



Integrasi *Deep Learning* dalam Skrining CT Dosis Rendah untuk Penilaian Multiorgan dan Deteksi Dini Kanker Paru: Telaah Literatur

Rudfi Rizky S. Nainggolan

Program Studi Kedokteran, Universitas Islam Sumatera Utara, Indonesia

*Penulis Korespondensi: rudfirizky@gmail.com

Abstract. Low-dose Computed Tomography (CT) screening lowers lung cancer mortality, but a focus on nodules can overlook multiorgan comorbidities. This literature review evaluates the integration of deep learning for early detection of lung cancer and risk assessment. The current literature is searched through PubMed, Scopus, and Web of Science regarding the validation of deep learning algorithms on low-dose chest CT. The CNN model supports the detection, segmentation, measurement, and characterization of nodules, while radiomics strengthens malignant classifications. The system assesses coronary artery calcification, emphysema, and thoracic abnormalities. Deep learning equals or surpasses radiologist-related capabilities and has the potential to reduce workload and false-positive results. Nonetheless, clinical implementation still faces challenges, including algorithm generalization, the need for large amounts of annotated data, and prospective validation to ensure interpretability and reliability in real practice. Challenges include generalization, annotation, interpretability, and prospective validation. Deep learning integration promises efficient, accurate, multiorgan chest screening; clinical implementation requires external standardization and validation. In addition, the utilization of this technique allows for the simultaneous evaluation of coronary artery calcification loads, which serves as an important predictor of cardiovascular disease risk in patients undergoing lung cancer screening.

Keywords: Deep Learning; Low-Dose CT; Lung Cancer; Lung Nodules; Multiorgan Screening.

Abstrak. Skrining *Computed Tomography* (CT) dosis rendah menurunkan mortalitas kanker paru, tetapi fokus pada nodul dapat mengabaikan komorbiditas multiorgan. Telaah literatur ini mengevaluasi integrasi *deep learning* untuk deteksi dini kanker paru dan penilaian risiko. Literatur terkini ditelusuri melalui PubMed, Scopus, dan Web of Science mengenai validasi algoritma *deep learning* pada CT dada dosis rendah. Model CNN mendukung deteksi, segmentasi, pengukuran, dan karakterisasi nodul, sementara radiomik memperkuat klasifikasi keganasan. Sistem menilai kalsifikasi arteri koroner, emfisema, dan kelainan toraks. *Deep learning* menyamai atau melampaui kemampuan radiolog serta berpotensi mengurangi beban kerja dan hasil positif palsu. Meskipun demikian, implementasi klinis masih menghadapi tantangan berupa generalisasi algoritma, kebutuhan anotasi data dalam jumlah besar, serta validasi prospektif untuk memastikan interpretabilitas dan keandalannya dalam praktik nyata. Tantangan meliputi generalisasi, anotasi, interpretabilitas, dan validasi prospektif. Dapat disimpulkan bahwa integrasi *deep learning* menjanjikan skrining dada yang efisien, akurat, dan multiorgan; penerapan klinis memerlukan standarisasi dan validasi eksternal. Selain itu, pemanfaatan teknik ini memungkinkan evaluasi beban kalsifikasi arteri koroner secara bersamaan, yang berfungsi sebagai prediktor penting bagi risiko penyakit kardiovaskular pada pasien yang menjalani skrining kanker paru.

Kata Kunci: CT Dosis Rendah; *Deep Learning*; Kanker Paru; Nodul Paru; Skrining Multiorgan.

1. LATAR BELAKANG

Penggunaan *low-dose computed tomography* terbukti menurunkan mortalitas akibat kanker paru, tetapi fokus pemeriksaan yang terutama diarahkan pada nodul paru dapat menyebabkan temuan komorbiditas kardiovaskular dan kelainan multiorgan lain terabaikan, sehingga diperlukan pendekatan skrining dada yang lebih komprehensif. Integrasi kecerdasan buatan, khususnya *Convolutional Neural Networks*, memungkinkan identifikasi simultan terhadap nodul paru dan beban kalsifikasi arteri koroner yang sering kali terlewatkan pada pemeriksaan rutin. Model pembelajaran mendalam ini tidak hanya meningkatkan akurasi deteksi nodul paru hingga 90,0%, tetapi juga mengotomatisasi kategorisasi risiko penyakit

