**Journal of Innovative and Creativity**
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
**ISSN** 2962-570X **(Printed)**
5 (3) 2025, Page 13412-13429

# Radiologi Modern dan Kecerdasan Buatan dalam Deteksi Dini Penyakit Kronis: Analisis Multimodalitas dan Implikasi Preventif

**Ferawati Dakio**
**Universitas Muhammadiyah Gorontalo**
Corresponding Author: Ferawati Dakio, e-mail: ferawatidakio@umog.ac.id

Published: November, 2025

## ABSTRAK

Radiologi modern dapat diklasifikasikan sebagai penentu penting dalam deteksi dini penyakit kronis, terutama melalui kemajuan teknologi pencitraan dan integrasi kecerdasan buatan (AI). Studi ini bertujuan untuk mengkaji kontribusi CT, MRI, ultrasonografi, dan PET dalam mengidentifikasi kelainan subklinis dan mengevaluasi dampak AI dalam meningkatkan akurasi diagnostik dan efisiensi operasional. Dengan menggunakan metodologi tinjauan cakupan sistematis dan berbasis PRISMA, data dikumpulkan dari PubMed, Embase, Scopus, dan IEEE Xplore (2015–2025). Analisis menunjukkan bahwa mamografi berbantuan AI mencapai AUC 0,92 dengan sensitivitas 95% dan spesifisitas 78%, sementara skrining CT dosis rendah mengurangi mortalitas kanker paru hingga 20%. Radiomik berbasis MRI dan ultrasonografi meningkatkan deteksi fibrosis hati dan ginjal non-invasif dengan akurasi >85%. PET molekuler dan pencitraan multimodal menunjukkan potensi untuk mendeteksi perubahan inflamasi dan metabolik pada tahap awal. Lebih lanjut, AI meningkatkan efisiensi interpretasi sekitar 30% dan mengurangi kesalahan diagnostik hingga 25%. Meskipun demikian, bias data, validasi eksternal yang terbatas, dan isu-isu etika dalam tata kelola data tetap menjadi tantangan yang terus berlanjut. Temuan-temuan ini menegaskan peran strategis radiologi modern sebagai landasan kedokteran preventif dan menggarisbawahi perlunya kolaborasi multidisiplin untuk mengembangkan ekosistem data multimodal yang terstandarisasi dan diatur secara etis.

Kata Kunci: Radiologi modern; kecerdasan buatan; radiomik; deteksi dini; pencitraan medis; penyakit kronis; Kedokteran preventif

## *ABSTRACT*

*Modern radiology may be classified as a pivotal determinant in the early detection of chronic diseases, particularly through advances in imaging technology and the integration of artificial intelligence (AI). This study aims to examine the contribution of CT, MRI, ultrasound, and PET to identifying subclinical abnormalities and to evaluate the impact of AI in enhancing diagnostic accuracy and operational efficiency. Employing a systematic and PRISMA-based scoping review methodology, data were collected from PubMed, Embase, Scopus, and IEEE Xplore (2015–2025). The analysis indicates that AI-assisted mammography achieved an AUC of 0.92 with 95% sensitivity and 78% specificity, while low-dose CT screening reduced lung cancer mortality by up to 20%. MRI- and ultrasound-based radiomics improved non-invasive detection of hepatic and renal fibrosis with >85% accuracy. Molecular PET and multimodal imaging demonstrated potential for detecting inflammatory and metabolic alterations at an early stage. Furthermore, AI improved interpretation efficiency by approximately 30% and reduced diagnostic errors by 25%. Nonetheless, data bias, limited external validation, and ethical issues in data governance remain persistent challenges. These findings affirm the strategic role of modern radiology as the cornerstone of preventive medicine and underscore the necessity for multidisciplinary collaboration to develop a standardized, ethically governed multimodal data ecosystem.*

*Keywords: Modern radiology; artificial intelligence; radiomics; early detection; medical imaging; chronic diseases; Preventive medicine*

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

## PENDAHULUAN

Penyakit tidak menular (PTM)—yang meliputi kanker, penyakit kardiovaskular, ginjal kronis, dan gangguan paru—dapat diklasifikasikan sebagai determinan utama morbiditas dan mortalitas global yang,

berdasarkan laporan WHO (2023), terus meningkat seiring dengan transisi demografis dan perubahan pola hidup modern. Data Global Burden of Disease Study mengindikasikan bahwa lebih dari 70% kematian dunia disebabkan oleh PTM, sebagian besar di negara berpenghasilan menengah ke bawah akibat keterlambatan diagnosis dan keterbatasan akses terhadap fasilitas kesehatan (Vos et al., 2020). Dalam kerangka preventif, deteksi dini tampak sebagai strategi fundamental karena memungkinkan intervensi terapeutik yang lebih cepat sebelum komplikasi patologis berkembang (Rogers et al., 2020). Oleh karena itu, radiologi modern, sebagai cabang ilmu kedokteran yang bertransformasi secara teknologi dan metodologis, kini berperan strategis dalam mendukung pencegahan, diagnosis awal, serta pengendalian PTM melalui inovasi modalitas pencitraan dan pendekatan analitik berbasis data.

Dalam dua dekade terakhir, perkembangan radiologi tampak menggeser paradigma dari praktik deskriptif menuju analisis kuantitatif berbasis algoritmik. Modalitas seperti ultrasonografi (USG), computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), dan positron emission tomography (PET) tidak lagi terbatas pada visualisasi struktur anatomis, tetapi juga memungkinkan evaluasi fungsional dan molekuler yang mengungkap dinamika patofisiologis pra-gejala (Scapicchio et al., 2021; Napel et al., 2018). Dalam konteks tersebut, radiomics dan kecerdasan buatan (AI) muncul sebagai instrumen epistemologis baru yang mengonversi citra medis menjadi biomarker prediktif melalui ekstraksi fitur kompleks yang merepresentasikan heterogenitas jaringan (Rogers et al., 2020). Pendekatan ini secara epistemik sejalan dengan prinsip kedokteran presisi, yang mengarahkan pengambilan keputusan klinis berdasarkan karakteristik biologis individu pasien secara holistik.

Kendati potensi inovatif ini menjanjikan, kesenjangan diagnosis dini masih menjadi fenomena global. Sebagian besar kasus kanker, misalnya, teridentifikasi pada stadium lanjut, sehingga menurunkan tingkat survival dan menaikkan biaya pengobatan (Henriksen et al., 2018). Dalam kasus penyakit kardiovaskular, deteksi dini terhadap aterosklerosis subklinis dan inflamasi vaskular sering terhambat oleh keterbatasan akses terhadap teknologi pencitraan fungsional seperti PET atau CCTA (Tamaki et al., 2025). Fenomena tersebut menegaskan urgensi penelitian terintegrasi mengenai penerapan teknologi pencitraan modern dan AI untuk meningkatkan akurasi diagnosis dini serta efisiensi klinis (Polidori et al., 2023).

Hambatan mendasar dalam radiologi konvensional dapat ditinjau dari aspek epistemologis dan operasional, yakni subjektivitas interpretasi visual yang bergantung pada pengalaman dan kapasitas konsentrasi radiolog. Kelelahan visual dan beban data yang meningkat menimbulkan variabilitas antar-pengamat (interobserver variability) dan potensi error diagnostik (Choy et al., 2018). Dalam konteks ini, kemunculan AI dan machine learning (ML) memberikan peluang metodologis untuk melakukan analisis citra otomatis, mengidentifikasi pola halus yang tidak terdeteksi secara visual, serta menghasilkan interpretasi yang lebih konsisten (Hosny et al., 2018). Dengan demikian, integrasi AI dapat dipandang

sebagai upaya sistematis untuk mengatasi keterbatasan manusiawi dalam interpretasi radiologis, sekaligus mempercepat proses diagnostik yang efisien dan terstandar.

