraan lain tanpa hubungan yang jelas dengan CXR, serta publikasi dengan informasi yang tidak memadai untuk menjawab tujuan tinjauan dikeluarkan dari analisis.

Seleksi literatur dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama mencakup penyaringan judul dan abstrak untuk menilai relevansi, sedangkan tahap kedua melibatkan penelaahan naskah lengkap apabila informasi pada abstrak belum memadai untuk menentukan kelayakan. Mengingat desain penelitian berupa tinjauan naratif terstruktur, tidak dilakukan meta-analisis baru maupun penilaian risk of bias secara formal. Nilai sensitivitas dan spesifisitas yang disajikan dalam artikel ini merujuk pada hasil penelitian primer, systematic review, meta-analisis, atau pedoman yang disertakan dalam tinjauan.

Data yang diekstraksi dari setiap sumber meliputi karakteristik populasi, posisi CXR dalam alur diagnostik, pola radiografis, parameter kinerja skrining atau diagnostik, serta keterbatasan interpretasi. Untuk publikasi mengenai CAD, ekstraksi juga mencakup model implementasi perangkat lunak, baik sebagai pengganti pembaca manusia maupun sebagai alat pendukung interpretasi. Pendekatan ini digunakan untuk menangkap aspek diagnostik sekaligus implikasi implementasi dalam layanan.

Literatur terpilih selanjutnya dikelompokkan ke dalam empat tema utama: temuan radiografis TB paru, kinerja CXR dalam skrining dan triase, keterbatasan interpretasi, serta perkembangan CAD. Hasil tidak digabungkan secara kuantitatif, tetapi disintesis secara deskriptif-tematik. Pedoman WHO digunakan untuk menjelaskan posisi CXR dalam program skrining, sedangkan penelitian primer dan artikel tinjauan digunakan untuk memperkaya pembahasan mengenai variasi pola radiologis, kinerja pemeriksaan, dan faktor implementasi. Sintesis berbasis tema dipilih agar pembahasan dapat menunjukkan keterkaitan antara temuan citra, tujuan pemeriksaan, dan konsekuensi klinis yang mengikutinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Temuan

Literatur yang ditelaah menunjukkan bahwa CXR tetap memiliki peran penting pada tahap awal deteksi TB paru. Secara konseptual, fungsi tersebut dapat dibedakan menjadi tiga.

Copyright©2026: Niken Kasati

Pertama, CXR digunakan untuk mengidentifikasi abnormalitas pada individu yang belum diketahui menderita TB. Kedua, hasil radiografi dapat digunakan sebagai dasar triase untuk menentukan individu yang perlu menjalani pemeriksaan konfirmasi. Ketiga, pada pasien dengan kecurigaan klinis TB, CXR berfungsi sebagai pemeriksaan penunjang untuk menilai pola, lokasi, dan luas keterlibatan paru. Ketiga fungsi tersebut menjadi terutama relevan dalam skrining populasi berisiko dan pada situasi ketika kapasitas pemeriksaan molekuler perlu diprioritaskan.

Tujuan pemeriksaan menentukan interpretasi dan implikasi klinis hasil CXR. Dalam skrining, radiografi digunakan sebelum diagnosis untuk mendeteksi abnormalitas yang memerlukan tindak lanjut. Dalam triase, temuan CXR membantu menetapkan prioritas untuk pemeriksaan sputum atau tes molekuler. Sementara itu, pada pasien dengan kecurigaan klinis yang telah terbentuk, radiografi terutama memberikan informasi mengenai distribusi lesi, luas penyakit, dan komplikasi. Pembedaan fungsi tersebut penting karena nilai diagnostik CXR tidak dapat dilepaskan dari konteks penggunaannya. Ringkasan literatur utama yang mendasari sintesis ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sintesis literatur utama mengenai peran radiografi toraks dalam deteksi TB paru

Sumber	Jenis sumber	Fokus	Temuan utama
WHO (2021a)	Pedoman berbasis *systematic review*	CXR sebagai alat skrining TB	CXR dengan kriteria setiap abnormalitas: sensitivitas 94%, spesifisitas 89%; CXR sugestif TB: sensitivitas 85%, spesifisitas 96%.
van't Hoog et al. (2022)	Tinjauan Cochrane (*diagnostic test accuracy review*)	Skrining gejala dan CXR	CXR memiliki sensitivitas tinggi untuk skrining TB paru, tetapi hasil positif memerlukan konfirmasi diagnostik.
Nel et al. (2022)	Tinjauan pencitraan	Manifestasi TB pada pencitraan toraks	CXR merupakan pemeriksaan radiologis utama; limfadenopati, konsolidasi, kavitas, dan pola milier merupakan temuan penting yang bervariasi menurut usia.
Wetscherek et al. (2022)	Tinjauan radiologi	Spektrum TB paru aktif	TB pascaprimer sering melibatkan zona atas dengan kavitas; pola dapat berubah pada pasien imunokompromais.
Rea et al. (2021)	Tinjauan pencitraan toraks	Peran CXR dan CT	CXR berperan sebagai pemeriksaan awal, sedangkan CT membantu karakterisasi lesi ketika temuan CXR tidak jelas atau terdapat kecurigaan komplikasi.
Lau et al. (2022)	Studi komparatif pencitraan	TB subklinis	Kelainan radiografis dapat minimal; CT dapat menunjukkan penyakit yang tidak terdeteksi dengan jelas pada CXR.
Tavaziva et al. (2022)	Meta-analisis data pasien individual (*individual patient data meta-analysis*)	CAD untuk triase TB	Pada sensitivitas gabungan 90%, spesifisitas CAD sekitar 54–61%; kinerja bervariasi menurut populasi serta status HIV dan apusan dahak.
Oloko-Oba dan Viriri (2022)	*Systematic review*	*Deep learning* pada CXR TB	Model *deep learning* menunjukkan potensi tinggi, tetapi heterogenitas data dan keterbatasan validasi eksternal masih menjadi masalah.
Hansun et al. (2023)	*Systematic literature review*	*Machine learning*/*deep learning* untuk deteksi TB pada CXR	AI menunjukkan potensi kinerja tinggi, tetapi kualitas *reference standard* dan risiko bias perlu diperhatikan.

