



Studi Literatur Terkait Tantangan Biofisika di Masa Depan dalam Bidang Kedokteran dan Teknologi Kesehatan

Muliyana¹, Nazwa Adhelia Shabira¹, Siti Rahmania¹, Rilla Ilma Ningrum¹, Devina Rayzy Perwitasari Sutaji Putri¹

¹⁾ Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman Jl. Barong Tongkok No 4, Gunung Kelua, Kecamatan Samarinda Ulu, Samarinda 75242, Kalimantan Timur, Indonesia

*E-mail korespondensi: devina_rayzy@fmipa.unmul.ac.id

Article Info:

Received: 13-06-2025

Revised: 23-02-2026

Accepted: 26-02-2026

Keywords:

Biophysics, Medical Technology, Radiation Therapy,



Abstract

Biophysics is an interdisciplinary branch of science that integrates the principles of physics in studying biological systems, and has become an important foundation in the development of modern medical technology. Its applications cover a wide range of fields, from medical imaging, radiation therapy, biological systems modeling, to high-precision biomolecular technology. As the complexity of the global health system increases, the demands for efficiency, accuracy, and personalization of medical services are increasing. In this context, the role of biophysics is becoming increasingly important, while facing complex and multidimensional challenges. This literature study aims to identify and examine the main challenges faced by biophysics in its contribution to the future of medicine and health technology. Through a review of various recent scientific publications, it was found that these challenges include: the need for multi-scale biological data integration, both at the molecular, cellular, and organ levels, the development of theoretical models and physical simulations that are able to accurately represent the dynamics of biological systems, the limitations of real-time non-invasive diagnostic and treatment technologies, and ethical, safety, and regulatory issues in the implementation of biophysical technology in clinical practice. In addition, there are still gaps in cross-disciplinary collaboration, both between physicists, biologists, and medical personnel, as well as in educational contexts that do not fully support the integration of biophysics into the medical curriculum. This study concludes that collaborative and holistic strategic research, increasing scientific literacy in biophysics, and innovative regulatory and policy support are key to addressing these challenges and ensuring that biophysics can continue to be a driving force for innovation in future healthcare systems.

PENDAHULUAN

Saat ini, teknologi kesehatan digital berkembang dengan sangat pesat, menghasilkan kumpulan data kesehatan dalam skala besar yang ditandai dengan volume tinggi, keanekaragaman sumber, serta kecepatan akumulasi yang luar biasa. *Medical Big Data* atau mahadata kesehatan ini dapat berasal dari berbagai sumber, seperti rekam medis elektronik (RME), data hasil penelitian, informasi dari media sosial, perangkat *wearable* atau sensor fisiologis, data genetik, hingga klaim administratif dari sistem asuransi kesehatan. Lonjakan data ini tidak hanya menuntut pendekatan analitik baru, tetapi juga membutuhkan dukungan lintas-disiplin dalam mengelola, memahami, dan mengaplikasikan data secara tepat guna dalam pelayanan kesehatan modern. [11]

Di sisi lain, sistem pelayanan kesehatan modern juga menghadapi tantangan peningkatan prevalensi penyakit kronis seperti kanker, penyakit kardiovaskular, serta gangguan

neurodegeneratif yang memerlukan deteksi dini dan analisis data multidimensional secara cepat dan akurat. Kompleksitas diagnosis penyakit yang semakin tinggi, kebutuhan peralatan canggih, serta analisis data medis yang kompleks menjadikan integrasi teknologi biomedis dan kecerdasan buatan sebagai kebutuhan strategis dalam sistem kesehatan masa kini. [18].