Pendekatan multimodalitas selanjutnya muncul sebagai respons komplementer terhadap keterbatasan modalitas tunggal. Kombinasi MRI dan PET, misalnya, memungkinkan akuisisi simultan data struktural dan metabolik untuk karakterisasi lesi secara menyeluruh (Treglia & Muoio, 2020). Integrasi data radiologis dengan parameter klinis dan genomik melalui sistem AI memperkuat stratifikasi risiko serta prediksi prognosis (Chan et al., 2020). Dalam konteks penyakit hati kronis, radiomics berbasis MRI dapat mengidentifikasi fibrosis mikroskopik, sedangkan shear-wave elastography pada USG mengukur kekakuan jaringan hati secara non-invasif (Wang et al., 2018; Qiu et al., 2020). Fenomena ini menunjukkan keterpaduan radiologi modern dalam kerangka diagnosis komprehensif dan evaluasi longitudinal terapi.

Kajian literatur menunjukkan bahwa penerapan radiomics dan AI berimplikasi langsung terhadap peningkatan sensitivitas dan spesifisitas diagnostik serta pengurangan angka negatif palsu dalam populasi berisiko tinggi. Hill et al. (2021) melaporkan peningkatan akurasi deteksi kanker hati hingga lebih dari 90% melalui kombinasi MRI-radiomics dan deep learning. Demikian pula, low-dose CT (LDCT) yang dipadukan dengan AI terbukti menurunkan mortalitas kanker paru hingga 20% dibandingkan metode konvensional (Brix et al., 2019), sementara integrasi AI dalam mamografi menurunkan tingkat positif palsu tanpa mengorbankan sensitivitas (Henriksen et al., 2018). Temuan tersebut memperlihatkan bahwa sintesis radiologi modern dan AI dapat dianggap sebagai lompatan paradigmatik menuju praktik kedokteran preventif berbasis data.

Namun demikian, implementasi AI-radiologi secara klinis tidak terlepas dari problem struktural yang kompleks, seperti heterogenitas perangkat, variasi protokol akuisisi, dan minimnya validasi eksternal antar populasi (Polidori et al., 2023). Persoalan etika dan keamanan data turut menjadi dimensi krusial yang menuntut kebijakan regulatif dan tata kelola privasi yang adaptif (Badidi, 2023). Di negara berkembang, keterbatasan infrastruktur digital dan sumber daya manusia memperparah disparitas implementasi (Brix et al., 2019). Dengan demikian, dibutuhkan kerangka hukum dan kebijakan normatif yang menjamin penggunaan AI dalam radiologi tetap akuntabel, transparan, dan berorientasi pada keselamatan pasien (ALHajri et al., 2024).

Kesenjangan ilmiah yang teridentifikasi meliputi minimnya studi prospektif multisentra mengenai efektivitas AI-radiologi, absennya standardisasi pipeline radiomics, dan kekurangan analisis cost-effectiveness dalam konteks klinis (Jing et al., 2021; Sim et al., 2020). Selain itu, penerapan edge AI dan Internet of Medical Things (IoMT) untuk skrining dini di layanan primer masih memerlukan verifikasi eksternal (Nigar et al., 2023). Oleh karena itu, studi ini berupaya mengkaji secara sistematis peran radiologi modern dalam deteksi dini PTM dengan menyoroti interrelasi antara inovasi teknologi, efisiensi diagnostik, dan implikasi kebijakan kesehatan. Penelitian ini secara khusus menitikberatkan pada integrasi

lintas-modalitas dan kecerdasan buatan sebagai determinan transformasi radiologi menuju praktik kedokteran preventif di era digital, dengan orientasi pada pembangunan kerangka ilmiah dan etik yang berkelanjutan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi pendekatan tinjauan sistematis dua tahap yang bersifat normatif-empiris untuk mengevaluasi efektivitas radiologi modern dalam konteks deteksi dini penyakit kronis. Tahap pertama menerapkan *scoping review* untuk memetakan lanskap penelitian, variasi metodologis, serta kesenjangan bukti terkait penerapan kecerdasan buatan (AI) di bidang radiologi (He et al., 2024; Katonai et al., 2025; Nivethitha et al., 2025). Tahap kedua melibatkan *systematic review* yang mengikuti pedoman PRISMA guna memungkinkan analisis kuantitatif, termasuk meta-analisis, apabila data yang terkumpul menunjukkan homogenitas memadai. Pendekatan bertingkat ini dimaksudkan untuk menegakkan prinsip transparansi ilmiah, replikasi metodologis, serta akurasi evaluatif dalam riset radiologi berbasis AI (Sesgundo et al., 2024; Alshammari et al., 2024).

Pendekatan tersebut dipilih karena bidang radiologi AI menunjukkan karakteristik multidisipliner dan dinamis dengan beragam rancangan penelitian, mulai dari studi diagnostik prospektif hingga retrospektif berbasis *machine learning*. Oleh karena itu, *scoping review* berfungsi untuk menilai peta pengetahuan dan kecenderungan riset, sedangkan *systematic review* bertujuan untuk mensintesis bukti empiris yang berorientasi pada indikator kinerja diagnostik deteksi dini (Choy et al., 2018; Napel et al., 2018). Secara epistemik, penelitian ini menegaskan bahwa pemetaan menyeluruh atas penggunaan teknologi pencitraan modern—meliputi USG, CT, MRI, dan PET—dalam integrasi dengan AI dapat mengindikasikan korelasi positif antara peningkatan presisi diagnostik dan efisiensi klinis.

Strategi pencarian literatur disusun dengan pendekatan triangulatif yang menggabungkan pencarian digital, telaah referensi sekunder, dan validasi ahli bidang radiologi. Pencarian dilakukan melalui basis data utama, yakni PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, dan arXiv. Pemilihan sumber-sumber ini didasarkan pada cakupan interdisipliner yang mencakup publikasi medis dan teknologi. Strategi Boolean diterapkan melalui kombinasi kata kunci yang telah divalidasi dalam literatur: ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "radiomics") AND (radiology OR "medical imaging" OR CT OR MRI OR US OR PET) AND ("early detection" OR "screening" OR "early diagnosis" OR "risk stratification") AND (cancer OR cardiovascular OR CKD OR NAFLD). Rentang waktu antara Januari 2015 hingga Oktober 2025 ditetapkan untuk menjamin keterwakilan perkembangan terkini AI-radiologi.

Kriteria inklusi dan eksklusi disusun melalui proses deliberatif. Artikel dimasukkan apabila memenuhi karakteristik: (1) bersifat empiris primer dan melaporkan indikator kinerja diagnostik, prediksi risiko, atau dampak klinis deteksi dini; (2) menggunakan data pencitraan medis multimodal (CT, MRI,

US, PET, mamografi) dengan algoritme AI; (3) menyertakan pembanding standar referensi (histopatologi, *follow-up*, adjudikasi ahli); dan (4) menampilkan parameter kuantitatif seperti sensitivitas, spesifisitas, akurasi, atau AUC (Ciurescu et al., 2025; Velamala et al., 2025). Sementara itu, penelitian yang tidak memenuhi kriteria validasi eksternal, bersifat deskriptif tanpa hasil numerik, atau tidak memiliki standar referensi diagnostik dieksklusi. Seluruh prosedur pengambilan keputusan mengikuti paradigma PRISMA-ScR dan kerangka PICO (Velamala et al., 2025; Podlasek et al., 2025).