kardiovaskular guna mengoptimalkan alur kerja radiolog dalam menilai temuan insidental di dada dan perut bagian atas. Teknologi berbasis *deep learning* ini mampu menyaring hasil positif palsu melalui klasifikasi yang lebih presisi, sehingga meningkatkan efisiensi waktu pembacaan bagi ahli radiologi (Kim et al., 2024, p. 15968). Integrasi algoritma *deep learning* mampu mengatasi keterbatasan ini dengan mengotomatisasi deteksi nodul sekaligus melakukan stratifikasi risiko penyakit kardiovaskular dan penyakit paru obstruktif kronis secara simultan. Deteksi dini melalui teknologi ini sangat krusial karena kanker paru tetap menjadi penyebab utama kematian terkait keganasan, di mana intervensi pada stadium awal secara signifikan meningkatkan probabilitas kelangsungan hidup pasien. Kendati demikian, tantangan dalam membedakan nodul jinak dan ganas tetap menjadi hambatan klinis utama, yang sering kali memerlukan model penilaian risiko berbasis fitur radiologi untuk meningkatkan akurasi diagnostik. Selain itu, penerapan model *multitask foundation* memungkinkan ekstraksi fitur lintas data yang lebih efisien guna meminimalkan risiko kesalahan interpretasi akibat superposisi opasitas pada citra medis (Priyanti et al., 2025; Zhang et al., 2025, p. 4661). Selanjutnya, beban kerja radiolog yang kian meningkat akibat tingginya volume skrining tahunan dapat dikurangi secara signifikan melalui penggunaan sistem deteksi berbantuan komputer yang berperan sebagai pembaca kedua. Teknologi ini juga memungkinkan identifikasi otomatis dan karakterisasi nodul paru yang mencurigakan pada citra LDCT, sehingga membantu memprioritaskan lesi berisiko ganas dan mempercepat deteksi kanker paru pada tahap awal. Lebih lanjut, pemanfaatan sistem kecerdasan buatan dalam skrining ini mampu melampaui kemampuan klinisi dalam stratifikasi risiko adenokarsinoma invasif dengan tingkat akurasi yang tinggi, sekaligus memberikan wawasan histologis prediktif untuk manajemen bedah nodul pulmonal (Huang et al., 2024). Pengembangan model berbasis *deep learning* yang mampu mengintegrasikan data klinis dan pencitraan ini terbukti menurunkan angka kematian akibat kanker paru secara substansial melalui identifikasi dini pada populasi berisiko tinggi (Fahim et al., 2025, p. 857). Studi telaah literatur ini bertujuan untuk menguraikan perkembangan terkini dalam metodologi *deep learning* untuk skrining dada berbasis kecerdasan buatan, sekaligus mengevaluasi potensi sistem ini dalam meningkatkan akurasi diagnostik deteksi dini kanker paru dan penilaian komorbiditas multiorgan secara komprehensif.