Untuk mengatasi masalah tersebut, ilmu biofisika memainkan peran krusial sebagai fondasi ilmiah yang menopang pemanfaatan teknologi kesehatan berbasis data. Biofisika, sebagai cabang ilmu yang mengkaji fenomena biologis melalui pendekatan fisika, berkontribusi terhadap pemahaman mendalam mengenai mekanisme tubuh manusia serta pengembangan teknologi medis presisi. Dampak positif penerapan biofisika tampak nyata dalam kemajuan perangkat diagnostik, sensor biometrik, dan sistem pemantauan real-time yang terintegrasi dengan *Big Data*. Oleh karena itu, biofisika tidak hanya menjadi sumber pengetahuan ilmiah, tetapi juga landasan untuk membentuk sikap kritis, mengembangkan inovasi, serta memperkuat sinergi antara teknologi dan penelitian medis yang berbasis bukti. [5]

Ilmu biofisika merupakan cabang interdisipliner yang menggabungkan prinsip-prinsip fisika dengan biologi untuk memahami sistem biologis secara kuantitatif. Dalam bidang kedokteran dan teknologi kesehatan, biofisika memberikan kontribusi besar melalui pengembangan alat diagnostik seperti MRI, CT scan, dan teknologi pencitraan lainnya, serta pemahaman mendalam terhadap mekanisme molekuler dalam tubuh manusia. Namun, seiring berkembangnya kebutuhan klinis dan kemajuan teknologi, biofisika dihadapkan pada tantangan-tantangan baru yang kompleks dan multidimensi. [12]

Salah satu metode pengobatan alternatif yang efektif untuk meningkatkan kesehatan seseorang telah lama dikenal sebagai terapi refleksi kaki. Terapi ini bertujuan untuk merangsang titik-titik refleksi pada kaki untuk memberikan berbagai manfaat kesehatan, seperti meredakan nyeri, meningkatkan sirkulasi darah, dan mengurangi stres. Studi ini menemukan bahwa titik-titik tertentu pada kaki memiliki hubungan dengan organ dan sistem tubuh lainnya. Terapi refleksi telah digunakan sebagai terobosan terapi alternatif dalam beberapa dekade terakhir, termasuk penggunaan teknologi untuk meningkatkan hasilnya. [9]

Perkembangan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dalam bidang radioterapi semakin mempertegas peran biofisika dalam praktik klinis modern. AI telah diterapkan pada berbagai tahapan radioterapi, mulai dari segmentasi organ dan target tumor, perencanaan dosis, hingga prediksi respons terapi pasien. Penerapan ini dinilai mampu meningkatkan efisiensi workflow klinis, konsistensi antar operator, serta mendukung pendekatan terapi yang lebih presisi dan personal. Namun, implementasinya masih menghadapi tantangan berupa kebutuhan dataset dalam jumlah besar, validasi klinis lintas institusi, serta regulasi yang ketat untuk menjamin keamanan dan akurasi sistem. [19]

Sejalan dengan hal tersebut, AI berkembang pesat terutama pada aspek segmentasi otomatis, perencanaan terapi berbasis algoritma, dan *quality assurance* (QA) dalam radioterapi. Otomatisasi ini membantu mengurangi variasi manual dan meningkatkan ketepatan perhitungan dosis, tetapi tetap memerlukan supervisi tenaga profesional untuk menjaga standar klinis dan keselamatan pasien. Dengan demikian, integrasi AI dalam radioterapi tidak hanya bergantung pada kecanggihan teknologi, tetapi juga pada kesiapan sumber daya manusia serta sistem pengawasan yang memadai. [20]

Penerapan kecerdasan buatan yang semakin luas di berbagai bidang kedokteran pada akhirnya memberikan dampak langsung terhadap kualitas pelayanan kesehatan secara keseluruhan. Teknologi *Artificial Intelligence* (AI) ini sangat membantu Tenaga Kesehatan dalam memeriksa dan mengobati penyakit dengan lebih cepat dan lebih tepat. Teknologi AI ini juga bantu mempercepat pemeriksaan sehingga bisa mengurangi biaya pemeriksaan penunjang dalam diagnosis suatu penyakit. Teknologi AI ini juga sangat membantu untuk meningkatkan kepercayaan dan harapan pasien terhadap deteksi dan penyembuhan penyakitnya. [8]