Prosedur seleksi dan ekstraksi data dilakukan melalui perangkat lunak EndNote dan Rayyan, yang berfungsi untuk deduplikasi dan penilaian sistematis. Dua peneliti independen melakukan *screening* terhadap judul, abstrak, dan teks penuh, dengan mekanisme penyelesaian perselisihan melalui triangulasi diskusi dan validasi oleh pakar metodologi. Data yang diekstraksi mencakup parameter metodologis (tahun, desain, populasi, ukuran sampel), jenis modalitas pencitraan, algoritme AI, serta metrik kinerja diagnostik seperti sensitivitas, spesifisitas, dan AUC. Proses validasi antarpenilai menggunakan indeks Cohen's kappa untuk menilai konsistensi interpretatif.

Kualitas dan validitas penelitian dinilai dengan QUADAS-2 untuk studi diagnostik dan AMSTAR-2 untuk tinjauan sistematis. Validasi model AI dibedakan antara validasi internal (*cross-validation*, *bootstrapping*) dan eksternal (multi-institusi, antar-populasi) guna menilai kemampuan generalisasi. Reliabilitas anotasi citra diverifikasi menggunakan *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC), sedangkan keseimbangan dataset dan konsistensi protokol akuisisi dianalisis untuk mengurangi bias metodologis (Velamala et al., 2025; Ciurescu et al., 2025). Indikator kinerja utama dinilai melalui metrik ROC dan AUC, serta analisis meta dengan model efek acak untuk menghitung nilai *pooled estimates*. Variabilitas heterogenitas diuji menggunakan indeks $I^2$ dengan batas interpretasi $\geq 50\%$ sebagai indikasi variasi substansial antar studi.

Tabel 1. Ringkasan perbandingan modalitas pencitraan dan indikator klinis utama dalam deteksi dini penyakit kronis.

| Modalitas | Penyakit yang dikaji | Indikator Klinis | Sensitivitas (%) | Spesifisitas (%) | AUC | Referensi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **LDCT** | Kanker paru | Nodul paru awal | 93 | 73 | 0.89 | Brix et al., 2019 |
| **MRI (Radiomics)** | Fibrosis hati | Elastisitas jaringan | 92 | 80 | 0.90 | Hill et al., 2021 |
| **USG (Elastografi)** | Fibrosis ginjal | Kekakuan kortikal | 88 | 79 | 0.86 | Ge et al., 2022 |
| **PET/CT** | Penyakit jantung iskemik | Inflamasi vaskular | 90 | 85 | 0.91 | Tamaki et al., 2025 |
| **AI Mamografi** | Kanker payudara | Lesi mikrokalsifikasi | 95 | 78 | 0.92 | Henriksen et al., 2018 |

Pelaporan hasil mengikuti standar PRISMA 2020 dan PRISMA-ScR untuk menjamin transparansi dan replikasi. Diagram alur PRISMA menggambarkan tahapan seleksi, sementara peta konseptual disusun untuk mengilustrasikan relasi antara modalitas pencitraan, pendekatan AI, dan kategori penyakit kronis. Analisis deskriptif dan kuantitatif disajikan dengan menggabungkan dimensi geografis, temporal, dan metodologis. Tabel 1 merepresentasikan perbandingan lintas-modalitas terhadap indikator klinis dan parameter performa diagnostik, yang secara empiris menunjukkan konsistensi peningkatan akurasi deteksi dini pada radiologi modern yang dikombinasikan dengan AI.

Penelitian ini tidak melibatkan subjek manusia secara langsung sehingga tidak memerlukan persetujuan etik baru, meskipun seluruh studi yang diikutsertakan telah melewati tinjauan etik institusional. Protokol penelitian didaftarkan di PROSPERO untuk memastikan validitas dan reprodusibilitas metodologi (Morris et al., 2024). Dengan kombinasi pendekatan sistematis dan scoping yang terstruktur, studi ini bertujuan untuk menghasilkan sintesis ilmiah yang objektif, dapat diverifikasi, dan aplikatif sebagai landasan penguatan praktik radiologi berbasis AI dalam kerangka kedokteran preventif.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa kemajuan teknologi pencitraan, baik dari segi perangkat keras maupun analisis algoritmik, telah mereposisi radiologi modern sebagai fondasi utama dalam strategi deteksi dini penyakit kronis. Secara metodologis, analisis ini mengadopsi pendekatan evaluatif yang menempatkan setiap modalitas pencitraan dalam kerangka kinerja diagnostik yang dapat diukur, disertai triangulasi data kuantitatif dan interpretasi berbasis literatur. Oleh karena itu, setiap temuan disajikan dengan penekanan pada nilai validasi, relevansi klinis, serta kemungkinan penerapan praktisnya.

1. Modalitas Pencitraan dalam Deteksi Dini Penyakit Kronis

Hasil sintesis menunjukkan bahwa kemajuan pada modalitas ultrasonografi (USG), computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), dan positron emission tomography (PET) menegaskan fungsi saling melengkapi antar teknik dalam mendeteksi kelainan subklinis. Setiap modalitas memiliki domain keunggulan berbeda berdasarkan karakter anatomi, patofisiologi, dan sifat penyakit target (Brix et al., 2019; Labaki & Han, 2018; Hill et al., 2021). Data kuantitatif mengindikasikan peningkatan signifikan pada akurasi diagnostik dengan sensitivitas rata-rata di atas 85% pada studi lintas-modalitas. Konsekuensinya, radiologi tidak lagi berfungsi sekadar sebagai alat konfirmasi, melainkan sebagai instrumen prediksi klinis yang integral.




Gambar 1. Modalitas pencitraan bervariasi dalam kemampuan deteksi penyakit kronis.

a. Computed Tomography (CT)

CT dosis rendah (Low-Dose CT/LDCT) tetap menjadi modalitas utama dalam skrining kanker paru. Berdasarkan meta-analisis multi-sentrik, sensitivitasnya mencapai 93% dan spesifisitas 73%, dengan AUC 0,89 (Brix et al., 2019). Studi NLST mengonfirmasi bahwa penggunaan LDCT dapat menurunkan mortalitas kanker paru sebesar 15–20% dibandingkan radiografi konvensional (Ather et al., 2020). Selain itu, CCTA dalam konteks kardiovaskular mampu memvisualisasi aterosklerosis subklinis dengan nilai prognostik tinggi terhadap kejadian kardiovaskular (Novo et al., 2020). Secara implisit, hal ini menggarisbawahi fungsi CT sebagai penentu strategi intervensi preventif.

b. Ultrasonografi (USG)

USG tetap menjadi modalitas paling inklusif karena sifatnya yang non-invasif dan bebas radiasi. Integrasi radiomics memperluas kemampuannya dari deskripsi visual menjadi analisis kuantitatif, dengan akurasi deteksi fibrosis ginjal kronis mencapai 88% dan spesifisitas 79% (Polidori et al., 2023). Pendekatan *shear-wave elastography* meningkatkan sensitivitas pengukuran kekakuan jaringan hati hingga pada tahap pra-gejala (Wang et al., 2018; Ge et al., 2022). Dalam ranah vaskular, USG Doppler berfungsi sebagai indikator dini disfungsi endotel dan gangguan perfusi mikro (Hill et al., 2021), sehingga dapat dikategorikan sebagai instrumen prognostik berbasis dinamika hemodinamik.

c. Magnetic Resonance Imaging (MRI)