Copyright©2026: Niken Kasati

WHO (2025b)	Pernyataan kebijakan (*policy statement*)	CAD untuk skrining TB	Enam produk CAD memenuhi standar kinerja WHO untuk skrining pada individu berusia ≥15 tahun.

Gambaran Radiografi Toraks pada Tuberkulosis Paru

Tidak terdapat gambaran radiografis tunggal yang bersifat patognomonik untuk TB. Pada TB primer, terutama pada anak dan sebagian pasien dengan gangguan imunitas, limfadenopati hilus atau mediastinum dapat menjadi temuan dominan. Konsolidasi parenkim juga dapat muncul pada berbagai lokasi dan dapat disertai efusi pleura. Karena karakteristik tersebut tumpang tindih dengan penyakit paru lain, diagnosis etiologis tidak dapat ditegakkan semata-mata berdasarkan pola radiografis (Nel et al., 2022; Wetscherek et al., 2022).

Pada TB pascaprimer, lesi lebih sering melibatkan segmen apikal dan posterior lobus atas atau segmen superior lobus bawah. Pola radiografis yang umum dilaporkan meliputi opasitas bercak (patchy opacity), nodul, konsolidasi, dan kavitas berdinding tebal. Kavitas memiliki relevansi klinis karena sering berkaitan dengan beban bakteri yang lebih tinggi dan potensi transmisi yang lebih besar. Namun, keberadaan kavitas tetap tidak dapat diperlakukan sebagai bukti etiologis yang berdiri sendiri (Nel et al., 2022; Rea et al., 2021; Wetscherek et al., 2022).

Keterlibatan lobus atas kerap dianggap sebagai pola klasik TB pascaprimer, tetapi karakteristik tersebut tidak bersifat universal. Pada pasien lanjut usia maupun pasien dengan gangguan imunitas, distribusi lesi dapat berbeda dari pola tipikal. Ketergantungan yang berlebihan pada pola klasik berpotensi menurunkan sensitivitas interpretasi terhadap presentasi atipikal dan, pada akhirnya, meningkatkan risiko kasus terlewat (Nel et al., 2022; Wetscherek et al., 2022).

TB milier memiliki pola radiografis yang berbeda, yaitu berupa nodul-nodul kecil yang tersebar relatif merata pada kedua lapang paru akibat diseminasi hematogen. Pada fase awal, nodul dapat berukuran sangat kecil sehingga sulit dikenali melalui radiografi konvensional. CT memiliki sensitivitas yang lebih tinggi untuk mendeteksi kelainan tersebut karena mampu menampilkan detail parenkim tanpa superimposisi struktur. Meskipun demikian, keterbatasan biaya, akses, dan paparan radiasi menjadikan CT tidak sesuai sebagai modalitas skrining rutin (Nel et al., 2022; Rea et al., 2021).

Interpretasi CXR juga menjadi lebih kompleks pada pasien dengan riwayat TB sebelumnya. Fibrosis, retraksi hilus, kehilangan volume lobus, penebalan pleura, kalsifikasi, bronkiektasis, dan distorsi arsitektur paru dapat menetap setelah penyakit aktif teratasi. Sekuela tersebut dapat menyerupai aktivitas penyakit atau menutupi munculnya lesi baru. Oleh karena itu, informasi mengenai riwayat TB serta perbandingan dengan radiograf terdahulu, apabila tersedia, memberikan nilai diagnostik tambahan dalam menilai perubahan radiologis terbaru.

Heterogenitas manifestasi radiografis juga tampak pada pasien dengan TB yang telah terkonfirmasi. Studi di Uganda melaporkan spektrum temuan berupa infiltrat, konsolidasi, kavitas, fibrosis, bronkiektasis, dan atelektasis pada pasien TB sensitif obat maupun TB resisten rifampisin (Oriekot et al., 2022). Temuan tersebut memperkuat argumentasi bahwa CXR terutama berfungsi untuk memodifikasi tingkat kecurigaan klinis dan menilai keterlibatan paru, bukan untuk menetapkan etiologi secara definitif.

Copyright©2026: Niken Kasati

Faktor Klinis yang Memengaruhi Gambaran Radiografi

Status imun merupakan salah satu determinan penting terhadap pola radiografis. Pada imunosupresi berat, gambaran pascaprimer klasik berupa kavitas di lobus atas dapat menjadi kurang nyata. Sebaliknya, limfadenopati, infiltrat zona bawah, atau kelainan yang lebih difus dapat lebih sering dijumpai. Variasi tersebut memiliki implikasi klinis karena penggunaan pola klasik sebagai acuan yang terlalu ketat dapat menurunkan sensitivitas deteksi TB pada kelompok dengan gangguan imunitas (Nel et al., 2022; Wetscherek et al., 2022).

Usia juga memengaruhi manifestasi radiografis. Pada anak, pembesaran kelenjar getah bening intratoraks dan komplikasi akibat kompresi bronkus lebih sering menonjol, sedangkan kavitas klasik relatif jarang ditemukan. Pada populasi lanjut usia, pola radiografis cenderung lebih atipikal dan dapat tumpang tindih dengan perubahan paru kronik yang telah ada sebelumnya. Oleh sebab itu, interpretasi CXR harus mempertimbangkan karakteristik demografis dan klinis pasien (Nel et al., 2022).