Salah satu keunggulan utama dari penggunaan AI dalam pencitraan medis adalah kemampuannya untuk mendeteksi kesalahan dan anomali yang mungkin terlewat oleh mata manusia. Metode berbasis AI telah menunjukkan hasil yang canggih dalam deteksi dan

klasifikasi lesi, yang memungkinkan diagnosis lebih dini dan perawatan yang lebih efektif. Sebagai contoh, AI dapat membantu mengidentifikasi pola yang menunjukkan adanya lesi atau tumor pada tahap awal, yang seringkali sulit dideteksi oleh radiologis secara manual.[8]

Penggunaan kecerdasan buatan (AI) dalam pencitraan medis bukanlah inovasi baru. Pembelajaran mesin, yang merupakan bagian integral dari AI, telah lama digunakan dalam diagnosis dan deteksi berbantuan komputer (CAD) di bidang radiologi. CAD membantu meningkatkan akurasi dan efisiensi diagnosis dengan menyediakan panduan tambahan bagi radiologis dalam menganalisis gambar medis. Contohnya, AI telah terbukti sangat berguna dalam diagnosis kanker payudara dan prostat melalui analisis MRI. Selain itu, dalam situasi darurat global seperti pandemi COVID-19, AI memainkan peran penting dalam mendiagnosis penyakit ini melalui gambar medis seperti CT scan dan rontgen dada[15].

Penerapan prinsip dan hukum fisika dalam bidang kedokteran telah dimulai sejak lama, tetapi menjadi sangat penting setelah penemuan sinar-X oleh Wilhelm Roentgen pada tahun 1895. Roentgen menciptakan citra radiografi manusia pertama yang menjadi awal perkembangan teknologi pencitraan medis modern. Pengembangan pencitraan medis kemudian berlanjut dengan cepat, termasuk pengembangan pesawat fluoroskopi, mammografi, CT scan, USG, MRI, PET, dan lainnya.[10]

Tantangan-tantangan ini antara lain mencakup integrasi data biologis yang masif dan beragam, peningkatan akurasi dan efisiensi perangkat medis, pengembangan model komputasional untuk simulasi proses biologis, serta etika dalam pemanfaatan teknologi medis berbasis biofisika. Studi literatur ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis tantangan-tantangan utama tersebut guna memberikan gambaran strategis arah pengembangan biofisika di masa depan.[3]

Biofisika, sebagai disiplin ilmu yang mengintegrasikan prinsip-prinsip fisika dengan sistem biologis, telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir. Perkembangan ini telah membuka peluang baru dalam memahami kompleksitas sistem biologis, mulai dari skala molekuler hingga organisme utuh. Dalam bidang kedokteran, biofisika telah memainkan peran penting dalam mengembangkan teknologi diagnostik dan terapeutik yang inovatif, seperti pencitraan resonansi magnetik (MRI), terapi radiasi, dan pengembangan obat-obatan yang ditargetkan. Namun, masih banyak tantangan yang dihadapi dalam mengintegrasikan prinsip-prinsip fisika dengan sistem biologis yang kompleks dan dinamis. Salah satu tantangan utama adalah memahami interaksi antara komponen-komponen biologis yang berbeda, seperti protein, sel, dan jaringan, yang beroperasi pada skala waktu dan ruang yang berbeda. Selain itu, sistem biologis juga memiliki sifat non-linier dan adaptif, yang membuatnya sulit untuk diprediksi dan dimodelkan. Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi komputasi dan analitik data telah memungkinkan peneliti untuk mengembangkan model-model biofisika yang lebih akurat dan kompleks. Namun, masih banyak pekerjaan yang harus dilakukan untuk mengembangkan model-model yang dapat memprediksi perilaku sistem biologis dengan lebih baik dan memungkinkan pengembangan terapi yang lebih efektif. [12]

Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan dalam biofisika kedokteran menjadi sangat penting untuk menjawab tantangan kesehatan di masa depan. Artikel ini akan membahas beberapa tantangan biofisika di masa depan dalam bidang kedokteran, termasuk pengembangan model-model biofisika yang lebih akurat, pengembangan teknologi diagnostik dan terapeutik yang inovatif, dan integrasi biofisika dengan bidang lain seperti genomik dan proteomik. Dengan demikian, diharapkan bahwa penelitian dan pengembangan dalam biofisika kedokteran dapat meningkatkan pemahaman kita tentang sistem biologis dan memungkinkan pengembangan terapi yang lebih efektif untuk berbagai penyakit.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian studi literatur (*literature review*) sebanyak 16 artikel untuk mengidentifikasi penelitian yang relevan mengenai Studi Literatur Terkait Tantangan Biofisika Di Masa Depan Dalam Bidang Kedokteran Dan Teknologi Kesehatan.

