

## Transformasi Biomedik Menuju Personalisasi dan Kesehatan Presisi Pada Kanker

Niken Rahmah Ghanny<sup>1</sup>, Herera Rahajeng<sup>2</sup>, Pararawendy Indarjo<sup>3</sup>, Afifa Radhina<sup>4</sup>, Muhammad Fadhi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Departement of Biochemistry, Faculty of Medicine, Universitas Pembangunan Veteran Jakarta, Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup> Department of Pathology Anatomy, Faculty of Medicine, Universitas Pembangunan Veteran Jakarta, Jakarta, Indonesia

<sup>3</sup> Department of Data Science, Faculty of Computer Science and Engineering, Cakrawala University, Jakarta, Indonesia

<sup>4</sup>Department of Physiology, Faculty of Medicine, Universitas Pembangunan Veteran Jakarta, Jakarta, Indonesia

<sup>5</sup>Department of Anatomy, Faculty of Medicine, Universitas Pembangunan Veteran Jakarta, Jakarta, Indonesia

### ARTICLE INFORMATION

Received: November, 2025

Revised: November, 2025

Published: November, 2025

### CORRESPONDENCE

E-mail: [niken.rahmah.ghanny@upnvj.ac.id](mailto:niken.rahmah.ghanny@upnvj.ac.id)

## A B S T R A C T

Biomedical transformation is redefining cancer research and clinical practice by integrating wet lab experimental and computational approaches, digital technologies, and patient-specific models to realize precision health. This review aims to examine the conceptual developments, methodological frameworks, and translational opportunities of biomedical innovations supporting precision oncology. The methodological approach includes the identification, selection, and synthesis of scientific literature on experimental technologies, multi-omics integration, artificial intelligence (AI), and patient-specific cancer models, findings across disciplines were synthesized to illustrate how these components interact within a unified precision-medicine framework. Experimental studies generate molecular, imaging, and clinical datasets, while computational biology and AI analyse these complex data to identify predictive biomarkers, model tumor evolution, and determine therapeutic vulnerabilities. Digital transformation accelerates multimodal data integration through genomics, radiomics, and electronic health records, enabling more robust biomarker development and refined patient stratification. The convergence of experimental, computational, and digital approaches marks a shift from population-based oncology toward adaptive, personalized, and data-driven cancer care. Collectively, these integrated strategies enhance translational research capacity, improve diagnostic accuracy, and support the development of more effective, patient-centred therapeutic interventions.

**Keywords:** Biomedical Transformation, Health, Precision, Cancer

## A B S T R A K

Transformasi biomedik merevolusi penelitian dan praktik klinis kanker melalui integrasi antara pendekatan penelitian laboratorium dan komputasional, teknologi digital, serta pengembangan model spesifik pasien untuk mewujudkan kesehatan presisi. Tujuan artikel ini untuk mengkaji perkembangan konsep, kerangka metodologis,

dan peluang translasi dari berbagai inovasi biomedik yang berperan dalam onkologi presisi. Metode yang digunakan meliputi identifikasi, seleksi, dan sintesis literatur ilmiah mengenai teknologi penelitian laboratorium, integrasi multi-omik, kecerdasan buatan, serta model kanker spesifik pasien kemudian artikel dari berbagai disiplin tersebut dinarasikan untuk menggambarkan bagaimana komponen-komponen ini berinteraksi dalam satu kerangka kesehatan presisi. Studi eksperimental menghasilkan data molekuler, gambar pencitraan, dan klinis, yang kemudian dianalisis dengan biologi komputasional dan AI untuk mengidentifikasi biomarker prediktif, memodelkan evolusi tumor, serta menentukan kerentanan terapi. Transformasi digital mempercepat integrasi data melalui genomik, radiomik, dan rekam medis elektronik, sehingga memungkinkan pengembangan biomarker yang lebih kuat dan stratifikasi pasien yang lebih tepat. Konvergensi pendekatan eksperimental, komputasional, dan digital ini menandai pergeseran dari strategi berbasis populasi menuju pengobatan kanker yang adaptif, personal, dan berbasis data. Secara keseluruhan, pendekatan integratif ini memperkuat kemampuan riset translasi, meningkatkan ketepatan diagnosis, dan mendukung pengembangan strategi terapi yang lebih efektif serta berpusat pada pasien.