Fase penyakit turut menentukan tingkat keterdeteksian kelainan. Pada TB subklinis, pasien dapat tidak menunjukkan gejala bermakna meskipun perubahan radiologis telah terjadi. Lau et al. (2022) menunjukkan bahwa CT mampu memperlihatkan kavitas, penyebaran endobronkial, dan luas penyakit yang tidak sepenuhnya terlihat pada CXR. Bukti tersebut menjelaskan mengapa radiograf yang normal atau hampir normal tidak selalu cukup untuk mengeksklusi TB aktif pada individu dengan risiko klinis atau epidemiologis yang tinggi.

Kinerja Radiografi Toraks sebagai Alat Skrining dan Triase

Keunggulan utama CXR sebagai alat skrining terletak pada sensitivitasnya. Dalam sintesis WHO, penggunaan kriteria “setiap abnormalitas” menghasilkan sensitivitas sekitar 94% dengan spesifisitas sekitar 89%. Ketika interpretasi dibatasi pada abnormalitas yang sugestif TB, sensitivitas menurun menjadi sekitar 85%, sedangkan spesifisitas meningkat hingga sekitar 96% (WHO, 2021a). Perbedaan tersebut merefleksikan trade-off antara upaya memaksimalkan penemuan kasus dan mengurangi hasil positif palsu.

Nilai sensitivitas dan spesifisitas perlu diinterpretasikan dalam konteks tujuan program. Pada skrining populasi, sensitivitas umumnya diprioritaskan untuk meminimalkan kasus yang terlewat, meskipun pendekatan tersebut meningkatkan proporsi individu tanpa TB yang dirujuk untuk pemeriksaan konfirmasi. Pada populasi dengan prevalensi rendah, nilai prediktif positif juga cenderung menurun sehingga proporsi positif palsu meningkat. Oleh karena itu, hasil CXR abnormal tetap memerlukan verifikasi dengan pemeriksaan diagnostik lanjutan.

Program active case finding dapat memanfaatkan radiografi digital portabel atau unit bergerak untuk menjangkau populasi dengan hambatan akses terhadap fasilitas kesehatan. Pendekatan ini relevan untuk kontak serumah, populasi di lembaga pemasyarakatan, pekerja dengan pajanan tertentu, dan komunitas dengan keterbatasan akses layanan. Nilai programatiknya tidak hanya berasal dari kemampuan CXR mendeteksi abnormalitas, tetapi juga dari kemampuannya mendekatkan proses skrining kepada populasi sasaran.

Dalam fungsi triase, CXR dapat mendukung alokasi tes molekuler ketika kapasitas laboratorium terbatas. Pasien dengan gambaran radiografis yang lebih mencurigakan dapat diprioritaskan untuk pemeriksaan konfirmasi. Namun, pemilihan ambang triase perlu mempertimbangkan konsekuensi klinis dan operasional: ambang yang terlalu ketat dapat menurunkan kebutuhan tes tetapi meningkatkan risiko kasus terlewat, sedangkan ambang

yang terlalu longgar dapat membebani laboratorium tanpa memberikan keuntungan proporsional.

Tinjauan Cochrane pada orang dewasa dengan status HIV negatif atau tidak diketahui mendukung penggunaan CXR sebagai metode skrining yang sensitif (van't Hoog et al., 2022). Dalam pelaksanaan program, radiograf abnormal berfungsi sebagai titik masuk menuju pemeriksaan diagnostik lanjutan. Namun, manfaat skrining hanya dapat direalisasikan apabila individu dengan hasil abnormal benar-benar menjalani pemeriksaan konfirmasi dan tetap berada dalam alur pelayanan hingga diagnosis ditegakkan.

CXR juga bernilai dalam mendeteksi TB subklinis, yaitu ketika gejala klasik belum muncul atau masih minimal. Strategi skrining yang semata-mata mengandalkan gejala berpotensi melewatkan kelompok tersebut. Abnormalitas radiografis dapat menjadi dasar untuk melakukan pemeriksaan sputum meskipun pasien tidak melaporkan keluhan khas. Dengan demikian, radiografi berkontribusi memperluas cakupan penemuan kasus melampaui populasi simptomatik.

Keterbatasan Radiografi Toraks

Keterbatasan mendasar CXR adalah rendahnya spesifisitas etiologis. Konsolidasi, nodul, kavitas, efusi pleura, dan fibrosis bukan merupakan temuan yang eksklusif untuk TB karena dapat dijumpai pada infeksi lain, keganasan, maupun penyakit paru kronik. Selain itu, interpretasi dipengaruhi oleh pengalaman pembaca, mutu citra, posisi pasien, dan ketersediaan informasi klinis. Oleh karena itu, hasil CXR pada dasarnya bersifat probabilistik dan tidak dapat memberikan kepastian etiologi secara mandiri.

Variabilitas antarpembaca merupakan tantangan penting, terutama pada program dengan volume pemeriksaan yang tinggi. Suatu opasitas dapat diklasifikasikan sebagai sugestif TB oleh satu pembaca, tetapi dinilai sebagai perubahan nonspesifik atau sekuela lama oleh pembaca lain. Variasi tersebut secara langsung memengaruhi keputusan rujukan untuk pemeriksaan konfirmasi. Standardisasi kriteria interpretasi, pelatihan pembaca, dan audit mutu karena itu diperlukan untuk mempertahankan konsistensi pembacaan.

Mutu teknis citra merupakan faktor lain yang secara langsung memengaruhi akurasi interpretasi. Inspirasi yang tidak adekuat, rotasi, underpenetration atau overpenetration, artefak pakaian, serta penggunaan proyeksi anteroposterior pada pasien yang tidak dapat berdiri dapat menurunkan visibilitas lesi. Meskipun radiografi digital memungkinkan pengendalian mutu yang lebih baik, kesalahan akuisisi tetap dapat terjadi. Citra dengan kualitas teknis yang tidak memadai karena itu tidak semestinya diperlakukan memiliki nilai diagnostik yang setara dengan citra yang memenuhi standar.