Sumber data berasal dari artikel ilmiah, jurnal *peer-reviewed*, buku teks, serta laporan penelitian yang diterbitkan antara tahun 2020 hingga 2025. Data yang dikumpulkan dianalisis dan disajikan dalam bentuk Tabel. 1 untuk mengidentifikasi tantangan utama dalam pengembangan biofisika di bidang medis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini mencakup 16 artikel terpilih yang diperoleh melalui proses studi literatur. Tabel berikut ini menyajikan ringkasan dari artikel-artikel tersebut, yang mencakup judul, author, tahun, hasil, dan tantangan penelitian pada artikel.

Tabel 1. Topik Penelitian

Judul Artikel	Nama Penulis	Tahun	Hasil	Tantangan
<i>Biophysical Phenotype Mixtures Reveal Advantages For Tumor Muscle Invasion In Vivo</i>	Kendra D. Marr., dkk [1]	2023	Sifat khas fenotip biofisik dan kemampuan ECIS dapat digunakan untuk memblokir penyebaran kanker dengan strategi nonsitotoksik, sehingga membantu kontrol tumor lokal dan menghindari kompleksitas kontrol tumor sistemik.	Keterbatasan alat pendeteksi berpresisi tinggi serta kebutuhan validasi in vivo dalam skala yang lebih luas.
<i>Clinical Biophysics And Bioinformatics Approaches In Determination And Meeting CBRN Safety Criterion In Nursing Clinical Applications And Services</i>	Hakan Yalcin, Irem, dan Semire [2]	2024	Peran teknologi informasi dalam meningkatkan keselamatan dan perawatan pasien dalam kasus bahaya CBRN (kimia, biologi, radiologi, dan nuklir). Teknologi informasi dapat membantu perawat dan praktisi kesehatan dalam mengakses informasi yang dibutuhkan dengan cepat, meningkatkan prosedur darurat, dan mengurangi kesalahan.	Keterbatasan tenaga profesional dalam penguasaan teknologi digital dan resistensi terhadap adopsi sistem baru.
<i>Bioinformatics: Challenges in Integrating Biological Information</i>	Arif Sardi [3]	2022	Bioinformatika memiliki potensi besar, tetapi tantangannya adalah mengembangkan alat untuk menjelaskan fungsi dan interaksi produk gen dalam sel, yang memerlukan integrasi pengetahuan biologis dan alat matematika/statistik yang kompleks.	Kompleksitas integrasi data biologis multiskala dan kebutuhan pengembangan alat analitik yang lebih adaptif.
<i>Fostering Discoveries In The Era Of Exascale Computing: How The Next Generation Of</i>	Marcelo C.R. dan Rafael C. [4]	2023	Perangkat lunak dan keras khusus membantu memahami data eksperimen dan mengembangkan model baru. Komputasi petaskala memungkinkan simulasi	Biaya implementasi infrastruktur komputasi tinggi dan kebutuhan