2. KAJIAN TEORITIS

Landasan konseptual penelitian ini berpijak pada efikasi *low-dose computed tomography* sebagai standar emas skrining, yang kemudian diperkuat melalui integrasi algoritma berbasis *convolutional neural networks* untuk optimasi alur kerja radiologi. Pengembangan arsitektur jaringan saraf ini mencakup perbandingan antara pendekatan 2D-CNN yang efisien dalam komputasi dan model 3D-CNN yang lebih unggul dalam mengodekan informasi spasial nodul secara mendalam (Chetan et al., 2025, p. 1). Selain itu, pemanfaatan arsitektur canggih seperti *dual-path networks* dan *vision transformers* kini mulai diintegrasikan untuk menangkap dependensi fitur yang lebih kompleks serta meningkatkan sensitivitas dalam mendeteksi nodul yang berukuran kecil atau samar. Sistem berbasis kecerdasan buatan ini berfungsi sebagai alat pendukung keputusan yang mampu meningkatkan akurasi diagnostik sekaligus mengurangi waktu interpretasi yang dibutuhkan radiolog untuk memeriksa setiap pemindaian CT. Selain itu, model ini dapat mengaugmentasi keahlian klinis dengan mengidentifikasi biomarker tersembunyi yang mungkin terlewatkan selama peninjauan manual. Lebih jauh lagi, pemrosesan data hierarkis oleh algoritma *deep learning* memungkinkan ekstraksi fitur-fitur kompleks yang krusial bagi penilaian nodul yang bersifat indeterminant, sehingga membantu dokter dalam membedakan karakteristik lesi jinak dan ganas dengan presisi yang lebih tinggi (Kim, et al., 2025; Wu, et al., 2021, p. 218). Selain itu, kemampuan sistem untuk mempersonalisasi program skrining melalui stratifikasi risiko individu memungkinkan alokasi sumber daya klinis yang lebih efisien bagi pasien yang paling membutuhkan. Pemanfaatan model prediksi risiko ini juga bertujuan untuk menyempurnakan kriteria pemilihan kandidat skrining, melampaui batasan faktor epidemiologis konvensional seperti riwayat merokok dan usia. Implementasi pendekatan berbasis data ini memungkinkan identifikasi pola radiomik yang lebih sensitif terhadap perubahan morfologis nodul, yang pada gilirannya memperkuat efektivitas program skrining pada populasi berisiko tinggi (Salehjahromi et al., 2025). Pengembangan sistem ini juga menghadapi tantangan teknis terkait reliabilitas performa di berbagai kondisi pencitraan, terutama saat menghadapi data dengan tingkat noise tinggi yang lazim ditemukan pada pemindaian dosis rendah. Variasi dosis radiasi, parameter akuisisi, perangkat pemindai, serta algoritma rekonstruksi dapat mengubah karakteristik noise dan distribusi intensitas citra, sehingga menurunkan kemampuan model dalam mendeteksi nodul berukuran kecil dan membatasi generalisasinya pada data eksternal (Khan et al., 2026, p. 214). Oleh karena itu, penerapan model perlu disertai pelatihan menggunakan data multisenter, validasi eksternal pada berbagai protokol dan vendor CT, serta standarisasi parameter pencitraan untuk memastikan konsistensi hasil sebelum diintegrasikan

ke dalam praktik klinis. Salah satu strategi yang menjanjikan adalah penggunaan rekonstruksi citra berbasis deep learning, yang terbukti mampu mengurangi noise, meningkatkan tingkat deteksi nodul, dan memperbaiki akurasi pengukuran pada CT ultra-rendah dosis (Klemen et al., 2024, p. 2499).

3. METODE PENELITIAN

Studi literatur ini disusun dengan melakukan penelusuran literatur terkini melalui basis data ilmiah internasional seperti PubMed, Scopus, dan Web of Science untuk mengidentifikasi artikel yang mengevaluasi performa diagnostik algoritma kecerdasan buatan dalam skrining paru serta penilaian komorbiditas. Kriteria inklusi difokuskan pada publikasi dalam kurun waktu lima tahun terakhir yang mendiskusikan validasi algoritmik, integrasi alur kerja klinis, serta efikasi sistem deteksi berbantuan komputer dalam lingkungan skrining LDCT skala besar. Selain itu, proses seleksi artikel juga mempertimbangkan penelitian yang mengeksplorasi tantangan teknis, seperti kebutuhan akan dataset yang terstandarisasi untuk klasifikasi multikelas dan mitigasi overfitting dalam pengembangan model. Referensi yang masuk dalam kriteria inklusi adalah referensi yang dipublikasikan dalam 5 tahun terakhir dan membahas validasi klinis sistem *berbasis deep learning* pada modalitas pencitraan CT dada dosis rendah untuk deteksi dini kanker paru, yang dimuat dalam jurnal bereputasi. Analisis komparatif dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas arsitektur pembelajaran mendalam dibandingkan dengan metode pembelajaran statistik konvensional dalam klasifikasi nodul paru. Meskipun banyak model menunjukkan performa menjanjikan dalam lingkungan terkontrol, tinjauan ini menyoroti masih terbatasnya studi prospektif dan keberagaman data yang mencerminkan praktik klinis nyata.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan teknik *deep learning* pada segmentasi *region of interest* mengotomatisasi tahapan analisis radiomik, sehingga mengurangi beban kerja manual yang selama ini menjadi salah satu kendala utama dalam alur kerja pencitraan kuantitatif. Selain itu, kemajuan dalam arsitektur *Faster R-CNN* dengan integrasi *U-Net* telah secara signifikan meningkatkan *true positive rate* dalam deteksi nodul paru yang bersifat maligna. Sinergi antara teknologi komputasi awan dan algoritma pembelajaran mendalam ini memungkinkan pemrosesan data skala besar secara lebih efisien dibandingkan dengan sistem konvensional, yang pada akhirnya mendukung deteksi nodul paru secara akurat. Selain itu, penggunaan arsitektur jaringan saraf berbasis *dual-path* telah terbukti memperkuat ekstraksi fitur pada skala yang berbeda, sehingga