Dosis radiasi CXR relatif rendah dibandingkan CT sehingga lebih sesuai untuk kebutuhan skrining apabila indikasi dan manfaat program telah ditetapkan secara jelas. Meskipun paparan per pemeriksaan tergolong kecil, prinsip justifikasi dan optimasi proteksi radiasi tetap harus diterapkan, terutama pada pemeriksaan berulang dan pada kelompok yang lebih rentan terhadap efek radiasi.

Sebagai modalitas proyeksi dua dimensi, CXR memiliki keterbatasan anatomis akibat superimposisi struktur. Lesi kecil dapat tertutup oleh mediastinum, jantung, diafragma, atau struktur tulang. CT mengurangi keterbatasan tersebut melalui pencitraan irisan anatomi dan memiliki sensitivitas lebih tinggi dalam mendeteksi kavitas kecil, bronkiektasis, limfadenopati, maupun penyebaran endobronkial (Lau et al., 2022; Nel et al., 2022; Rea et al., 2021).

Copyright©2026: Niken Kasati

CXR dan CT sebaiknya diposisikan sebagai modalitas yang saling melengkapi berdasarkan tujuan klinis. CXR lebih sesuai untuk skrining dan evaluasi awal karena cepat, relatif murah, dan tersedia luas. CT lebih tepat digunakan ketika hasil radiografi bersifat meragukan, terdapat kecurigaan komplikasi, atau diperlukan karakterisasi lesi yang lebih rinci. Dengan kerangka tersebut, pemilihan modalitas didasarkan pada kebutuhan klinis, bukan pada perbandingan keunggulan secara absolut.

Temuan radiografis tidak selalu berkorelasi langsung dengan aktivitas mikrobiologis. Sekuela pasca-TB dapat tetap terlihat dalam jangka panjang setelah infeksi tidak lagi aktif, sedangkan sebagian pasien dengan TB aktif hanya menunjukkan abnormalitas minimal. Ketidaksesuaian tersebut menjadi alasan penting untuk tidak mendasarkan keputusan terapi hanya pada CXR tanpa mempertimbangkan temuan klinis dan hasil pemeriksaan mikrobiologis atau molekuler.

Radiografi Digital dan *Computer-Aided Detection*

Pada radiografi digital, citra dapat dianalisis menggunakan sistem CAD yang menghasilkan skor probabilitas atau klasifikasi kemungkinan TB. Meta-analisis berbasis data pasien individual menunjukkan bahwa sejumlah perangkat dapat mencapai sensitivitas tinggi, tetapi spesifisitasnya bervariasi menurut ambang skor dan karakteristik populasi; pada sensitivitas gabungan 90%, spesifisitas CAD berkisar 54–61% (Tavaziva et al., 2022). Temuan ini menunjukkan bahwa kinerja CAD tidak dapat direduksi menjadi satu nilai universal yang berlaku pada seluruh populasi dan konteks pelayanan.

Implementasi CAD dapat mengikuti lebih dari satu model. Dalam model pembaca pengganti, skor perangkat lunak digunakan untuk menentukan apakah pasien melampaui ambang rujukan untuk pemeriksaan sputum. Dalam model pendamping, skor CAD berfungsi sebagai informasi tambahan bagi pembaca manusia. Pemilihan model implementasi perlu mempertimbangkan ketersediaan tenaga ahli, volume skrining, kapasitas pemeriksaan konfirmasi, dan tujuan program.

Sejumlah studi klinis mendukung potensi CAD sebagai alat skrining dan triase. Khan et al. (2020) menunjukkan bahwa analisis CXR berbasis deep learning dapat digunakan sebagai tes triase terhadap TB yang terkonfirmasi kultur. Temuan serupa dilaporkan dalam evaluasi CAD4TB versi 6 (Murphy et al., 2020), perbandingan pembacaan berbantuan komputer dengan GeneXpert (Nishtar et al., 2022), dan evaluasi tiga sistem CAD pada skrining migran multisenter (Gelaw et al., 2023). Namun, variasi kinerja antarperangkat dan antarpopulasi tetap dilaporkan (Hansun et al., 2023; Oloko-Oba & Viriri, 2022; Tavaziva et al., 2022), sehingga validasi lokal merupakan prasyarat sebelum penetapan ambang skor secara rutin.

Implementasi AI tidak hanya berkaitan dengan pemilihan perangkat lunak. Fasilitas kesehatan perlu mengidentifikasi versi algoritme yang digunakan, memastikan kompatibilitas dengan sistem radiografi, dan mengevaluasi performanya pada populasi lokal. Pembaruan perangkat lunak dapat mengubah distribusi skor dan, pada akhirnya, memengaruhi jumlah pasien yang dirujuk untuk pemeriksaan konfirmasi (Qin et al., 2022). Oleh karena itu, tata kelola teknologi, dokumentasi versi, dan evaluasi berkala merupakan bagian integral dari implementasi CAD.

Systematic review mengenai deep learning dan machine learning menunjukkan potensi yang baik untuk deteksi TB pada CXR (Hansun et al., 2023; Oloko-Oba & Viriri, 2022). Namun, performa pada set data penelitian tidak selalu merefleksikan kinerja dalam pelayanan

rutin. Set data penelitian umumnya lebih terkurasi dan homogen dibandingkan citra yang diperoleh dari berbagai mesin, posisi pasien, dan kondisi lapangan. Karena itu, evaluasi efektivitas implementasi di dunia nyata sama pentingnya dengan pengukuran akurasi algoritme.