**Kata kunci:** Transformasi Biomedik, Kesehatan, Presisi, Kanker

## PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu biomedik modern telah mengarahkan dunia kedokteran menuju paradigma baru yang disebut kedokteran presisi (*precision medicine*), yaitu pendekatan medis yang menyesuaikan strategi pencegahan, diagnosis, dan terapi berdasarkan karakteristik biologis, genetik, dan klinis masing-masing individu. Pendekatan ini berbeda dari model kedokteran konvensional yang bersifat “*one-size-fits-all*”, karena menempatkan variabilitas individu sebagai dasar pengambilan keputusan medis. Kedokteran presisi memiliki tujuan untuk meningkatkan respons pengobatan dan hasil data klinis melalui stratifikasi pasien dan memiliki potensi besar dalam pengobatan seperti psikiatri presisi, onkologi presisi, dan informasi mengenai biomarker.<sup>1-3</sup> Dalam bidang onkologi presisi, penerapan teknologi *multi-omics* yang mengintegrasikan data genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik telah membuka peluang baru untuk memahami heterogenitas tumor secara lebih mendalam. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi penanda genetik fungsional yang mampu memperkirakan prognosis dan respons terapi dengan akurasi lebih tinggi dibandingkan penanda gen tunggal konvensional. Salah satu platform klinis seperti MASTER (*Molecularly Aided Stratification for Tumor Eradication Research*) telah digunakan untuk melakukan stratifikasi pasien berbasis biologi secara prospektif, sehingga rekomendasi terapi dapat disesuaikan secara individual dan berbasis bukti ilmiah lintas jenis kanker.<sup>4</sup> Hal ini menandai transisi penting dari terapi empiris menuju terapi berbasis profil molekuler pasien.

Pendekatan serupa juga mulai merevolusi bidang psikiatri presisi, di mana integrasi data berskala besar dari dunia nyata dengan informasi genomik, neuroimaging, serta biomarker yang digunakan untuk membangun model analisis untuk memprediksi respons terapi dan hasil klinis. Penelitian terkini menunjukkan bahwa stratifikasi pasien dengan gangguan mental seperti depresi, gangguan bipolar, dan skizofrenia berdasarkan *polygenic risk score* maupun kelainan pada sirkuit otak dapat membantu penentuan terapi yang lebih tepat sasaran.<sup>5-7</sup> Namun, penerapan klinisnya masih menghadapi kendala dalam hal akurasi model prediktif dan

validasi translasi dari laboratorium ke praktik klinis.

Pendekatan ini berfokus pada pengelompokan pasien ke dalam subtipe molekuler atau fenotipik yang homogen, sehingga diagnosis dan terapi dapat disesuaikan lebih spesifik terhadap mekanisme penyakit. Meskipun manfaat klinisnya masih dalam tahap validasi, hasil awal menunjukkan peningkatan akurasi diagnosis dan efektivitas pengobatan pada kelompok pasien yang diidentifikasi secara presisi. Secara keseluruhan, konvergensi teknologi molekuler berkapasitas tinggi (*high-throughput technologies*), kecerdasan buatan (AI), dan basis data kesehatan berskala besar akan meningkatkan percepatan adopsi kedokteran presisi di berbagai bidang medis. Pendekatan ini tidak hanya memungkinkan perawatan yang lebih individual dan efisien, tetapi juga memperkuat transisi dari sistem kesehatan berbasis reaktif menuju sistem kesehatan yang prediktif, preventif, dan personalisasi.

Namun, masih terdapat kesenjangan ilmiah dan praktis dalam implementasi kedokteran presisi di negara berkembang, termasuk Indonesia, terutama terkait kesiapan infrastruktur data, validasi

biomarker lokal, serta integrasi antara riset biomedik dan praktik klinis. Diperlukan pemetaan yang komprehensif mengenai arah transformasi biomedik menuju sistem kesehatan presisi agar dapat diadaptasi sesuai konteks nasional. Oleh sebab itu, artikel ini bertujuan untuk meninjau dinamika transformasi biomedik menuju system kesehatan presisi, yang berfokus pada perkembangan konsep, teknologi, dan tantangan implementasinya di konteks nasional.