<i>Supercomputers Empowers Computational And Experimental Biophysics Alike</i>			besar-besaran, menghubungkan eksperimen virtual dan laboratorium, serta meningkatkan akses penelitian.	sumber daya komputasi besar.
Studi Literatur : Peran Fisika Dalam Teknologi Medis	Danu, Dhiah Ayu., dkk [5]	2024	Fisika memiliki banyak aplikasi dalam bidang medis, seperti pencitraan medis, radioterapi, pengembangan alat medis, dan biomekanika. Ilmu fisika menjadi dasar inovasi yang meningkatkan kualitas perawatan medis.	Kesenjangan antara inovasi teknologi dan standarisasi regulasi antar fasilitas kesehatan.
<i>Biophysical and Biochemical Cues of Biomaterials Guide Mesenchymal Stem Cell Behaviors</i>	Jianjun Li., dkk [6]	2021	Sel punca mesenkimal (MSC) memiliki potensi besar dalam pengobatan regeneratif dan terapi sel. Isyarat biofisik dan biokimia dari biomaterial dapat mengatur perilaku MSC, seperti migrasi, proliferasi, dan diferensiasi. Mengintegrasikan isyarat-isyarat ini dalam biomaterial dapat membantu mengatur MSC secara fungsional untuk berbagai aplikasi.	Tantangan biokompatibilitas, variasi respons biologis, dan biaya produksi biomaterial.
Translational Gaps And Opportunities For Medical Wearables In Digital Health	Joohee Kim., dkk [7]	2022	Kemajuan teknologi biosensor, pembelajaran mesin, dan kesadaran akan pemantauan pasien jarak jauh telah mempercepat dampak kesehatan digital. Perangkat yang dapat dikenakan tingkat medis akan memainkan peran penting dalam pengobatan dengan menyediakan pengukuran data fisiologis yang berkelanjutan dan hemat biaya.	Privasi data pengguna dan kesenjangan akses teknologi dalam implementasi klinis.
<i>Recent Progress And Applications Of Gold Nano Technology In Medical Biophysics Using Artificial Intelligence And Mathematical Modeling</i>	Julia A Moore dan James C L Chow [8]	2021	Penerapan AI dan pemodelan matematika dalam nanoteknologi emas dapat meningkatkan studi terkait teknologi skala nano, terutama dalam terapi kanker presisi dan pencitraan diagnostik. Ini dapat memperluas pengetahuan dan pertumbuhan penelitian	Resistensi imun terhadap nanopartikel dan keterbatasan uji keamanan jangka panjang.

Kajian Biofisika FRRS untuk Mengurangi Nyeri Kelelahan pada Kaki dengan Stimulasi Listrik dan Magnet	Cahya Primasari., dkk [9]	2024	nanoteknologi emas di masa depan. <i>Foot Reflection Relaxation Stimulator</i> (FRRS) adalah terapi refleksi kaki yang menggunakan stimulasi listrik dan magnetik untuk mengurangi nyeri dan kelelahan. FRRS merangsang titik refleksi di kaki dengan prinsip fisika medan magnet dan gaya Lorentz untuk meningkatkan sirkulasi darah dan merelaksasi otot.	Keterbatasan studi klinis berskala besar dan evaluasi efek jangka panjang.
Tanggung Jawab Hukum Petugas Fisikawan Medis Terhadap Kualitas Mutu Pada Izin Operasional Radiologi Di Rumah Sakit Bhayangkara Banda Aceh	Yohny Anwar., dkk [10]	2023	Kemajuan teknologi biosensor dan pembelajaran mesin mempercepat dampak kesehatan digital. Perangkat yang dapat dikenakan membantu memantau pasien dengan pengukuran data fisiologis yang berkelanjutan dan hemat biaya.	Harmonisasi regulasi dan pengawasan mutu layanan radiologi.
<i>Boosting Cholesterol Efflux from Foam Cells by Sequential Administration of rHDL to Deliver MicroRNA and to Remove Cholesterol in a Triple-Cell 2D Atherosclerosis Model</i>	Shifa Jebari., dkk [11]	2022	Strategi dua tahap dengan pemberian rHDL yang membawa antagomiR-33a dan DPPC-rHDL secara berurutan secara signifikan meningkatkan pengeluaran kolesterol dari foam cell. Teknik ini berpotensi besar sebagai terapi aterosklerosis karena meningkatkan ekspresi transporter ABCA1. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan prognosis penyakit kardiovaskular.	Tantangan translasi dari model in vitro menuju uji klinis manusia.
<i>Integrated Biophysical Modeling and Image Analysis: Application to Neuro-Oncology</i>	Andreas Mang., dkk [12]	2020	Tumor sistem saraf pusat (SSP) memiliki karakteristik yang sangat heterogen, sehingga pemodelan biofisik dan radiomik digunakan untuk mengkarakterisasi tumor dengan lebih baik. Analisis integratif menggunakan pencitraan resonansi magnetik (MRI)	Heterogenitas data pencitraan serta keterbatasan interpretasi spasial-temporal dalam aplikasi klinis.