Pada 2025, WHO menyatakan bahwa enam produk CAD memenuhi standar kinerja untuk skrining TB pada individu berusia 15 tahun atau lebih (WHO, 2025b). Teknologi ini memiliki relevansi khusus pada wilayah dengan volume skrining tinggi atau keterbatasan pembaca terlatih. Meskipun demikian, keputusan implementasi tetap harus mempertimbangkan prevalensi penyakit, kapasitas pemeriksaan konfirmasi, biaya program, serta konsekuensi klinis dari ambang skor yang dipilih.

Integrasi Radiografi dengan Pemeriksaan Mikrobiologis dan Molekuler

Radiografi dan pemeriksaan mikrobiologis atau molekuler menjawab pertanyaan klinis yang berbeda. CXR menggambarkan perubahan anatomis yang dapat meningkatkan kecurigaan terhadap TB dan memberikan informasi mengenai luas keterlibatan toraks, sedangkan tes molekuler maupun kultur bertujuan mendeteksi agen penyebab infeksi. Karena perbedaan fungsi tersebut, kedua kelompok pemeriksaan lebih tepat diintegrasikan dalam suatu algoritme diagnostik. Pada pasien dengan CXR sugestif TB, pemeriksaan sputum menggunakan tes molekuler cepat dapat mempercepat konfirmasi etiologi. Apabila hasil molekuler negatif tetapi gambaran radiologis sangat mencurigakan, kualitas spesimen, probabilitas prates, dan diagnosis alternatif perlu dievaluasi kembali.

CXR tetap bermanfaat ketika sputum sulit diperoleh atau manifestasi klinis tidak khas, tetapi interpretasinya membutuhkan kehati-hatian yang lebih tinggi. Temuan abnormal tidak boleh secara otomatis dikategorikan sebagai TB karena terapi empiris tanpa evaluasi memadai dapat menunda diagnosis penyakit lain. Sebaliknya, hasil radiografi yang normal juga tidak secara definitif menyingkirkan TB. Bukti yang ditelaah secara konsisten menempatkan CXR sebagai komponen dalam algoritme diagnostik, bukan sebagai pemeriksaan tunggal untuk menegakkan diagnosis (WHO, 2021a).

Dalam pemantauan terapi, radiografi dapat membantu mengevaluasi resolusi infiltrat, penutupan kavitas, atau perkembangan fibrosis. Namun, perubahan radiografis tidak selalu berlangsung paralel dengan perbaikan klinis dan bakteriologis, sementara lesi residual dapat menetap setelah pasien dinyatakan sembuh. Oleh sebab itu, radiografi serial lebih tepat dilakukan atas indikasi klinis yang jelas dan diinterpretasikan dengan membandingkan citra awal, bukan semata-mata untuk memperoleh gambaran toraks yang kembali normal.

Implikasi dalam Pelayanan Kesehatan

Dalam pelayanan kesehatan, CXR dapat ditempatkan pada tiga titik utama dalam alur penemuan kasus. Pertama, sebagai alat skrining pada kelompok berisiko untuk mengidentifikasi abnormalitas sebelum gejala berkembang atau memberat. Kedua, sebagai alat triase pada pasien dengan gejala atau faktor risiko untuk memprioritaskan pemeriksaan mikrobiologis. Ketiga, sebagai pemeriksaan penunjang untuk menilai distribusi penyakit, kemungkinan komplikasi, dan diagnosis banding. Penentuan fungsi tersebut perlu disesuaikan dengan prevalensi TB, kapasitas laboratorium, ketersediaan radiografi digital, dan sumber daya manusia.

Peningkatan volume pemeriksaan CXR tidak secara otomatis menghasilkan program penemuan kasus yang efektif. Tanpa akses yang memadai terhadap tes molekuler, perluasan skrining hanya akan meningkatkan jumlah individu berstatus “terduga TB” tanpa kepastian

Copyright©2026: Niken Kasati

diagnosis. Prinsip yang sama berlaku pada penggunaan CAD: manfaat algoritme akan terbatas apabila rujukan sputum, pencatatan hasil, dan tindak lanjut pasien tidak berjalan secara konsisten. Evaluasi program karena itu sebaiknya tidak hanya berfokus pada jumlah CXR yang dilakukan, tetapi juga pada proporsi hasil abnormal yang memperoleh konfirmasi, waktu menuju diagnosis, proporsi pasien yang memulai terapi, dan angka putus tindak lanjut.

Kualitas komunikasi antartenaga kesehatan dapat ditingkatkan melalui pelaporan radiologi yang terstruktur. Laporan sebaiknya memuat lokasi dan karakteristik lesi, penilaian mengenai kesesuaian temuan dengan TB aktif, keberadaan sekuela atau komplikasi, serta rekomendasi korelasi mikrobiologis bila diperlukan. Formulasi yang terlalu definitif berdasarkan CXR saja perlu dihindari. Pernyataan seperti "temuan radiografis sugestif tuberkulosis aktif; korelasikan dengan pemeriksaan mikrobiologis/molekuler" lebih proporsional karena mencerminkan tingkat kepastian yang dapat diberikan oleh radiografi.

Dalam konteks negara dengan beban TB tinggi seperti Indonesia, radiografi digital berpotensi diintegrasikan dengan jejaring rujukan dan teleradiologi sehingga akses terhadap interpretasi yang berkualitas tidak terbatas pada pusat layanan besar. CAD juga berpotensi meningkatkan kapasitas skrining pada volume pemeriksaan yang tinggi. Namun, keputusan implementasi perlu mempertimbangkan biaya lisensi, interoperabilitas, dukungan teknis, keamanan data, serta bukti performa lokal. Mengingat pembaruan versi perangkat lunak dapat mengubah hasil klasifikasi, audit berkala tetap diperlukan (Qin et al., 2022).