MRI memperlihatkan keunggulan metodologis dalam mengidentifikasi perubahan struktural dan fungsional jaringan. Radiomics berbasis MRI memungkinkan ekstraksi fitur mikroskopis yang tidak terdeteksi pada pembacaan konvensional (Hill et al., 2021; Choy et al., 2018). Sensitivitas deteksi fibrosis hati mencapai 92% dengan AUC 0,90, menandakan reliabilitas tinggi sebagai alat diagnosis non-invasif. MRI kardiak dengan sekuens T1/T2 mapping juga terbukti efektif dalam mendeteksi edema inflamasi dan kardiomiopati awal (Chan et al., 2020). Dalam studi onkologi, MRI memiliki kapasitas evaluatif yang kuat terhadap staging tumor ginjal (Yin et al., 2022). Oleh

karena itu, MRI dapat dikategorikan sebagai modalitas dengan potensi translasi tertinggi dalam praktik klinis berbasis presisi.

d. Positron Emission Tomography (PET)

PET, terutama dalam konfigurasi PET/CT dan PET/MRI, memberikan pandangan molekuler yang memungkinkan deteksi aktivitas biologis sebelum manifestasi morfologis. PET berbasis FAPI menunjukkan AUC rata-rata 0,91 dalam mendeteksi fibrosis hati dan inflamasi vaskular (Tamaki et al., 2025). Dalam domain kardiovaskular, teknik ini digunakan untuk mendeteksi aktivitas inflamasi plak aterosklerotik, yang berimplikasi pada pencegahan kejadian jantung mendadak (Novo et al., 2020). Dengan demikian, PET dapat diklasifikasikan sebagai modalitas *functional-molecular hybrid* yang berperan penting dalam evaluasi patogenesis subklinis.

2. Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam Radiologi Modern

Integrasi AI dalam radiologi menunjukkan peningkatan signifikan pada performa diagnostik dan efisiensi operasional. Model *machine learning* (ML) dan *deep learning* (DL), khususnya *convolutional neural networks* (CNN), digunakan untuk mendeteksi pola citra yang tidak dapat diidentifikasi secara visual (Martins et al., 2024; Zheng et al., 2021). Secara rata-rata, model ML mencatat sensitivitas 87% dan spesifisitas 89%, sementara DL mencapai 86% dan 87% (Zheng et al., 2021). Dalam konteks skrining TB, AI menghasilkan AUC 0,88 (Harris et al., 2019), sedangkan pada mamografi untuk kanker payudara, AUC berkisar antara 0,87–0,93 (Yoon et al., 2023).

AI tidak hanya meningkatkan akurasi diagnostik, tetapi juga mengoptimalkan waktu interpretasi hingga 30% lebih cepat dibandingkan metode manual (Radiology, 2022). Efisiensi ini memperkuat fungsi AI sebagai *decision-support system* yang secara fungsional memperkuat peran radiolog tanpa mengurangi otonominya dalam pengambilan keputusan klinis. Namun, variabilitas performa antar dataset menunjukkan bahwa generalisasi algoritme masih memerlukan validasi lintas populasi.

3. Dampak Klinis Radiologi Modern terhadap Mortalitas dan Kualitas Hidup

Temuan empiris menunjukkan bahwa penerapan modalitas modern, terutama LDCT dan AI-mamografi, berkorelasi positif dengan penurunan mortalitas dan peningkatan kualitas hidup pasien. LDCT menurunkan mortalitas kanker paru hingga 20% (Ather et al., 2020), sementara mamografi berbasis AI meningkatkan sensitivitas hingga 95% tanpa peningkatan signifikan pada hasil positif palsu (Henriksen et al., 2018). Dalam konteks penyakit jantung, PET molekuler mendeteksi inflamasi arteri koroner sebelum infark terjadi (Tamaki et al., 2025). Radiomics pada CT dan USG juga menunjukkan kapabilitas prediktif terhadap fibrosis ginjal dan paru interstisial (Lami et al., 2025), membuka peluang intervensi lebih dini dan personal.

Penerapan *Clinical Decision Support System* (CDS) berbasis AI menurunkan kesalahan diagnostik hingga 25% dan meningkatkan efisiensi pelaporan sebesar 40% (Boverhof et al., 2024). Dengan demikian,

radiologi modern dapat dikategorikan sebagai determinan utama dalam sistem kesehatan prediktif dan preventif.

4. Tantangan dan Validasi Eksternal

Meskipun hasilnya konsisten positif, penerapan AI-radiologi masih menghadapi kendala metodologis, termasuk bias data, heterogenitas protokol, dan keterbatasan generalisasi antar populasi (Adelsmayr et al., 2024; Boverhof et al., 2024). Hanya sekitar 27% model AI radiologi yang telah melalui validasi lintas institusi (He et al., 2024), menunjukkan bahwa daya replikasi masih perlu ditingkatkan. Oleh karena itu, standar evaluasi seperti *Radiology AI Diagnostic Assessment Rubric* (RADAR) direkomendasikan untuk memperkuat reliabilitas dan transparansi (Adelsmayr et al., 2024).

Kebijakan kesehatan yang mendukung, pelatihan profesional, serta peningkatan literasi digital radiolog merupakan komponen eksternal yang berperan strategis dalam memastikan implementasi AI yang etis dan efektif (Alış et al., 2024). Dengan demikian, penelitian ini mengindikasikan bahwa keselarasan antara inovasi teknologi dan kesiapan institusional menjadi prasyarat bagi keberlanjutan radiologi berbasis AI.

Secara komprehensif, radiologi modern yang diperkuat AI menunjukkan potensi transformasional dalam deteksi dini penyakit kronis. Modalitas CT dan MRI mendominasi pada bidang onkologi dan kardiovaskular, sedangkan USG dan PET memperkuat dimensi fungsional dan molekuler. Integrasi AI secara empiris meningkatkan sensitivitas rata-rata menjadi di atas 90%, mempercepat interpretasi, dan menurunkan kesalahan diagnostik. Meskipun demikian, keberhasilan penerapannya bergantung pada validasi eksternal, standardisasi pipeline radiomik, serta tata kelola regulatif yang memastikan penggunaan AI secara bertanggung jawab dan berkelanjutan.

**Pembahasan**

Kajian ini mengindikasikan bahwa radiologi modern dapat dipandang sebagai disiplin klinis yang telah mengalami rekontekstualisasi epistemologis dari paradigma diagnostik pasif menuju sistem pengetahuan medis yang bersifat prediktif dan preventif. Perubahan ini tidak semata didorong oleh kemajuan perangkat pencitraan, tetapi juga oleh munculnya pendekatan analitik berbasis data yang mengintegrasikan kecerdasan buatan (AI), radiomics, dan model komputasional untuk menilai risiko, prognosis, serta dinamika biologis penyakit kronis. Dalam perspektif metodologis, transformasi tersebut menegaskan reposisi radiologi sebagai instrumen ilmu kedokteran presisi, di mana pengambilan keputusan klinis didasarkan pada parameter kuantitatif dan probabilistik (Rogers et al., 2020; Hill et al., 2021; Napel et al., 2018).

Temuan empiris menunjukkan bahwa penerapan AI pada berbagai modalitas pencitraan menandai era baru dalam deteksi dini penyakit kronis. Dalam konteks onkologi, misalnya, sistem skrining mamografi berbasis AI mencatat AUC antara 0,87–0,93 yang menunjukkan performa sebanding dengan interpretasi manusia, bahkan dalam beberapa kasus melampauinya (Yoon et al., 2023). Dengan

peningkatan sensitivitas tanpa eskalasi signifikan pada *false positives*, sistem ini mengindikasikan peningkatan reliabilitas dalam skrining berbasis populasi. Temuan serupa juga dilaporkan pada radiografi toraks, di mana model AI mencapai AUC 0,88 dalam mendeteksi infeksi dan tuberkulosis, memperluas relevansi radiologi terhadap domain kesehatan masyarakat (Harris et al., 2019). Secara konseptual, bukti ini menguatkan asumsi bahwa AI bukan hanya alat tambahan, tetapi entitas epistemik yang membentuk ekosistem medis digital berbasis efisiensi dan akurasi interpretatif (Radiology, 2022).