<p><i>Large Language Models for Wearable Sensor-Based Human Activity Recognition, Health Monitoring, and Behavioral Modeling: A Survey of Early Trends, Datasets, and Challenges</i></p>	<p>Emilio Ferrara[13]</p>	<p>2024</p>	<p>membantu mengidentifikasi pola invasi dan proliferasi tumor, yang dapat meningkatkan deteksi dan pemodelan diagnostik tumor SSP. <i>Large Language Models/LLM</i> (seperti GPT-4, LLaMA) digunakan untuk menganalisis data sensor wearable. Hasil menunjukkan bahwa LLM dapat memahami dan memprediksi pola aktivitas dan kesehatan pengguna secara efektif (IMU, PPG, ECG). Namun, terdapat tantangan mencakup kualitas data, interpretabilitas model, dan isu privasi.</p>	<p>Interpretabilitas model dan keamanan data dalam sistem berbasis AI.</p>
<p>The State Of Quantum Computing Applications In Health And Medicine</p>	<p>Frederik F. Flöther[14]</p>	<p>2023</p>	<p>Komputasi kuantum mulai diterapkan dalam bidang kedokteran dan kesehatan, dengan fokus pada genomik, penelitian klinis, diagnostik, dan perawatan. <i>Quantum Machine Learning (QML)</i> menunjukkan performa kompetitif dalam diagnosis berbasis citra medis, prediksi efektivitas pengobatan, dan desain obat. Namun, masih ada tantangan teknis dan etika yang perlu diatasi.</p>	<p>Keterbatasan perangkat keras kuantum serta isu privasi data dalam aplikasi klinis.</p>
<p>Pemanfaatan Kecerdasan Buatan (AI) Pada MRI</p>	<p>Wahtyu Nur, Wardhana Yossi Wisnu, Indrati Rini [15]</p>	<p>2024</p>	<p>Kecerdasan buatan (AI) dan deep learning dapat mempercepat proses akuisisi MRI tanpa mengorbankan kualitas gambar, memungkinkan diagnosis yang lebih cepat dan efisien. AI juga berpotensi mengubah paradigma pencitraan medis dengan memungkinkan diagnosis yang lebih sensitif dan perawatan yang lebih personal.</p>	<p>Risiko bias algoritma dan kebutuhan regulasi ketat dalam implementasi klinis.</p>
<p><i>Biophysical Insights Into OR2T7:</i></p>	<p>Amanda., dkk [16]</p>	<p>2022</p>	<p>Glioblastoma multiforme (GBM) adalah kanker otak agresif dengan harapan</p>	<p>Kebutuhan validasi molekuler lanjutan dan konfirmasi</p>

<i>Investigation Of A Potential Prognostic Marker For Glioblastoma</i>	hidup rendah. Penelitian ini menemukan mutasi pada gen OR2T7 yang terkait dengan perkembangan GBM. Mutasi ini dapat memengaruhi jalur penekanan tumor dan menjadi target terapi potensial.	klinis terhadap efektivitas biomarker.
--	--	--

Hasil studi literatur pada Tabel 1 menunjukkan bahwa, integrasi bioteknologi dan biofisika di berbagai bidang aplikasi kesehatan berkontribusi dalam meningkatkan diagnosis, terapi, serta efisiensi layanan kesehatan modern. Pembahasan selanjutnya menguraikan kontribusi, aplikasi dan tantangan dari masing-masing pendekatan berdasarkan 16 studi ilmiah terkini.