Indonesia masih menghadapi kesenjangan antara estimasi insidensi TB dan jumlah kasus yang didiagnosis serta dilaporkan (WHO, 2025a). Dalam situasi tersebut, CXR dapat berkontribusi pada perluasan penemuan kasus apabila diintegrasikan dengan tes molekuler cepat dan sistem rujukan yang berfungsi efektif. Tujuan akhirnya bukan sekadar meningkatkan jumlah diagnosis berbasis radiologi, melainkan mempercepat perjalanan pasien menuju konfirmasi etiologi dan inisiasi terapi yang tepat.

Secara keseluruhan, bukti yang tersedia menunjukkan bahwa kontribusi utama CXR terletak pada peningkatan sensitivitas penemuan kasus dan perluasan skrining melampaui pendekatan berbasis gejala. Namun, abnormalitas radiografis tidak memiliki spesifisitas yang cukup untuk mengonfirmasi TB. Setiap temuan yang mencurigakan karena itu perlu ditindaklanjuti dengan pemeriksaan mikrobiologis atau molekuler. Digitalisasi dan CAD dapat memperluas jangkauan program, tetapi keberhasilan implementasi tetap ditentukan oleh mutu citra, validasi algoritme, kapasitas sistem rujukan, dan keberlanjutan tindak lanjut pasien.

Kesenjangan Bukti dan Arah Pengembangan

Bukti mengenai penggunaan CXR untuk skrining TB relatif kuat, tetapi estimasi akurasi dari suatu penelitian tidak dapat langsung digeneralisasi ke populasi lain. Prevalensi penyakit, karakteristik pasien, jenis perangkat radiografi, dan reference standard dapat berbeda antarstudi. Oleh karena itu, validasi lokal tetap diperlukan, terutama pada kelompok lanjut usia, pasien dengan diabetes melitus, individu dengan riwayat TB, dan pasien dengan penyakit paru kronik yang lebih berisiko menunjukkan pola atipikal atau sekuela yang menyulitkan interpretasi.

Penelitian AI sering menggunakan set data yang lebih terkurasi daripada kondisi pelayanan rutin. Studi implementasi perlu mengakomodasi variasi mesin, posisi pasien, kualitas eksposi, dan prevalensi penyakit sebagaimana dijumpai dalam praktik. Selain ukuran diskriminasi seperti area under the curve (AUC), luaran penelitian sebaiknya mencakup

Copyright©2026: Niken Kasati

indikator yang lebih dekat dengan dampak pelayanan, seperti jumlah pasien yang memerlukan tes konfirmasi, biaya per kasus terdeteksi, waktu hingga diagnosis, dan proporsi pasien yang memulai terapi. Pengalaman implementasi di Vietnam menunjukkan bahwa CAD perlu dievaluasi sebagai bagian dari keseluruhan alur pelayanan, bukan semata-mata sebagai algoritme klasifikasi (Innes et al., 2023).

Ambang skor CAD perlu ditetapkan sesuai dengan tujuan program dan kapasitas sistem pelayanan. Program skrining komunitas yang memprioritaskan sensitivitas tinggi mungkin memerlukan ambang yang berbeda dari fasilitas dengan keterbatasan kapasitas tes molekuler. Ambang yang terlalu rendah dapat meningkatkan beban pemeriksaan konfirmasi, sedangkan ambang yang terlalu tinggi meningkatkan risiko kasus terlewat. Mengingat performa dapat berubah antarversi perangkat lunak, validasi ulang dan audit berkala tetap diperlukan (Qin et al., 2022).

Konsistensi pelaporan CXR pada TB juga masih memerlukan perhatian. Format pelaporan terstruktur yang mencantumkan lokasi lesi, jenis abnormalitas, kemungkinan aktivitas penyakit, sekuela, komplikasi, dan rekomendasi korelasi mikrobiologis dapat meningkatkan kualitas komunikasi antara radiolog, klinisi, dan pengelola program TB. Standardisasi data semacam ini juga mendukung audit mutu dan pengembangan maupun evaluasi sistem CAD.

TB subklinis merupakan area yang masih memerlukan penelitian lebih lanjut. CT dapat memperlihatkan kavitas, penyebaran endobronkial, dan luas penyakit yang lebih besar dibandingkan CXR (Lau et al., 2022), tetapi tidak realistis digunakan sebagai alat skrining populasi secara rutin. Penelitian selanjutnya perlu mengevaluasi kombinasi faktor risiko, karakteristik CXR, dan skor CAD untuk mengidentifikasi pasien yang benar-benar memerlukan CT atau evaluasi tambahan tanpa menimbulkan beban biaya dan paparan radiasi yang tidak proporsional.

Pengembangan peran CXR dalam penanggulangan TB sebaiknya tidak hanya berorientasi pada peningkatan akurasi interpretasi citra. Luaran yang lebih bermakna secara klinis adalah kemampuan pemeriksaan tersebut untuk mempercepat diagnosis definitif, mengurangi kehilangan pasien dalam alur pelayanan, dan mempercepat inisiasi terapi. Oleh karena itu, penelitian mendatang perlu mengintegrasikan aspek radiologi, epidemiologi, laboratorium, sistem informasi, dan ilmu implementasi agar manfaat teknologi dapat dinilai berdasarkan dampaknya terhadap perjalanan pasien dan kinerja sistem kesehatan.

Catatan Praktis dalam Interpretasi Radiografi Toraks

Interpretasi CXR pada dugaan TB sebaiknya diawali dengan penilaian mutu teknis citra. Posisi pasien, derajat inspirasi, rotasi, penetrasi, dan artefak perlu dievaluasi terlebih dahulu karena faktor-faktor tersebut dapat memengaruhi visibilitas serta kesan terhadap suatu lesi. Setelah mutu citra dinilai memadai, pembacaan sebaiknya dilakukan secara sistematis dengan menilai kedua lapang paru, hilus, mediastinum, pleura, diafragma, dan struktur tulang. Pendekatan terstruktur membantu mengurangi kemungkinan kelainan terlewat, terutama pada lesi berukuran kecil atau yang tersuperimposisi oleh struktur anatomis.