## MODEL INTEGRATIF PENELITIAN EKSPERIMENTAL DAN KOMPUTASIONAL

Integrasi penelitian eksperimental di lab dan komputasional banyak digunakan pada studi mekanisme molekular progresi kanker, termasuk didalamnya stres oksidatif, apoptosis, dan pemrograman metabolik. Hal ini dapat dilakukan dengan mengkombinasikan hasil eksperimental laboratorium dan analisis komputasi. Teknik eksperimental laboratorium seperti kultur sel, model hewan coba, dan xenograft yang berasal dari pasien dapat menghasilkan data molekuler dan fenotip yang detail mengenai karakteristik sel kanker dan lingkungan mikro kanker. Lingkungan mikro kanker yang kompleks dan dinamis dapat menentukan perilaku kanker, adanya penelitian eksperimental dapat memberikan data biologis seperti ekspresi gen, profil sel imun, aktivitas enzimatis, dan interaksi antar sel.<sup>8</sup> Adanya penelitian komputasional digunakan untuk mengolah data ini menjadi model sistemik yang dapat menggambarkan interaksi antara komponen lingkungan mikro kanker dan dapat digunakan untuk simulasi pertumbuhan kanker.<sup>9</sup> Penelitian dengan pendekatan komputasional menggunakan model komputasi untuk analisis ekspresi gen, simulasi pertumbuhan tumor, dan prediksi respon tumor terhadap terapi.<sup>9-11</sup>

Dalam perkembangannya, model kultur tiga dimensi (3D) menjadi inovasi penting untuk mempelajari interaksi sel kanker dan lingkungan mikro secara lebih realistis. Penggunaan *patient-derived tumor organoid* (PDOs), yaitu organoid yang dikembangkan dari jaringan kanker manusia primer dapat digunakan untuk mempelajari heterogenitas tumor asli sehingga lebih representatif dalam menilai respons obat dan identifikasi target terapi. Selain itu, sistem

ko-kultur 3D dan teknologi mikrofluidik dapat memberikan kemampuan untuk meniru kondisi fisiologis seperti interaksi antar sel, morfogenesis jaringan, vaskularisasi, dan aliran darah. Kombinasi antara data empiris dari model 3D dan pemodelan komputasional dapat menghasilkan analisis spasial sampai temporal terhadap interaksi sel kanker dan dapat digunakan untuk simulasi mekanisme progresi tumor.<sup>12</sup>

Sistem kultur tumor tiga dimensi (3D) dan *patient-derived organoids* (PDOs), ketika diintegrasikan dengan model komputasional, menyediakan platform yang sangat kuat untuk mempelajari *lingkungan mikro tumor* dan memprediksi respons obat dengan relevansi fisiologis yang tinggi serta spesifisitas yang sesuai dengan pasien. PDO dan kultur 3D mampu mempertahankan karakteristik genetik, fenotipik, dan arsitektural dari tumor pasien, termasuk heterogenitas serta interaksi antar sel.<sup>13,14</sup> Sistem ko-kultur juga mencakup sel imun, sel stroma, dan komponen vaskular, sehingga dapat meniru kondisi *in vivo* dengan

lebih baik dan memungkinkan studi mengenai interaksi antara tumor–imun serta tumor–stroma.<sup>15,16</sup> Model– model ini digunakan untuk *high-throughput drug screening*, di mana sensitivitas obat pada PDO sering kali berkorelasi dengan hasil klinis pasien.<sup>17</sup> Integrasi dengan pencitraan komputasional dan *machine learning* memungkinkan analisis kuantitatif secara real-time terhadap efek obat serta identifikasi biomarker prediktif. Platform ko–kultur yang dilengkapi organoid vaskular memungkinkan studi tentang penyebaran dan metastasis sel kanker, sementara analisis komputasional terhadap ekspresi gen dan migrasi sel memberikan wawasan tentang mekanisme resistensi obat dan progresi metastatik.<sup>18–20</sup>

Integrasi sistem kultur tumor 3D dan organoid turunan pasien dengan model komputasional memungkinkan analisis menyeluruh yang bersifat spesifik pasien terhadap lingkungan mikro tumor dan respons obat. Pendekatan ini mendorong kemajuan onkologi presisi dengan meningkatkan relevansi fisiologis model praklinis, mempercepat proses *drug screening*, dan mendukung pengembangan terapi yang terpersonalisasi.