mampu membedakan karakteristik nodul yang tumpang tindih dengan struktur vaskular secara lebih presisi (Liao et al., 2025). Perkembangan arsitektur *Convolutional Neural Networks*, seperti model *end-to-end* tiga dimensi, telah menunjukkan performa yang setara atau bahkan melampaui panel ahli dalam mendeteksi nodul paru dan mengklasifikasikan berbagai penyakit toraks. Meskipun demikian, tantangan dalam menangani heterogenitas radiologis tetap menjadi hambatan signifikan, mengingat variasi ukuran dan bentuk nodul sering kali menyebabkan bias pada tingkat deteksi sistem. Selain itu, teknik rekonstruksi citra berbasis pembelajaran mendalam mampu menekan noise secara signifikan, yang memungkinkan penggunaan dosis radiasi yang lebih rendah tanpa mengorbankan sensitivitas dalam mendeteksi nodul kecil (Dhondt et al., 2024, p. 61).

Deteksi nodul paru lebih akurat dibandingkan dengan radiolog manual. Pendekatan skrining berbasis CT dosis rendah kini memanfaatkan model pembelajaran mendalam untuk melakukan skrining *end-to-end* yang mampu mendeteksi lesi secara efisien sekaligus mengurangi tingkat positif palsu. Penilaian pada citra toraks difokuskan pada deteksi dan karakterisasi nodul paru yang berpotensi ganas, termasuk segmentasi otomatis, pengukuran volume, serta analisis fitur morfologis dan radiomik untuk mendukung stratifikasi risiko kanker paru. Meskipun informasi kalsifikasi arteri koroner dan volume emfisema dapat diperoleh secara bersamaan, kedua temuan tersebut diposisikan sebagai informasi tambahan untuk memperkaya profil risiko pasien tanpa mengalihkan fokus utama dari skrining dan deteksi dini kanker paru. Pada pengenalan nodul atau kanker paru melalui CT, algoritma *deep learning* menunjukkan keberhasilan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan radiolog manual, dengan sensitivitas gabungan 82% dan spesifisitas 75%, sedangkan radiolog mencapai sensitivitas 81% dan spesifisitas 69%; keunggulan spesifisitas tersebut bermakna secara statistik, sementara perbedaan sensitivitas tidak signifikan. Lebih lanjut, penggunaan arsitektur *multi-crop convolutional neural networks* telah terbukti menghasilkan performa yang lebih unggul dibandingkan metode berbasis *auto-encoder* maupun ekstraksi fitur radiomik tradisional dalam mengklasifikasikan keganasan nodul (Pai, et al., Foundation model for cancer imaging biomarkers, 2024, p. 360). Studi meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa penggunaan modalitas CT menghasilkan akurasi diagnostik yang unggul dengan AUC mencapai 0,937 untuk identifikasi nodul paru, secara signifikan melampaui performa skrining menggunakan radiografi dada standar. Selanjutnya, integrasi data radiomik dengan fitur *deep learning* terbukti meningkatkan presisi dalam memprediksi karakteristik molekuler tumor dan staging klinis, yang melampaui efikasi model berbasis modalitas tunggal (Zhang et al., 2024, p. 23).

Perbandingan AI vs radiolog. Algoritma *deep learning* saat ini mampu menandingi atau melampaui kinerja dokter radiologi dalam memprediksi risiko keganasan nodul serta metastasis nodus limfa yang sulit terdeteksi secara visual. Pengembangan model berbasis *convolutional neural networks* kini mulai beralih dari ekstraksi fitur manual menuju pembelajaran representasi otomatis yang mampu menangkap heterogenitas pola pada jaringan tumor secara lebih komprehensif. Namun, adopsi luas teknologi ini di lingkungan klinis masih menghadapi tantangan terkait bukti real-world yang terbatas serta ketergantungan pada intervensi manusia yang subjektif dalam ekstraksi fitur tradisional. Kolaborasi akademik–industri melalui platform TensorFlow Google yang dilatih menggunakan 42.290 citra CT dari 14.851 pasien menunjukkan potensi *deep learning* dalam mendeteksi nodul paru maligna secara otomatis dengan akurasi 94% pada 6.716 kasus uji (Cîmpeanu et al., 2025, p. 89).