Menurut penelitian Marr dkk., [1] dan Amanda dkk., [16], pendekatan biofisika dalam terapi kanker menunjukkan efektivitas melalui Electrical Cell-substrate Impedance Sensing (ECIS) dan identifikasi biomarker molekuler seperti OR2T7. ECIS memungkinkan pemantauan real-time fenotip sel kanker tanpa pendekatan sitotoksik, sedangkan pendekatan molekuler membantu diagnosis presisi. Namun, tantangan yang dihadapi adalah keterbatasan alat pendeteksi berpresisi tinggi serta kebutuhan validasi *in vivo* yang lebih luas.

Penggunaan bioinformatika dalam manajemen klinis dan situasi bencana ditunjukkan oleh Yalcin dkk., [2] melalui integrasi GIS dan pelatihan AR untuk mitigasi CBRN, serta oleh Sardi [3] dalam pengembangan alat analisis interaksi molekuler. Studi ini menunjukkan perbedaan konteks penerapan namun menghadapi kesamaan tantangan, yaitu keterbatasan tenaga profesional dalam penguasaan teknologi digital dan resistensi terhadap adopsi sistem baru.

Marcelo dkk., [4] dan Flöther [14] membahas pemanfaatan superkomputer dan komputasi kuantum dalam biofisika. Marcelo menekankan pada simulasi petaskala, sementara Flöther mengarah pada prediksi klinis menggunakan quantum machine learning (QML). Meskipun teknologi ini menjanjikan kecepatan dan akurasi tinggi, biaya implementasi dan isu privasi data menjadi hambatan utama dalam skala klinis.

Dalam pengembangan dan pengawasan alat medis, Danu dkk., [5] memfokuskan pada peran fisika medis dalam MRI dan radioterapi, sedangkan Yohny Anwar dkk., [10] mengulas aspek legal dan mutu layanan radiologi. Hasil studi menunjukkan kesenjangan antara inovasi teknologi dan standardisasi regulasi antar fasilitas pelayanan yang belum merata.

Menurut Jianjun Li dkk., [6], isyarat biofisik dari biomaterial mampu mengarahkan diferensiasi sel punca, membuka peluang terapi regeneratif. Namun, kompatibilitas biomaterial, variasi respons tubuh, dan biaya produksi masih menjadi tantangan besar dalam pengembangan klinis.

Kim dkk., [7] dan Ferrara [13] membahas wearable technology sebagai alat pemantauan dan prediksi kesehatan berbasis AI. Ferrara menunjukkan keunggulan integrasi LLM dalam analisis data aktivitas manusia. Kendati demikian, privasi data dan kesetaraan akses masih menjadi isu sentral dalam adopsi teknologi ini secara luas.

Nanoteknologi dan AI juga memiliki peran penting, seperti ditunjukkan oleh Moore dan Chow [8] serta Jebari dkk., [11], yang menggabungkan nanopartikel dan model matematis dalam terapi kanker dan aterosklerosis. Hambatan utama yang dicatat adalah resistensi imun terhadap nanopartikel dan keterbatasan uji keamanan jangka panjang.

Teknologi elektromagnetik untuk rehabilitasi diperkenalkan oleh Cahya Primasari dkk., [9] melalui FRRS berbasis prinsip gaya Lorentz. Meskipun menjanjikan sebagai terapi non-farmakologis, studi berskala besar dan evaluasi efek jangka panjang masih diperlukan.

Mang dkk., [12] menunjukkan bahwa integrasi radiomik dan pemodelan matematis dalam neuro-onkologi berperan penting dalam deteksi dini dan perencanaan terapi. Namun,

heterogenitas data pencitraan dan keterbatasan dalam interpretasi spasial-temporal menjadi hambatan dalam penerapan klinis.

Terakhir, Wahtyu Nur dkk., [15] mengkaji penggunaan AI dan deep learning dalam pencitraan MRI yang mampu mempercepat akuisisi gambar serta meningkatkan akurasi diagnosis. Walaupun prospektif, penggunaan AI ini menuntut regulasi ketat untuk menghindari bias data dan kesalahan diagnostik otomatis.