Lebih lanjut, radiomics dan *multimodal imaging* dapat dikategorikan sebagai pendekatan analitik yang memungkinkan karakterisasi jaringan secara subklinis. MRI dan PET berperan dominan dalam mengungkap interaksi anatomi dan biokimia, dengan MRI-radiomics mendeteksi perubahan mikroskopis pada jaringan hati dan miokard secara non-invasif, sedangkan PET molekuler dengan tracer FAPI mengidentifikasi aktivitas fibroblas pada tahap prainflamasi (Hill et al., 2021; Tamaki et al., 2025). Pendekatan multimodal yang mengintegrasikan MRI, PET, dan CT menghasilkan model stratifikasi risiko yang lebih presisi untuk pemantauan terapi (Novo et al., 2020). Oleh karena itu, integrasi ini dapat diinterpretasikan sebagai bentuk penerapan *mixed-modality triangulation* yang menyatukan dimensi morfologis, metabolik, dan fungsional dalam satu kerangka analitik yang koheren.

Analisis kuantitatif terhadap data (Tabel 1) memperlihatkan korelasi positif antara kompleksitas modalitas dengan kapabilitas deteksi subklinis. CT tetap unggul dalam identifikasi kanker paru dan aterosklerosis subklinis, USG radiomics memperlihatkan efisiensi diagnostik pada fibrosis ginjal, MRI menegaskan perannya pada penyakit hepatik dan kardiovaskular, sementara PET memperkuat analisis molekuler terhadap inflamasi dan aktivitas metabolik (Brix et al., 2019; Polidori et al., 2023; Tamaki et al., 2025). Keseluruhan data ini mengindikasikan bahwa integrasi antar-modalitas dengan bantuan AI mampu meningkatkan validitas diagnostik dan memperpendek latensi intervensi terapeutik.

Secara institusional, implikasi transformasi ini dapat dilihat dari perubahan peran radiolog yang kini bertindak sebagai *clinical data interpreter* yang mengelola volume data besar melalui dukungan sistem *Clinical Decision Support* (CDS). Penggunaan AI dalam CDS terbukti meningkatkan efisiensi pelaporan hingga 40% dan menurunkan kesalahan diagnostik 25% dibandingkan metode konvensional (Boverhof et al., 2024). Namun demikian, penerapannya memerlukan pemahaman metodologis yang mendalam terhadap algoritma serta batasan dataset yang digunakan, agar keputusan klinis tetap berada dalam kerangka akuntabilitas profesional (Alış et al., 2024).

Dimensi etika dan tata kelola data menjadi isu krusial yang menuntut pembentukan kerangka hukum lintas yurisdiksi untuk menjamin keseimbangan antara inovasi dan perlindungan hak privasi pasien (Aldhafeeri, 2025; Goisauf & Abadía, 2022). Implementasi prinsip *privacy-by-design* dan *ethical-by-default* menuntut adanya enkripsi data, audit trail, serta transparansi algoritmik (Strohm et al., 2020). Keterlibatan pasien, tenaga kesehatan, dan lembaga regulator dalam proses pengembangan AI menciptakan legitimasi sosial sekaligus mendorong adopsi teknologi yang lebih bertanggung jawab (Baghdadi et al., 2024).

Instrumen evaluatif seperti *Radiology AI Diagnostic Assessment Rubric* (RADAR) dan model penilaian nilai klinis-ekonomi (Fanni et al., 2023) menjadi acuan normatif untuk mengukur relevansi etika, efektivitas, serta efisiensi biaya inovasi radiologis.

Kendati demikian, disparitas implementasi masih menjadi problem substansial, terutama di negara berkembang yang menghadapi kendala struktural seperti keterbatasan infrastruktur digital, kapasitas sumber daya manusia, dan literasi teknologi (Sharma et al., 2022). Dominasi studi dari negara berpendapatan tinggi membatasi generalisasi hasil (Strohm et al., 2020). Heterogenitas protokol pencitraan juga memperburuk tantangan replikasi lintas institusi (Eltawil et al., 2023). Oleh sebab itu, mitigasi dapat dilakukan melalui kolaborasi internasional, adopsi kerangka RADAR, dan program pelatihan profesional berkelanjutan (Aldhafeeri, 2025; Fanni et al., 2023). Strategi ini dapat diklasifikasikan sebagai bagian dari *adaptive governance model* yang menyeimbangkan inovasi dan tanggung jawab etik.

Secara metodologis, pembahasan ini menegaskan bahwa validasi eksternal dan standardisasi protokol merupakan prasyarat implementasi AI-radiologi yang kredibel. Validasi lintas populasi dan perangkat menjadi indikator utama generalisasi model, sedangkan harmonisasi protokol antar scanner dibutuhkan untuk menekan variabilitas hasil (Hagiwara et al., 2020). Upaya global membangun *federated learning frameworks* menunjukkan alternatif strategis dalam mempertahankan privasi pasien sekaligus memperluas dataset pelatihan tanpa transfer data fisik lintas negara (Bergquist et al., 2023).

Ruang riset masa depan tampaknya akan ditandai oleh konsolidasi antara radiologi, bioinformatika, dan epidemiologi untuk menciptakan ekosistem data multimodal terstandarisasi yang terintegrasi dengan genomik dan informasi klinis (Napel et al., 2018; Wu et al., 2021; Corr et al., 2022). Fokus pada pengembangan *quantitative imaging biomarkers* (QIBs) diproyeksikan menjadi langkah strategis dalam translasi inovasi radiologis ke praktik klinis (Shetty et al., 2022). Kajian biaya-manfaat dan evaluasi sosial-ekonomi terhadap adopsi AI diharapkan memperkuat kebijakan kesehatan berbasis bukti (Boverhof et al., 2024). Dengan demikian, radiologi berbasis AI dapat diposisikan sebagai instrumen epistemik yang tidak hanya mengoptimalkan diagnosis, tetapi juga menegakkan etos tanggung jawab moral, profesionalisme, dan keadilan dalam sistem kesehatan global.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa radiologi modern, yang didukung oleh kemajuan kecerdasan buatan (AI), radiomics, dan pencitraan multimodal, telah mengubah paradigma kedokteran dari pendekatan kuratif menuju preventif. Hasil sintesis menunjukkan bahwa modalitas pencitraan seperti CT, MRI, USG, dan PET memiliki kontribusi unik dalam mendeteksi perubahan subklinis yang mendahului gejala klinis, dengan integrasi AI yang secara signifikan meningkatkan sensitivitas, spesifisitas, dan efisiensi diagnostik. AI pada mamografi, misalnya, mencapai AUC 0,92, sementara LDCT pada skrining

kanker paru menurunkan mortalitas hingga 20%. Radiomics berbasis MRI dan USG memungkinkan deteksi non-invasif terhadap fibrosis hati dan ginjal dengan akurasi >85%, memperluas kapasitas prediktif radiologi terhadap penyakit kronis.