Integrasi model *deep learning* dalam skrining CT dosis rendah memberikan makna klinis yang signifikan dengan mentransformasi alur kerja radiologi dari sekadar deteksi lesi tunggal menjadi penilaian kesehatan komprehensif. Model ini dapat berperan sebagai pembaca pertama atau kedua untuk mendeteksi nodul, memperkirakan probabilitas keganasan, melakukan triase pemeriksaan yang mencurigakan, serta membantu menentukan interval pemantauan berdasarkan risiko individual. Meta-analisis menunjukkan bahwa algoritma *deep learning* memiliki sensitivitas 82% dan spesifisitas 75% dalam mendeteksi kanker paru, dibandingkan dengan 81% dan 69% pada dokter ahli, meskipun keunggulan spesifisitasnya lebih konsisten daripada keunggulan sensitivitasnya. Dengan demikian, penerapan AI tidak seharusnya dipahami sebagai pengganti radiolog, melainkan sebagai sistem pendukung keputusan yang dapat mengurangi beban interpretasi, menstandarkan penilaian, dan mengarahkan perhatian klinisi pada kasus berisiko tinggi. Keunggulan penting lain dari CT dada dosis rendah adalah kemampuannya menyediakan informasi multiorgan tanpa memerlukan pemeriksaan tambahan atau paparan radiasi baru (Milanese et al., 2024, p. 417). Selain mendeteksi dan mengukur nodul paru, analisis berbasis AI dapat mengkuantifikasi kalsifikasi arteri koroner, menilai emfisema, serta mengevaluasi densitas tulang vertebra sebagai indikator risiko kardiovaskular, penyakit paru kronis, dan osteoporosis. Pendekatan ini mengubah skrining kanker paru menjadi bentuk *opportunistic screening* yang memungkinkan identifikasi penyakit subklinis pada pasien yang awalnya diperiksa karena risiko kanker paru. Pada studi berbasis model multimodal-multitugas, pemanfaatan 163.725 seri CT dada dan 49 jenis data klinis untuk 17 tugas meningkatkan prediksi risiko kanker paru hingga 20% dan risiko kematian akibat penyakit kardiovaskular hingga 10% dibandingkan model sebelumnya. Temuan tersebut menunjukkan bahwa satu pemeriksaan CT dapat menghasilkan profil risiko

yang lebih luas dan mendukung pencegahan terpadu, selama temuan di luar paru tetap disampaikan sebagai informasi klinis tambahan yang memerlukan konfirmasi dan tindak lanjut sesuai pedoman (Wolf et al., 2023).

Dari perspektif diagnostik, integrasi data citra, radiomik, dan informasi klinis berpotensi meningkatkan ketepatan stratifikasi risiko serta personalisasi tata laksana. Rekonstruksi berbasis *deep learning* dapat menurunkan derau citra sehingga memungkinkan penggunaan dosis radiasi yang lebih rendah sekaligus mempertahankan kemampuan deteksi dan akurasi pengukuran nodul. Selanjutnya, segmentasi otomatis region of interest mengurangi tahapan manual yang paling menyita waktu dalam analisis radiomik, sedangkan kombinasi fitur radiomik dan fitur jaringan saraf dilaporkan meningkatkan prediksi karakteristik molekuler dan *T-staging dibandingkan dengan* penggunaan satu jenis fitur saja. Implikasi klinisnya adalah tersedianya alur kerja yang lebih efisien, mulai dari deteksi, segmentasi, pengukuran volumetrik, prediksi keganasan, hingga penyusunan rekomendasi pemantauan atau evaluasi lanjutan, sehingga keputusan klinis dapat dibuat lebih konsisten dan berbasis risiko (Koh, et al., Artificial intelligence and machine learning in cancer imaging, 2022; Zhao, et al., 2026, p. 136). Meskipun demikian, keberhasilan implementasi klinis ini sangat bergantung pada transparansi algoritma melalui pendekatan *explainable AI* guna meminimalisir keraguan klinisi terkait sifat "kotak hitam" model tersebut (Ren et al., 2024, p. 3).