Tahap berikutnya adalah memisahkan deskripsi morfologis dari inferensi etiologis. Bentuk, lokasi, distribusi, dan luas kelainan sebaiknya dideskripsikan terlebih dahulu sebelum dikaitkan dengan kemungkinan TB. Sebagai contoh, deskripsi “konsolidasi lobus atas dengan kavitas” memberikan informasi morfologis yang lebih spesifik dibandingkan istilah umum “gambaran TB”. Setelah karakteristik radiografis dijelaskan, interpretasi dapat

Copyright©2026: Niken Kasati

menyatakan bahwa pola tersebut sugestif TB dalam konteks klinis yang sesuai. Pendekatan ini mempermudah korelasi dengan pemeriksaan mikrobiologis dan perbandingan dengan citra terdahulu (Nel et al., 2022; Rea et al., 2021; Wetscherek et al., 2022).

Perbandingan dengan radiograf sebelumnya memiliki nilai penting, khususnya pada pasien dengan riwayat pengobatan TB. Lesi residual dapat menetap selama bertahun-tahun tanpa menandakan penyakit aktif. Sebaliknya, munculnya infiltrat baru, perluasan kavitas, atau perubahan progresif dapat meningkatkan kecurigaan terhadap proses aktif dan menjadi dasar untuk evaluasi lanjutan. Dengan demikian, riwayat penyakit dan akses terhadap citra terdahulu sebaiknya menjadi bagian integral dari proses interpretasi. Pendekatan tersebut tidak menggantikan pemeriksaan mikrobiologis, tetapi meningkatkan makna klinis informasi radiografis (Nel et al., 2022; Wetscherek et al., 2022; WHO, 2021a).

Prinsip yang sama berlaku pada program skrining bervolume tinggi yang menggunakan CAD. Skor algoritme tidak merepresentasikan diagnosis definitif, melainkan instrumen untuk menentukan prioritas pemeriksaan lanjutan. Pasien dengan skor tinggi tetap memerlukan konfirmasi sesuai algoritme pelayanan, sedangkan skor rendah perlu diinterpretasikan bersama gejala, faktor risiko, dan mutu citra. Keberhasilan program lebih ditentukan oleh integrasi antara interpretasi yang sistematis, kriteria rujukan yang jelas, dan tindak lanjut yang terorganisasi daripada sekadar penggunaan teknologi baru (Qin et al., 2022; Tavaziva et al., 2022; WHO, 2025b).

KESIMPULAN

Radiografi toraks tetap memiliki peran penting dalam deteksi dini TB paru karena relatif cepat, terjangkau, tersedia luas, dan memiliki sensitivitas yang memadai untuk skrining. Temuan berupa konsolidasi, opasitas nodular, kavitas terutama di zona atas, limfadenopati hilus atau mediastinum, efusi pleura, fibrosis, dan pola milier dapat meningkatkan probabilitas klinis TB. Namun, tidak satu pun temuan tersebut bersifat spesifik, dan radiograf yang tampak normal tidak secara definitif mengeksklusi penyakit aktif.

Nilai klinis CXR sangat dipengaruhi oleh tujuan penggunaannya. Dalam skrining, radiografi membantu mengidentifikasi individu yang memerlukan evaluasi lebih lanjut. Dalam triase, hasil CXR dapat digunakan untuk memprioritaskan pemeriksaan konfirmasi. Pada evaluasi klinis, pola dan luas lesi memberikan informasi mengenai keterlibatan paru dan kemungkinan komplikasi. Meskipun demikian, seluruh fungsi tersebut dibatasi oleh variabilitas antarpembaca, mutu teknis citra, spesifisitas etiologis yang terbatas, dan kemungkinan adanya lesi yang tidak terdeteksi.

Secara keseluruhan, CXR paling tepat diposisikan sebagai modalitas skrining, triase, dan pemeriksaan penunjang yang terintegrasi dengan penilaian klinis serta konfirmasi mikrobiologis atau molekuler. Radiografi digital dan CAD berpotensi memperluas cakupan skrining dan meningkatkan konsistensi interpretasi, terutama pada wilayah dengan keterbatasan tenaga ahli. Dalam konteks Indonesia, penelitian selanjutnya perlu memprioritaskan validasi ambang skor CAD pada populasi lokal, evaluasi efektivitas biaya, serta pengukuran dampak implementasi CXR terhadap waktu menuju diagnosis dan inisiasi terapi.

Copyright©2026: Niken Kasati

DAFTAR PUSTAKA

Gelaw, S. M., Kik, S. V., Ruhwald, M., Ongarello, S., Egzertegegne, T. S., Gorbacheva, O., Gilpin, C., Marano, N., Lee, S., Phares, C. R., Medina, V., Amatya, B., & Denkinger, C. M. (2023). Diagnostic accuracy of three computer-aided detection systems for detecting pulmonary tuberculosis on chest radiography when used for screening: Analysis of an international, multicenter migrants screening study. *PLOS Global Public Health, 3*(7), e0000402. https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0000402

Hansun, S., Argha, A., Liaw, S.-T., Celler, B. G., & Marks, G. B. (2023). Machine and deep learning for tuberculosis detection on chest X-rays: Systematic literature review. *Journal of Medical Internet Research, 25*, e43154. https://doi.org/10.2196/43154

Innes, A. L., Martinez, A., Gao, X., Dinh, N., Hoang, G. L., Nguyen, T. B. P., Vu, V. H., Luu, T. H. T., Le, T. T. T., Lebrun, V., Trieu, V. C., Tran, N. D. B., Qin, Z. Z., Pham, H. M., Dinh, V. L., Nguyen, B. H., Truong, T. T. H., Nguyen, V. C., Nguyen, V. N., & Mai, T. H. (2023). Computer-aided detection for chest radiography to improve the quality of tuberculosis diagnosis in Vietnam's district health facilities: An implementation study. *Tropical Medicine and Infectious Disease, 8*(11), 488. https://doi.org/10.3390/tropicalmed8110488