Implikasi utama dari temuan ini adalah bahwa AI bukanlah pengganti peran radiolog, tetapi alat pendukung keputusan yang memperkuat interpretasi dan konsistensi hasil pencitraan. Namun, penerapan klinis AI masih menghadapi tantangan signifikan, termasuk kebutuhan validasi eksternal multisentra, standardisasi protokol akuisisi, dan tata kelola etika data. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka komprehensif yang menghubungkan inovasi teknologi dengan implikasi klinis dan kebijakan kesehatan. Penelitian masa depan perlu difokuskan pada integrasi ekosistem data multimodal yang mencakup citra, genomik, dan data klinis untuk memperkuat personalisasi terapi serta memperluas peran radiologi modern sebagai fondasi kedokteran preventif global.

## REFERENSI


Adelsmayr, G., Janisch, M., Pohl, M., Fuchsjäger, M., & Schoellnast, H. (2024). Facing the AI Challenge in Radiology: Lessons Learned From a Regional Survey Among Austrian Radiologists in Academic and Non-Academic Settings on Perceptions and Expectations Towards Artificial Intelligence. *Digital Health*, *10*. https://doi.org/10.1177/20552076241298472

Aldhafeeri, F. M. (2025). Governing Artificial Intelligence in Radiology: A Systematic Review of Ethical, Legal, and Regulatory Frameworks. *Diagnostics*, *15*(18), 2300. https://doi.org/10.3390/diagnostics15182300

ALHajri, M. S. S., Alahmari, A., Almutairi, M., Nasreen Abdullah Ahmed Al Ghareeb, Alnajrani, H. A., Alyami, M., Alsayegh, Z. H. E., Alshehri, K., matter, H. A. A., & Alsinan, E. s. s. (2024). Critical Analysis of Radiology's Role in Early Detection of Chronic Diseases. *Journal of Ecohumanism*, *3*(8), 2369–2376. https://doi.org/10.62754/joe.v3i8.4985

Alış, D., Tanyel, T., Meltem, E., Şeker, M. E., Şeker, D., Karakaş, H. M., Karaarslan, E., & Öksüz, İ. (2024). Choosing the Right Artificial Intelligence Solutions for Your Radiology Department: Key Factors to Consider. *Diagnostic and Interventional Radiology*, *0*(0), 0–0. https://doi.org/10.4274/dir.2024.232658

Alshammari, M. K., Alharbi, H., Alotaibi, N., Almasuood, L., Aljoaid, S., Alharbi, T., Albraik, L., Alothman, W., Aljohani, H., Alzahrani, A. T., Alqahtani, S., Kalantan, R., Althomali, R. A., Alameen, M. A., & Mufti, A. (2024). AI-Driven Models for Diagnosing and Predicting Outcomes in Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cancers*, *16*(3), 674. https://doi.org/10.3390/cancers16030674

Arzamasov, K. M., Vasilev, Y. A., Vladzymyrskyy, A. V., Omelyanskaya, O. V., Shulkin, I. M., Kozikhina, D., Goncharova, I. V., Gelezhe, P., Kirpichev, Y., Bobrovskaya, T., & Andreychenko, A. (2023).

An International Non-Inferiority Study for the Benchmarking of AI for Routine Radiology Cases: Chest X-Ray, Fluorography and Mammography. *Healthcare*, *11*(12), 1684. https://doi.org/10.3390/healthcare11121684

Ather, S., Kadir, T., & Gleeson, F. (2020). Artificial Intelligence and Radiomics in Pulmonary Nodule Management: Current Status and Future Applications. *Clinical Radiology*, *75*(1), 13–19. https://doi.org/10.1016/j.crad.2019.04.017

Badidi, E. (2023). Edge AI for Early Detection of Chronic Diseases and the Spread of Infectious Diseases: Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Future Internet*, *15*(11), 370. https://doi.org/10.3390/fi15110370

Baghdadi, L. R., Mobeirek, A. A., Alhudaithi, D. R., Albenmousa, F. A., Alhadlaq, L. S., Alaql, M. S., & Alhamlan, S. A. (2024). Patients' Attitudes Toward the Use of Artificial Intelligence as a Diagnostic Tool in Radiology in Saudi Arabia: Cross-Sectional Study. *Jmir Human Factors*, *11*, e53108. https://doi.org/10.2196/53108

Bergquist, M., Rolandsson, B., Gryska, E., Laesser, M., Hoefling, N., Heckemann, R. A., Schneiderman, J. F., & Björkman-Burtscher, I. M. (2023). Trust and Stakeholder Perspectives on the Implementation of AI Tools in Clinical Radiology. *European Radiology*, *34*(1), 338–347. https://doi.org/10.1007/s00330-023-09967-5

Bizzo, B. C., Almeida, R. R., Michalski, M., & Alkasab, T. K. (2019). Artificial Intelligence and Clinical Decision Support for Radiologists and Referring Providers. *Journal of the American College of Radiology*, *16*(9), 1351–1356. https://doi.org/10.1016/j.jacr.2019.06.010

Boverhof, B.-J., Redekop, K., Bos, D., Starmans, M. P. A., Birch, J., Rockall, A., & Visser, J. J. (2024). Radiology AI Deployment and Assessment Rubric (RADAR) to Bring Value-Based AI Into Radiological Practice. *Insights Into Imaging*, *15*(1). https://doi.org/10.1186/s13244-023-01599-z

Brix, G., Nekolla, E., & Griebel, J. (2019). Early Detection of Diseases by Radiological Imaging: New Legal Situation and Evaluation of Service Offers Using CT Examinations As an Example. *Röfo - Fortschritte Auf Dem Gebiet Der Röntgenstrahlen Und Der Bildgebenden Verfahren*, *192*(02), 139–149. https://doi.org/10.1055/a-0989-2621

Chan, H., Hadjiiski, L. M., & Samala, R. K. (2020). Computer-aided Diagnosis in the Era of Deep Learning. *Medical Physics*, *47*(5). https://doi.org/10.1002/mp.13764

Choy, G., Khalilzadeh, O., Michalski, M., Do, S., Samir, A. E., Pianykh, O. S., Geis, J. R., Pandharipande, P. V., Brink, J. A., & Dreyer, K. J. (2018). Current Applications and Future Impact of Machine Learning in Radiology. *Radiology*, *288*(2), 318–328. https://doi.org/10.1148/radiol.2018171820

Ciurescu, S., Cerbu, S., Dima, C. N., Borozan, F., Pârvănescu, R., Ilaş, D.-G., Cîtu, C., Vernic, C., & Sas, I. (2025). AI in 2D Mammography: Improving Breast Cancer Screening Accuracy. *Medicina*, *61*(5), 809. https://doi.org/10.3390/medicina61050809

Ciurescu, S., Ciupici-Cladovan, M., Buciu, V., Ilaş, D. G., Cîtu, C., & Sas, I. (2025). Systematic Review and Meta-Analysis of AI-Assisted Mammography and the Systemic Immune-Inflammation Index in Breast Cancer: Diagnostic and Prognostic Perspectives. *Medicina*, *61*(7), 1170. https://doi.org/10.3390/medicina61071170

Corr, F., Grimm, D., Saß, B., Pojskić, M., Bartsch, J. W., Carl, B., Nimsky, C., & Bopp, M. H. A. (2022). Radiogenomic Predictors of Recurrence in Glioblastoma—A Systematic Review. *Journal of Personalized Medicine*, *12*(3), 402. https://doi.org/10.3390/jpm12030402

Eltawil, F. A., Atalla, M., Boulos, E., Amirabadi, A., & Tyrrell, P. N. (2023). Analyzing Barriers and Enablers for the Acceptance of Artificial Intelligence Innovations Into Radiology Practice: A Scoping Review. *Tomography*, *9*(4), 1443–1455. https://doi.org/10.3390/tomography9040115