Meskipun demikian, penerapan model *deep learning* dalam praktik klinis masih menghadapi tantangan metodologis, teknis, dan etis. Perbedaan scanner, protokol akuisisi, kualitas citra, karakteristik populasi, serta prevalensi penyakit dapat menurunkan kemampuan generalisasi model; karena itu, performa harus diuji melalui validasi eksternal multisenter sebelum digunakan secara rutin. Selain itu, sifat *black box* dapat membatasi kepercayaan klinisi terhadap hasil prediksi, terutama ketika keluaran AI memengaruhi keputusan biopsi, pembedahan, atau interval skrining (Cai et al., 2025, p. 9948). Variabilitas pengukuran kalsium koroner pada CT dada non-elektrokardiografi juga perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi konsistensi klasifikasi risiko. Oleh karena itu, diperlukan standarisasi protokol pencitraan dan pengembangan algoritma yang dapat memberikan penjelasan intuitif terkait fitur radiomik yang mendasari prediksi tersebut untuk menjembatani kesenjangan antara performa teknis dan kepercayaan klinis. Tantangan mendasar lainnya berkaitan dengan kebutuhan akan validasi biologis yang lebih kuat untuk memastikan bahwa fitur radiomik memiliki korelasi kausal dengan hasil klinis, alih-alih sekadar menangkap artefak data yang tidak relevan (Teng et al., 2025, p. 1717). Oleh karena itu, pengembangan metode *explainable AI* yang mampu memvisualisasikan area kontribusi fitur melalui *saliency maps* menjadi krusial untuk memastikan

bahwa model mempelajari biomarker biologis yang bermakna, bukan sekadar pola noise dalam dataset. Selain itu, audit berbasis populasi perlu dilakukan secara ketat untuk mendeteksi potensi *shortcut learning*, di mana model mungkin hanya mengandalkan fitur eksternal yang tidak relevan, guna memastikan validitas diagnostik yang sebenarnya (Brown et al., 2023, p. 4320). Transparansi sistem ini, yang memungkinkan klinisi untuk melihat dan memvalidasi dasar keputusan model, menjadi prasyarat utama untuk membangun kepercayaan serta memastikan bahwa intervensi medis didasarkan pada penalaran yang dapat diaudit. Oleh sebab itu, implementasi yang aman memerlukan standardisasi protokol dan pelaporan, pemantauan kinerja secara berkelanjutan, mekanisme penjelasan hasil, perlindungan data pasien, serta keterlibatan radiolog sebagai pengambil keputusan akhir (Kocak & Cuocolo, 2026, p. 8).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Integrasi *deep learning* dalam skrining CT dosis rendah berpotensi meningkatkan deteksi dini kanker paru, mendukung penilaian multiorgan dan stratifikasi risiko, serta meningkatkan efisiensi interpretasi, tetapi penerapannya memerlukan validasi multisenter, standardisasi, pemantauan berkelanjutan, dan kolaborasi radiolog–AI. Penelitian di masa depan disarankan untuk memprioritaskan pengembangan metode explainable AI yang lebih efisien dan terukur secara populasi guna meminimalkan ketergantungan model pada artefak atau pintasan data (*shortcut learning*). Selain itu, upaya kolaboratif dalam berbagi data antar-institusi melalui pendekatan *federated learning* harus diintensifkan untuk membangun dataset yang lebih besar dan representatif, guna mengatasi kendala *data silos* dan meningkatkan ketangguhan model dalam menghadapi variabilitas klinis di dunia nyata. Selain itu, pengembangan arsitektur yang mengintegrasikan fitur radiomik berbasis matematika dengan pengetahuan klinis yang eksplisit diharapkan mampu memberikan interpretabilitas yang lebih mendalam serta mendukung validasi biologis yang lebih akurat dalam stratifikasi prognosis pasien.

DAFTAR PUSTAKA

- Brown, A., Tomašev, N., Freyberg, J., Liu, Y., Karthikesalingam, A., & Schrouff, J. (2023). Detecting shortcut learning for fair medical AI using shortcut testing. *Nature Communications*, 14(1), 4314. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39902-7>
- Cai, L., Yang, X., Yu, J., Shao, Q., Wang, G., Yuan, B., Zhuang, J., Li, K. Y., Wu, Q., Liu, P., Yu, R., Cao, Q., Li, P., Sun, X., Zou, Y., Fu, X., Fang, X., Chen, C., & Lü, Q. (2025). Deep learning on T2WI to predict the muscle-invasive bladder cancer: A multi-center clinical study. *Scientific Reports*, 15(1), 9942. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82909-3>