## TRANSFORMASI DIGITAL BIOMEDIK

Transformasi digital dalam penelitian biomedik telah merevolusi studi kanker dengan memanfaatkan kecerdasan buatan (*artificial intelligence / AI*), analisis data besar (*big data analytics*), dan integrasi *multi-omics* untuk mewujudkan perawatan kanker yang lebih presisi dan terpersonalisasi.<sup>21,22</sup> Algoritma AI dan *machine learning* mampu menganalisis kumpulan data yang sangat besar dan kompleks dari teknologi *next-generation sequencing*, pencitraan medis, serta rekam medis elektronik, sehingga memungkinkan diagnosis kanker yang lebih dini dan akurat, peningkatan prediksi risiko, serta identifikasi biomarker dan target terapi baru.<sup>23–27</sup> Integrasi *multi-omics* yang menggabungkan genomik, transkriptomik, proteomik, dan radiomic memberikan pemahaman lebih mendalam terhadap heterogenitas tumor dan jalur molekuler yang terlibat, mendukung penentuan subtype kanker, stratifikasi risiko, dan pemilihan terapi individual yang lebih tepat.

Kemajuan ini juga mengubah alur kerja klinis. Alat digital berbasis AI dalam patologi dan pencitraan kini digunakan untuk otomatisasi deteksi tumor, penentuan derajat keganasan, serta kuantifikasi biomarker, yang secara signifikan meningkatkan akurasi dan efisiensi diagnosis.<sup>25,26,28</sup> Teknologi *digital twin* yang menciptakan model virtual dinamis spesifik pasien dengan mengintegrasikan data multimodal dan AI muncul sebagai alat yang sangat menjanjikan untuk mengoptimalkan perencanaan terapi, memprediksi prognosis, dan mendukung pengambilan keputusan bedah. Meskipun masih terdapat tantangan seperti heterogenitas data, standarisasi, dan pertimbangan etika, integrasi AI, data besar, dan *multi-omics* telah mendorong kemajuan pesat dalam bidang onkologi presisi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas terapi yang disesuaikan dengan karakteristik pasien, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan hasil klinis dan kualitas hidup pasien kanker.<sup>22–28</sup>

Transformasi digital dalam penelitian kanker secara mendasar telah mengubah lanskap bidang ini melalui kemajuan di bidang kecerdasan buatan (*artificial intelligence / AI*), biologi komputasional, dan kedokteran presisi. AI dan *machine learning* kini memungkinkan analisis kumpulan data berdimensi tinggi dan multimodal termasuk genomik, pencitraan medis, dan rekam medis klinis yang memfasilitasi deteksi kanker lebih dini, klasifikasi tumor yang lebih akurat, serta penemuan biomarker dan target terapi baru.<sup>29-</sup>

<sup>33</sup> Alat-alat biologi komputasional mengintegrasikan dan menafsirkan data kompleks tersebut untuk mendukung pengembangan strategi pengobatan personalisasi dan mengidentifikasi mekanisme resistensi obat, sementara teknologi *next-generation sequencing* dan patologi digital menghasilkan data berskala besar yang diperlukan untuk analisis ini.<sup>30-32</sup>

Digitalisasi juga mentransformasi integrasi antara penelitian eksperimental di laboratorium dan komputasional dalam onkologi dengan melakukan alur kerja terpadu di mana data eksperimen dapat diproses, divisualisasikan, dan diinterpretasikan secara cepat menggunakan platform berbasis AI. Sebagai contoh, model AI dapat memprediksi varian patogenik, menganalisis genomik sel tunggal (*single-cell genomics*), serta menelusuri literatur untuk mengidentifikasi target gen, sementara patologi digital dan *radiomics* menggunakan *deep learning* untuk mengkuantifikasi karakteristik tumor dan memprediksi respons terapi. Integrasi ini mempercepat penemuan biomarker, mengoptimalkan pengambilan keputusan klinis, serta mendukung transisi dari pengobatan empiris menuju kedokteran presisi, yang pada akhirnya menghasilkan perawatan kanker yang lebih efektif dan terpersonalisasi.<sup>29</sup>

## MODEL SPESIFIK PASIEN DALAM KESEHATAN PRESISI

Model spesifik pasien merupakan inti dari pengembangan kedokteran presisi dalam penelitian kanker, karena memungkinkan perancangan dan validasi strategi penyakit serta terapi yang benar-benar dipersonalisasi dengan meniru karakteristik biologis unik dari tumor masing-masing pasien. Model ini meliputi *patient-derived organoids* (PDOs), *xenografts*,

*assembloids*, dan sistem mikro-fisiologis yang mempertahankan heterogenitas tumor, kompleksitas lingkungan mikro, serta ciri genetik pasien. Hal ini memungkinkan penilaian yang lebih akurat terhadap respons obat dan mekanisme resistensi.