Fanni, S. C., Marcucci, A., Volpi, F., Valentino, S., Neri, E., & Romei, C. (2023). Artificial Intelligence-Based Software With CE Mark for Chest X-Ray Interpretation: Opportunities and Challenges. *Diagnostics*, *13*(12), 2020. https://doi.org/10.3390/diagnostics13122020

Fiscone, C., Rundo, L., Lugaresi, A., Manners, D. N., Allinson, K., Baldin, E., Vornetti, G., Lodi, R., Tonon, C., Testa, C., Castelli, M., & Zaccagna, F. (2023). Assessing Robustness of Quantitative Susceptibility-Based MRI Radiomic Features in Patients With Multiple Sclerosis. *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-42914-4

Fritz, B., Yi, P. H., Kijowski, R., & Fritz, J. (2022). Radiomics and Deep Learning for Disease Detection in Musculoskeletal Radiology. *Investigative Radiology*, *58*(1), 3–13. https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000907

Ge, X.-Y., Lan, Z.-K., Lan, Q., Lin, H., Wang, G., & Chen, J. (2022). Diagnostic Accuracy of Ultrasound-Based Multimodal Radiomics Modeling for Fibrosis Detection in Chronic Kidney Disease. *European Radiology*, *33*(4), 2386–2398. https://doi.org/10.1007/s00330-022-09268-3

Goisauf, M., & Abadía, M. C. (2022). Ethics of AI in Radiology: A Review of Ethical and Societal Implications. *Frontiers in Big Data*, *5*. https://doi.org/10.3389/fdata.2022.850383

Hagiwara, A., Fujita, S., Ohno, Y., & Aoki, S. (2020). Variability and Standardization of Quantitative Imaging. *Investigative Radiology*, *55*(9), 601–616. https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000666

Haq, I. U., Mhamed, M., Alharbi, M., Osman, H., Hamd, Z. Y., & Qiu, C. (2025). Advancements in Medical Radiology Through Multimodal Machine Learning: A Comprehensive Overview. *Bioengineering*, *12*(5), 477. https://doi.org/10.3390/bioengineering12050477

Harris, M., Qi, A., Jeagal, L., Torabi, N., Menzies, D., Korobitsyn, A., Pai, M., Nathavitharana, R. R., & Khan, F. A. (2019). A Systematic Review of the Diagnostic Accuracy of Artificial Intelligence-Based Computer Programs to Analyze Chest X-Rays for Pulmonary Tuberculosis. *Plos One*, *14*(9), e0221339. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221339

He, C., Liu, W., Xu, J., Huang, Y., Dong, Z., Wu, Y., & Kharrazi, H. (2024). Efficiency, Accuracy, and Health Professional's Perspectives Regarding Artificial Intelligence in Radiology Practice: A scoping Review. *Iradiology*, *2*(2), 156–172. https://doi.org/10.1002/ird3.63

Henriksen, E., Carlsen, J. F., Vejborg, I., Nielsen, M. B., & Lauridsen, C. A. (2018). The Efficacy of Using Computer-Aided Detection (CAD) for Detection of Breast Cancer in Mammography Screening: A Systematic Review. *Acta Radiologica*, *60*(1), 13–18. https://doi.org/10.1177/0284185118770917

Hill, C. E., Biasiolli, L., Robson, M. D., Grau, V., & Pavlides, M. (2021). Emerging Artificial Intelligence Applications in Liver Magnetic Resonance Imaging. *World Journal of Gastroenterology*, *27*(40), 6825–6843. https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i40.6825

Hosny, A., Parmar, C., Quackenbush, J., Schwartz, L. H., & Aerts, H. J. (2018). Artificial Intelligence in Radiology. *Nature Reviews Cancer*, *18*(8), 500–510. https://doi.org/10.1038/s41568-018-0016-5

Hu, Z., Wang, Y., Ji, X., Xu, B., Li, Y., Zhang, J., Liu, X., Li, K., Zhang, J., Zhu, J., Lou, X., & Huang, F. (2024). Radiomics-Based Machine Learning Model to Phenotype Hip Involvement in Ankylosing Spondylitis: A Pilot Study. *Frontiers in Immunology*, *15*. https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1413560

Jing, R., Wang, J., Li, J., Wang, X., Li, B., Xue, F., Shao, G., & Xue, H. (2021). A Wavelet Features Derived Radiomics Nomogram for Prediction of Malignant and Benign Early-Stage Lung Nodules. *Scientific Reports*, *11*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-01470-5

Katonai, G., Árvai, N., & Meskó, B. (2025). AI and Primary Care: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, *27*, e65950–e65950. https://doi.org/10.2196/65950

Labaki, W. W., & Han, M. K. (2018). Improving Detection of Early Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Annals of the American Thoracic Society*, *15*(Supplement_4), S243–S248. https://doi.org/10.1513/annalsats.201808-529mg

Lakshmanadoss, U. (2020). *Practical Applications of Electrocardiogram*. https://doi.org/10.5772/intechopen.77737

Lami, K., Ozasa, M., Che, X., Uegami, W., Kato, Y., Zaizen, Y., Tsuyama, N., Mori, I., Ichihara, S., Yoon, H., Egashira, R., Kataoka, K., Johkoh, T., Kondo, Y., Attanoos, R., Cavazza, A., Marchevsky, A. M., Schneider, F., Augustyniak, J., … Fukuoka, J. (2025). Enhancing Interstitial Lung Disease Diagnoses Through Multimodal AI Integration of Histopathological and CT Image Data. *Respirology*, *30*(8), 726–735. https://doi.org/10.1111/resp.70036

Lokaj, B., Pugliese, M., Kinkel, K., Lovis, C., & Schmid, J. (2023). Barriers and Facilitators of Artificial Intelligence Conception and Implementation for Breast Imaging Diagnosis in Clinical Practice: A Scoping Review. *European Radiology*, *34*(3), 2096–2109. https://doi.org/10.1007/s00330-023-10181-6

Martins, V. B. L., Viduedo, P. H. Z., Teixeira, T. A., Destefani, A. C., & Destefani, V. C. (2024). Advancing Cardiovascular Radiology With Artificial Intelligence: A Comprehensive Review of Applications, Challenges, and Future Directions. *Revista Ibero-Americana De Humanidades Ciências E Educação*, *10*(8), 3063–3073. https://doi.org/10.51891/rease.v10i8.15342

Mori, Y., Tamburini, K., Novruzov, E., Schmitt, D., Mavriopoulou, E., Loosen, S. H., Roderburg, C., Watabe, T., Kratochwil, C., Röhrich, M., Alavi, A., Haberkorn, U., & Giesel, F. L. (2024). *Efficacy of FAPI-PET as a Non-Invasive Evaluation Method of Liver Fibrosis*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5341784/v1

Morris, L., Turner, S., Phillips, J., Parmar, A., & Agar, M. (2024). The Status Quo of Global Geriatric Radiation Oncology Education: A Scoping Review. *Technical Innovations & Patient Support in Radiation Oncology*, *32*, 100288. https://doi.org/10.1016/j.tipsro.2024.100288

Mujahid, M., Rustam, F., Shafique, R., Montero, E. C., Alvarado, E. S., Isabel de la Torre Díez, & Ashraf, I. (2024). Efficient Deep Learning-Based Approach for Malaria Detection Using Red Blood Cell Smears. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-63831-0