- Chetan, L. E., Abhinay, S., Ranga, C. A. S., Reddy, M. E., & Rao, N. (2025). Timely detection of lung nodule malignancy using 3D convolutional neural networks. *Cureus Journal of Computer Science*. <https://doi.org/10.7759/s44389-025-06619-1>
- Cîmpeanu, O. L., Liliac, I. M., Mămuleanu, M., Voinea, Ș.-V., Olteanu, M., & Streba, C. T. (2025). Using convoluted neural networks in diagnosing lung cancer on computed tomography scans. *PubMed*, 51(1), 87–95. <https://doi.org/10.12865/chsj.51.01.09>
- Dhondt, L., Franck, C., Kellens, P.-J., Zanca, F., Buytaert, D., Hoyweghen, A. V., Addouli, H. E., Carpentier, K., Niekel, M., Spinhoven, M., Bacher, K., & Snoeckx, A. (2024). Impact of deep learning image reconstruction on volumetric accuracy and image quality of pulmonary nodules with different morphologies in low-dose CT. *Cancer Imaging*, 24(1), 60. <https://doi.org/10.1186/s40644-024-00703-w>
- Fahim, Y. A., Hasani, I. W., Kabba, S., & Ragab, W. M. (2025). Artificial intelligence in healthcare and medicine: Clinical applications, therapeutic advances, and future perspectives. *European Journal of Medical Research*, 30(1), 848. <https://doi.org/10.1186/s40001-025-03196-w>
- Huang, H., Yan, Z., Li, B., Lu, W., He, P., Fan, L., Wu, X., Liang, H., & He, J. (2024). LungPath: Artificial intelligence-driven histologic pattern recognition for improved diagnosis of early-stage invasive lung adenocarcinoma. *PubMed Central*, 13(8), 1816–1827. <https://doi.org/10.21037/tlcr-24-258>
- Khan, S., Noor, M. I., Ashraf, I., Masud, M. I., & Aman, M. (2026). Impact of CT intensity and contrast variability on deep-learning-based lung-nodule detection: A systematic review of preprocessing and harmonization strategies (2020–2025). *Diagnostics*, 16(2), 201. <https://doi.org/10.3390/diagnostics16020201>
- Kim, J., Kim, M.-H., Lim, D., Lee, H., Lee, J. J., Kwon, H., Kim, M. K., Song, K.-H., Kim, T., Jung, S. L., Lee, Y. O., & Baek, K. (2025). Deep learning technology for classification of thyroid nodules using multi-view ultrasound images: Potential benefits and challenges in clinical application. *Endocrinology and Metabolism*, 40(2), 216–224. <https://doi.org/10.3803/EnM.2024.2058>
- Kim, J. Y., Ryu, W., Kim, D., & Kim, E. Y. (2024). Better performance of deep learning pulmonary nodule detection using chest radiography with pixel level labels in reference to computed tomography: Data quality matters. *Scientific Reports*, 14(1), 15967. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66530-y>
- Klemenz, A., Albrecht, L., Manzke, M., Dalmer, A., Böttcher, B., Surov, A., Weber, M. dré, & Meinel, F. G. (2024). Improved image quality in CT pulmonary angiography using deep learning-based image reconstruction. *Scientific Reports*, 14(1), 2494. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52517-2>
- Kocak, B., & Cuocolo, R. (2026). Human-AI interaction and collaboration in radiology: From conceptual frameworks to responsible implementation. *Diagnostic and Interventional Radiology*. <https://doi.org/10.4274/dir.2026.263780>
- Koh, D., Papanikolaou, N., Bick, U., Illing, R., Kahn, C. E., Kalpathi-Cramer, J., Matos, C., Martí-Bonmatí, L., Miles, A., Mun, S. K., Napel, S., Rockall, A., Sala, E., Strickland, N. H., & Prior, F. (2022). Artificial intelligence and machine learning in cancer imaging. *Communications Medicine*, 2(1), 133. <https://doi.org/10.1038/s43856-022-00199-0>