Pemodelan komputasional mengintegrasikan data eksperimental berkapasitas tinggi dari biopsi pasien dan analisis *multi-omics* (genomik, transkriptomik, dan proteomik) untuk mensimulasikan jalur pensinyalan, memprediksi respons terapi, serta mengidentifikasi kombinasi obat optimal yang disesuaikan dengan individu pasien. Kecerdasan buatan (*artificial intelligence / AI*) dan analisis data besar memperkuat model ini dengan kemampuan mengolah dataset kompleks, mengidentifikasi biomarker prediktif, serta menghubungkan respons obat *in vitro* atau *in vivo* dengan hasil klinis. Sebagai contoh, skrining *high-throughput* berbasis mikrofluidik yang dikombinasikan dengan pemodelan matematis telah digunakan untuk menghasilkan model dinamis spesifik pasien pada jalur apoptosis, yang memungkinkan prediksi

terapi kombinasi personal pada kanker pankreas. Integrasi *multi-omics* memastikan bahwa model ini menangkap spektrum penuh biologi tumor, mendukung penemuan target terapeutik baru serta validasi rejimen pengobatan individual. Konvergensi antara pendekatan eksperimental dan komputasional ini mempercepat translasi onkologi presisi ke praktik klinis, meningkatkan akurasi pemilihan terapi, serta berkontribusi terhadap peningkatan hasil pengobatan pasien.<sup>34-36</sup>

Integrasi antara penelitian eksperimental (*wet lab*) dan komputasional (*dry lab*), transformasi digital biomedik, serta pengembangan model spesifik pasien secara mendasar telah mendorong kemajuan onkologi presisi dengan menghadirkan perawatan kanker yang sangat personal, prediktif, dan berbasis data.<sup>37</sup> Penelitian eksperimental menghasilkan data molekuler, pencitraan, dan klinis yang kaya, sedangkan pendekatan komputasional menganalisis serta menafsirkan kumpulan data kompleks tersebut untuk mengungkap wawasan yang dapat ditindaklanjuti dalam diagnosis, prognosis, dan pemilihan terapi. Transformasi digital mempercepat proses ini melalui integrasi lintas platform antara data *multi-omics*, radiologi, histologi, dan klinis, sehingga memungkinkan pengembangan biomarker multimodal dan stratifikasi pasien yang lebih akurat.<sup>38</sup>

AI dan analisis data besar mengotomatisasi serta meningkatkan efisiensi berbagai alur kerja, seperti penemuan biomarker, prediksi respons obat, dan analisis pencitraan, sementara teknologi *digital twin* menciptakan model virtual dinamis spesifik pasien yang dapat mensimulasikan perilaku tumor dan hasil terapi. Integrasi *multi-omics* memastikan bahwa model-model tersebut menangkap kompleksitas biologis penuh dari kanker setiap pasien, mendukung perencanaan terapi yang individual dan pengambilan keputusan klinis secara real-time.<sup>39,40</sup>

Secara keseluruhan, ketiga kerangka kerja ini telah mentransformasi onkologi dari pendekatan “satu untuk semua” menuju paradigma kedokteran presisi, di mana terapi dirancang berdasarkan profil molekuler dan klinis unik masing-masing pasien. Pendekatan ini

meningkatkan efektivitas pengobatan, memperbaiki hasil klinis, dan membuka jalan menuju sistem perawatan kesehatan yang adaptif serta berbasis data.

## SIMPULAN

Transformasi biomedik telah membawa perubahan mendasar dalam arah penelitian dan praktik kedokteran modern, dari pendekatan empiris yang bersifat populatif menuju sistem kesehatan presisi yang berbasis individu. Integrasi antara penelitian eksperimental dan komputasional, kemajuan transformasi digital biomedik, serta pengembangan model spesifik pasien membentuk fondasi utama kedokteran presisi yang adaptif, prediktif, dan terpersonalisasi. Pendekatan integratif ini tidak hanya memperdalam pemahaman terhadap mekanisme molekuler penyakit, tetapi juga mempercepat proses translasi hasil penelitian ke aplikasi klinis melalui pemanfaatan *multi-omics*, kecerdasan buatan, *machine learning*, dan teknologi *digital twin*.

Dalam konteks onkologi dan bidang biomedik lainnya, model integratif dan digitalisasi data kesehatan memungkinkan pengembangan biomarker multimodal, simulasi terapi berbasis pasien, serta pengambilan keputusan klinis yang lebih akurat. Hal ini menjadi dasar bagi munculnya paradigma baru dalam kedokteran: *predictive, preventive, personalized, and participatory medicine (P4 medicine)*, yang menempatkan pasien sebagai pusat sistem kesehatan yang cerdas dan kolaboratif.