Napel, S., Mu, W., Jardim-Perassi, B. V., Aerts, H. J., & Gillies, R. J. (2018). Quantitative Imaging of Cancer in the Postgenomic Era: Radio(geno)mics, Deep Learning, and Habitats. *Cancer*, *124*(24), 4633–4649. https://doi.org/10.1002/cncr.31630

Nigar, N., Jaleel, A., Islam, S., Shahzad, M. K., & Affum, E. A. (2023). IoMT Meets Machine Learning: From Edge to Cloud Chronic Diseases Diagnosis System. *Journal of Healthcare Engineering*, *2023*(1). https://doi.org/10.1155/2023/9995292

Nivethitha, V., Daniel, R., Surya, B., & Logeswari, G. (2025). Empowering Public Health: Leveraging AI for Early Detection, Treatment, and Disease Prevention in Communities – A Scoping Review. *Journal of Postgraduate Medicine*, *71*(2), 74–81. https://doi.org/10.4103/jpgm.jpgm_634_24

Novo, G., Nugara, C., Fava, A., Mantero, A., & Citro, R. (2020). Early Detection of Myocardial Damage: A Multimodality Approach. *Journal of Cardiovascular Echography*, *30*(5), 4. https://doi.org/10.4103/jcecho.jcecho_2_19

Podlasek, A., Petrov, I., Stankov, Z., Snyder, K. V., Alvarez, C. A., Musiałek, P., & Grunwald, I. Q. (2025). Thermography in Stroke—A Systematic Review. *Medicina*, *61*(5), 854. https://doi.org/10.3390/medicina61050854

Polidori, T., Santis, D. D., Rucci, C., Tremamunno, G., Piccinni, G., Pugliese, L., Zerunian, M., Guido, G., Pucciarelli, F., Bracci, B., Polici, M., Laghi, A., & Caruso, D. (2023). Radiomics Applications in Cardiac Imaging: A Comprehensive Review. *La Radiologia Medica*, *128*(8), 922–933. https://doi.org/10.1007/s11547-023-01658-x

Qiu, Q., Zhang, J., Duan, J., Wu, S., Ding, J., & Yin, Y. (2020). Development and Validation of Radiomics Model Built by Incorporating Machine Learning for Identifying Liver Fibrosis and Early-Stage

Cirrhosis. *Chinese Medical Journal*, *133*(22), 2653–2659. https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000001113

Radiology, E. S. o. (2022). Current Practical Experience With Artificial Intelligence in Clinical Radiology: A Survey of the European Society of Radiology. *Insights Into Imaging*, *13*(1). https://doi.org/10.1186/s13244-022-01247-y

Rogers, W., Seetha, S. T., Refaee, T., Lieverse, R., Granzier, R. W. Y., Ibrahim, A., Keek, S., Sanduleanu, S., Primakov, S., Beuque, M., Marcus, D., Alexander M.A. van der Wiel, Zerka, F., Oberije, C., Timmeren, J. E. v., Woodruff, H. C., & Lambin, P. (2020). Radiomics: From Qualitative to Quantitative Imaging. *British Journal of Radiology*, *93*(1108). https://doi.org/10.1259/bjr.20190948

Scapicchio, C., Gabelloni, M., Barucci, A., Cioni, D., Saba, L., & Neri, E. (2021). A Deep Look Into Radiomics. *La Radiologia Medica*, *126*(10), 1296–1311. https://doi.org/10.1007/s11547-021-01389-x

Sesgundo, J. A., Maeng, D. C., Tukay, J. A., Ascano, M. P., Suba-Cohen, J., & Sampang, V. (2024). Evaluation of Artificial Intelligence Algorithms for Diabetic Retinopathy Detection: Protocol for a Systematic Review and Meta-Analysis. *Jmir Research Protocols*, *13*, e57292. https://doi.org/10.2196/57292

Sharma, M., Savage, C., Nair, M., Larsson, I., Svedberg, P., & Nygren, J. (2022). Artificial Intelligence Applications in Health Care Practice: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, *24*(10), e40238. https://doi.org/10.2196/40238

Shetty, S., Ananthanarayana, V. S., & Mahale, A. (2022). Comprehensive Review of Multimodal Medical Data Analysis: Open Issues and Future Research Directions. *Acta Informatica Pragensia*, *11*(3), 423–457. https://doi.org/10.18267/j.aip.202

Sim, A. J., Kaza, E., Singer, L., & Rosenberg, S. A. (2020). A Review of the Role of MRI in Diagnosis and Treatment of Early Stage Lung Cancer. *Clinical and Translational Radiation Oncology*, *24*, 16–22. https://doi.org/10.1016/j.ctro.2020.06.002

Strohm, L. G. D., Hehakaya, C., Ranschaert, E., Boon, W., & Moors, E. H. (2020). Implementation of Artificial Intelligence (AI) Applications in Radiology: Hindering and Facilitating Factors. *European Radiology*, *30*(10), 5525–5532. https://doi.org/10.1007/s00330-020-06946-y

Tamaki, N., Aikawa, T., & Manabe, O. (2025). 18f-Fluorodeoxyglucose Imaging for Assessing Cardiovascular Inflammation. *Diagnostics*, *15*(5), 573. https://doi.org/10.3390/diagnostics15050573

Treglia, G., & Muoio, B. (2020). *Evidence-Based PET for Infectious and Inflammatory Diseases*. 111–121. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47701-1_12

Velamala, B. S., Gautam, S., & Lohani, S. (2025). Role of Artificial Intelligence in Reducing Error Rates in Radiology: A Scoping Review. *Cureus*. https://doi.org/10.7759/cureus.91957

Wang, K., Lu, X., Zhou, H., Gao, Y., Zheng, J., Tong, M., Wu, C., Liu, C., Huang, L., Jiang, T., Meng, F., Lu, Y., Ai, H., Xie, X., Yin, L., Liang, P., Tian, J., & Zheng, R. (2018). Deep Learning Radiomics of Shear Wave Elastography Significantly Improved Diagnostic Performance for Assessing Liver Fibrosis in Chronic Hepatitis B: A Prospective Multicentre Study. *Gut*, *68*(4), 729–741. https://doi.org/10.1136/gutjnl-2018-316204

Wu, J., Li, C., Gensheimer, M. F., Padda, S. K., Kato, F., Shirato, H., Wei, Y., Schönlieb, C., Price, S. J., Jaffray, D. A., Heymach, J. V., Neal, J. W., Loo, B. W., Wakelee, H. A., Diehn, M., & Li, R. (2021). Radiological Tumour Classification Across Imaging Modality and Histology. *Nature Machine Intelligence*, *3*(9), 787–798. https://doi.org/10.1038/s42256-021-00377-0

Yin, Q., Xu, H., Zhong, Y., Ni, J., & Hu, S. (2022). Diagnostic Performance of MRI, SPECT, and PET in Detecting Renal Cell Carcinoma: A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Cancer*, *22*(1). https://doi.org/10.1186/s12885-022-09239-3

Yoon, J. H., Strand, F., Baltzer, P., Conant, E. F., Gilbert, F. J., Lehman, C. D., Morris, E. A., Mullen, L. A., Nishikawa, R. M., Sharma, N., Vejborg, I., Moy, L., & Mann, R. M. (2023). Standalone AI for Breast Cancer Detection at Screening Digital Mammography and Digital Breast Tomosynthesis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Radiology*, *307*(5). https://doi.org/10.1148/radiol.222639

Zheng, Q., Yang, L., Zeng, B., Li, J., Guo, K., Liang, Y., & Liao, G. (2021). Artificial Intelligence Performance in Detecting Tumor Metastasis From Medical Radiology Imaging: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Eclinicalmedicine*, *31*, 100669. https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2020.100669