- Liao, F., Cao, Y., Mao, J., Lin, Q., Man, Z., Cai, Z., & Huang, X. (2025). Automated diagnosis of pulmonary nodules in 3D PET/CT images using dual-path densely connected networks with cross-modal fusion. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 16(1), 9. <https://doi.org/10.21037/qims-2025-1037>
- Milanese, G., Silva, M., Ledda, R. E., Iezzi, E., Bortolotto, C., Mauro, L. A., Valentini, A., Reali, L., Bottinelli, O. M., Ilardi, A., Basile, A., Palmucci, S., Preda, L., Sverzellati, N., Aliotta, L., Barbarino, G. C., Borzi, S., Casotto, V., Catalano, M., ... Zilioli, C. (2024). Study rationale and design of the PEOPLHE trial. *La Radiologia Medica*, 129(3), 411–419. <https://doi.org/10.1007/s11547-024-01764-4>
- Pai, S., Bontempi, D., Hadžić, I., Prudente, V., Sokač, M., Chaunzwa, T. L., Bernatz, S., Hosny, A., Mak, R. H., Birkbak, N. J., & Aerts, H. J. W. L. (2024). Foundation model for cancer imaging biomarkers. *Nature Machine Intelligence*, 6(3), 354–367. <https://doi.org/10.1038/s42256-024-00807-9>
- Priyangi, R., Vandana, P., & Mahendran, K. (2025). Improving disease diagnosis with deep learning models for medical imaging (pp. 459–466). <https://doi.org/10.1201/9781003641551-74>
- Ren, Y., Tripathi, C., Guan, Z., Zhu, R., Hougha, V., Ma, Y., Hu, Z., Balch, J. A., Loftus, T. J., Rashidi, P., Shickel, B., Ozrazgat-Baslanti, T., & Bihorac, A. (2024). Transparent AI: Developing an explainable interface for predicting postoperative complications. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.16064>
- Salehjahromi, M., Li, H., Showkatian, E., Saad, M. B., Qayati, M., Ismail, S., Sujit, S. J., Muneer, A., Aminu, M., Hong, L., Han, X., Heeke, S., Cascone, T., Le, X., Vokes, N. I., Gibbons, D. L., Toumazis, I., Ostrin, E. J., Antonoff, M. B., ... Wu, J. (2025). Radiomics for dynamic lung cancer risk prediction in USPSTF-ineligible patients. *Cancers*, 17(21), 3406. <https://doi.org/10.3390/cancers17213406>
- Teng, X., Luo, Q., Chen, Y., & Peng, T. (2025). From texture analysis to artificial intelligence: Global research landscape and evolutionary trajectory of radiomics in hepatocellular carcinoma. *Discover Oncology*, 16(1), 1694. <https://doi.org/10.1007/s12672-025-03620-x>
- Wolf, A. M. D., Oeffinger, K. C., Shih, Y. T., Walter, L. C., Church, T. R., Fontham, E. T. H., Elkin, E. B., Etzioni, R., Guerra, C. E., Perkins, R. B., Kondo, K., Kratzer, T. B., Manassaram-Baptiste, D., Dahut, W. L., & Smith, R. A. (2023). Screening for lung cancer: 2023 guideline update from the American Cancer Society. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 74(1), 50–81. <https://doi.org/10.3322/caac.21811>
- Wu, G.-G., Lv, W., Yin, R., Xu, J., Yan, Y., Chen, R., Wang, J., Zhang, B., Cui, X., & Dietrich, C. F. (2021). Deep learning based on ACR TI-RADS can improve the differential diagnosis of thyroid nodules. *Frontiers in Oncology*, 11, 575166. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.575166>
- Zhang, H., Lu, T., Wang, L., Xing, Y., Hu, Y., Xu, Z., Lu, J., Yang, J., Chu, J., Zhang, B., & Zhong, J. (2025). Robustness of radiomics within photon-counting detector CT: Impact of acquisition and reconstruction factors. *European Radiology*, 35(8), 4661–4673. <https://doi.org/10.1007/s00330-025-11374-x>

- Zhang, X., Zhang, G., Qiu, X., Yin, J., Tan, W., Yin, X., Yang, H., Wang, H., & Zhang, Y. (2024). Exploring non-invasive precision treatment in non-small cell lung cancer patients through deep learning radiomics across imaging features and molecular phenotypes. *Biomarker Research*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40364-024-00561-5>
- Zhao, J., Wang, H., Liao, R., Liu, M., Cui, Z., Jin, B., Wang, Y., & Tang, R. (2026). Predicting aggressiveness of clear cell renal cell carcinoma via MRI using artificial intelligence: Implications for surgical planning in a retrospective multicenter study. *Scientific Reports*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-43983-x>