Bagi Indonesia, percepatan transformasi biomedik menuju kesehatan presisi memerlukan penguatan infrastruktur riset, integrasi data lintas lembaga, serta peningkatan kapasitas sumber daya manusia dalam bidang bioinformatika, farmakologi molekuler, dan kecerdasan buatan. Dengan mengoptimalkan sinergi antara riset eksperimental, analisis komputasional, dan teknologi digital, masa depan kedokteran Indonesia dapat diarahkan menuju layanan kesehatan yang lebih efisien, berbasis bukti, dan berkeadilan di mana terapi bukan lagi dirancang untuk populasi umum, melainkan untuk setiap individu dengan karakteristik biologis yang unik.

## REFERENSI

1. Alowais SA, Alghamdi SS, Alsuhebany N, Alqahtani T, Alshaya AI, Almohareb SN, et al. Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice. *BMC Med Educ.* 2023 Sep 22;23(1):689.
2. Ahmed MM, Okesanya OJ, Oweidat M, Othman ZK, Musa SS, Lucero-Prisno III DE. The ethics of data mining in healthcare: challenges, frameworks, and future directions. *BioData Min.* 2025 Jul 11;18(1):47.
3. Mwogosi A. Ethical and privacy challenges of integrating generative AI into EHR systems in Tanzania: A scoping review with a policy perspective. *Digit Health.* 2025 Apr 20;11.
4. Alami H, Rivard L, Lehoux P, Hoffman SJ, Cadeddu SBM, Savoldelli M, et al. Artificial intelligence in health care: laying the Foundation for Responsible, sustainable, and inclusive innovation in low- and middle-income countries. *Global Health.* 2020 Dec 24;16(1):52.
5. Liu X, Glocker B, McCradden MM, Ghassemi M, Denniston AK, Oakden-Rayner L. The

medical algorithmic audit. *Lancet Digit Health*. 2022 May;4(5):e384–97.

6. Esmailzadeh P. Challenges and strategies for wide-scale artificial intelligence (AI) deployment in healthcare practices: A perspective for healthcare organizations. *Artif Intell Med*. 2024 May;151:102861.
7. Cross JL, Choma MA, Onofrey JA. Bias in medical AI: Implications for clinical decision-making. *PLOS Digital Health*. 2024 Nov 7;3(11):e0000651.
8. Daneshjou R, Vodrahalli K, Novoa RA, Jenkins M, Liang W, Rotemberg V, et al. Disparities in dermatology AI performance on a diverse, curated clinical image set. *Sci Adv*. 2022 Aug 12;8(32).
9. Drukker K, Chen W, Gichoya J, Grusauskas N, Kalpathy-Cramer J, Koyejo S, et al. Toward fairness in artificial intelligence for medical image analysis: identification and mitigation of potential biases in the roadmap from data collection to model deployment. *Journal of Medical Imaging*. 2023 Apr 26;10(06).
10. Ueda D, Kakinuma T, Fujita S, Kamagata K, Fushimi Y, Ito R, et al. Fairness of artificial intelligence in healthcare: review and recommendations. *Jpn J Radiol*. 2024 Jan 4;42(1):3–15.

11. Murdoch B. Privacy and artificial intelligence: challenges for protecting health information in a new era. *BMC Med Ethics*. 2021 Dec 15;22(1):122.
12. Xia L, Cao Z, Zhao Y. Paradigm Transformation of Global Health Data Regulation: Challenges in Governance and Human Rights Protection of Cross-Border Data Flows. *Risk Manag Healthc Policy*. 2024 Dec;Volume 17:3291–304.
13. Reddy S. Explainability and artificial intelligence in medicine. *Lancet Digit Health*. 2022 Apr;4(4):e214– 5.
14. Ahmed MM, Okesanya OJ, Oweidat M, Othman ZK, Musa SS, Lucero-Prisno III DE. The ethics of data mining in healthcare: challenges, frameworks, and future directions. *BioData Min*. 2025 Jul 11;18(1):47.
15. Narkhede MR, Wankhede NI, Kamble AM. Enhancing patient autonomy in data ownership: privacy models and consent frameworks for healthcare. *Journal of Digital Health*. 2025 Mar 3;1–23.
16. Pesapane F, Volonté C, Codari M, Sardanelli F. Artificial intelligence as a medical device in radiology: ethical and regulatory issues in Europe and the United States. *Insights Imaging*. 2018 Oct 15;9(5):745–53.