Khan, F. A., Majidulla, A., Tavaziva, G., Nazish, A., Abidi, S. K., Benedetti, A., Menzies, D., Johnston, J. C., Khan, A. J., & Saeed, S. (2020). Chest X-ray analysis with deep learning-based software as a triage test for pulmonary tuberculosis: A prospective study of diagnostic accuracy for culture-confirmed disease. *The Lancet Digital Health, 2*(11), e573–e581. https://doi.org/10.1016/S2589-7500(20)30221-1

Lau, A., Lin, C., Barrie, J., Winter, C., Armstrong, G., Egedahl, M. L., Doroshenko, A., Heffernan, C., Asadi, L., Fisher, D., Paulsen, C., Moolji, J., Huang, Y., & Long, R. (2022). A comparison of the chest radiographic and computed tomographic features of subclinical pulmonary tuberculosis. *Scientific Reports, 12*(1), 16567. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21016-7

Murphy, K., Habib, S. S., Zaidi, S. M. A., Khowaja, S., Khan, A., Melendez, J., Scholten, E. T., Amad, F., Schalekamp, S., Verhagen, M., Philipsen, R. H. H. M., Meijers, A., & van Ginneken, B. (2020). Computer aided detection of tuberculosis on chest radiographs: An evaluation of the CAD4TB v6 system. *Scientific Reports, 10*(1), 5492. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62148-y

Nel, M., Franckling-Smith, Z., Pillay, T., Andronikou, S., & Zar, H. J. (2022). Chest imaging for pulmonary TB—An update. *Pathogens, 11*(2), 161. https://doi.org/10.3390/pathogens11020161

Nishtar, T., Burki, S., Ahmad, F. S., & Ahmad, T. (2022). Diagnostic accuracy of computer aided reading of chest X-ray in screening for pulmonary tuberculosis in comparison with Gene-Xpert. *Pakistan Journal of Medical Sciences, 38*(1), 62–68. https://doi.org/10.12669/pjms.38.1.4531

Oloko-Oba, M., & Viriri, S. (2022). A systematic review of deep learning techniques for tuberculosis detection from chest radiograph. *Frontiers in Medicine, 9*, 830515. https://doi.org/10.3389/fmed.2022.830515

Oriekot, A., Sereke, S. G., Bongomin, F., Bugeza, S., & Muyinda, Z. (2022). Chest X-ray findings in drug-sensitive and drug-resistant pulmonary tuberculosis patients in Uganda. *Journal of Clinical Tuberculosis and Other Mycobacterial Diseases, 27*, 100312. https://doi.org/10.1016/j.jctube.2022.100312

Pattamapaspong, N., Kanthawang, T., Peh, W. C. G., Hammami, N., Chelli Bouaziz, M., & Ladeb, M. F. (2024). Imaging of thoracic tuberculosis: Pulmonary and extrapulmonary. *BJR Open, 6*(1), tzae031. https://doi.org/10.1093/bjro/tzae031

Qin, Z. Z., Barrett, R., Ahmed, S., Sarker, M. S., Paul, K., Adel, A. S. S., Banu, S., & Creswell, J. (2022). Comparing different versions of computer-aided detection products when reading chest X-rays for tuberculosis. *PLOS Digital Health, 1*(6), e0000067. https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000067

Rea, G., Sperandeo, M., Lieto, R., Bocchino, M., Quarato, C. M. I., Feragalli, B., Valente, T., Scioscia, G., Giuffreda, E., Foschino Barbaro, M. P., & Lacedonia, D. (2021). Chest imaging in the diagnosis and management of pulmonary tuberculosis: The complementary role of thoracic ultrasound. *Frontiers in Medicine, 8*, 753821. https://doi.org/10.3389/fmed.2021.753821

Tavaziva, G., Harris, M., Abidi, S. K., Geric, C., Breuninger, M., Dheda, K., Esmail, A., Muyoyeta, M., Reither, K., Majidulla, A., Khan, A. J., Campbell, J. R., David, P. M., Denkinger, C., Miller, C., Nathavitharana, R., Pai, M., Benedetti, A., & Khan, F. A. (2022). Chest X-ray analysis with deep learning-based software as a triage test for pulmonary tuberculosis: An individual patient data meta-analysis of diagnostic accuracy. *Clinical Infectious Diseases, 74*(8), 1390–1400. https://doi.org/10.1093/cid/ciab639

van't Hoog, A., Viney, K., Biermann, O., Yang, B., Leeflang, M. M. G., & Langendam, M. W. (2022). Symptom- and chest-radiography screening for active pulmonary tuberculosis in HIV-negative adults and adults with unknown HIV status. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2022*(3), CD010890. https://doi.org/10.1002/14651858.CD010890.pub2

Wetscherek, M. T. A., Sadler, T. J., Lee, J. Y. J., Karia, S., & Babar, J. L. (2022). Active pulmonary tuberculosis: Something old, something new, something borrowed, something blue. *Insights into Imaging, 13*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s13244-021-01138-8

World Health Organization. (2021a). *WHO consolidated guidelines on tuberculosis: Module 2: Screening—Systematic screening for tuberculosis disease*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240022676

World Health Organization. (2021b). *WHO operational handbook on tuberculosis: Module 2: Screening—Systematic screening for tuberculosis disease*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240022614

Copyright©2026: Niken Kasati

World Health Organization. (2025a). *Global tuberculosis report 2025*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240116924

World Health Organization. (2025b). *Use of computer-aided detection software for tuberculosis screening: WHO policy statement*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240110373