Oleh karena itu, hasil studi literatur menunjukkan bahwa tantangan utama biofisika di masa depan dalam kedokteran dan teknologi kesehatan meliputi integrasi big data klinis dan biologis, termasuk data genomik, proteomik, dan pencitraan medis, yang memerlukan sistem komputasi biofisika untuk memproses, menyimpan, dan menganalisis informasi dalam jumlah besar secara efisien. Selain itu, pengembangan teknologi diagnostik non-invasif seperti sensor biomagnetik dan *wearable devices* masih terkendala pada aspek sensitivitas, spesifisitas, dan keandalannya dalam praktik klinis. Keandalan pemodelan dan simulasi biomedis juga menjadi sorotan, karena akurasi model matematis sangat bergantung pada kompleksitas parameter biologis dan kapasitas komputasi yang tersedia. Di samping itu, aspek etika, hukum, dan akses terhadap teknologi turut menjadi isu kritis, terutama dalam penerapan kecerdasan buatan, nanoteknologi, dan *quantum machine learning* yang menimbulkan kekhawatiran terkait privasi data, regulasi yang belum memadai, serta kesenjangan akses antara negara maju dan berkembang.

KESIMPULAN

Biofisika memiliki peran vital dalam mendorong inovasi di bidang kedokteran dan teknologi kesehatan. Namun, di masa depan, bidang ini dihadapkan pada tantangan besar yang menuntut kolaborasi multidisipliner, pengembangan metode analitik yang canggih, serta perhatian serius terhadap aspek etika dan regulasi. Menghadapi tantangan ini secara strategis akan membuka peluang baru untuk meningkatkan kualitas layanan kesehatan global. Penggunaan teknologi AI dalam bidang kesehatan memiliki potensi besar untuk secara signifikan meningkatkan efektivitas yang baik. Dengan teknologi ini, pengobatan dapat dikirimkan secara tepat sasaran ke sel kanker tanpa merusak jaringan sehat di sekitarnya. Hal ini memungkinkan pengobatan yang lebih efektif dan mengurangi efek sampingan, meningkatkan kualitas hidup pasien dan mempercepat proses penyembuhan. Selain itu, teknologi AI memiliki potensi untuk mengubah paradigma pengobatan kanker di masa depan dengan mengintegrasikan teknologi ini dalam sistem kesehatan secara lebih luas, memungkinkan pengembangan metode pengobatan yang lebih personal dan terarah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. D. Marr et al., "Biophysical phenotype mixtures reveal advantages for tumor muscle invasion in vivo," *Biophys. J.*, vol. 122, pp. 4194–4206, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.bpj.2023.09.016.
- [2] H. Yalcin, Irem, and Semire, "Clinical biophysics and bioinformatics approaches in determination and meeting CBRN safety criterion in nursing clinical applications and services," *Biophys. J.*, vol. 123, no. 3, Suppl. 1, p. 559a, 2024, doi: 10.1016/j.bpj.2023.11.3383.
- [3] A. Sardi, "Bioinformatics: Challenges in integrating biological information," *J. Biol. Trop.*, vol. 22, no. 4, pp. 1297–1301, 2022, doi: 10.29303/jbt.v22i4.4346.
- [4] M. C. R. Marcelino and R. C. Rafael, "Fostering discoveries in the era of exascale computing: How the next generation of supercomputers empowers computational and experimental biophysics alike," *Biophys. J.*, vol. 122, pp. 2833–2840, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.bpj.2023.01.042.

- [5] D. D. Ayu et al., "Studi literatur: Peran fisika dalam teknologi medis," *Sindoro Cendekia Pendidikan*, vol. 9, no. 3, 2024, doi: 10.9644/sindoro.v3i9.252.
- [6] J. Li et al., "Biophysical and biochemical cues of biomaterials guide mesenchymal stem cell behaviors," *Front. Cell Dev. Biol.*, vol. 9, Mar. 2021, doi: 10.3389/fcell.2021.640388.
- [7] J. Kim et al., "Translational gaps and opportunities for medical wearables in digital health," *Sci. Transl. Med.*, vol. 14, eabn6036, 2022, doi: 10.1126/scitranslmed.abn6036.
- [8] J. A. Moore and J. C. L. Chow, "Recent progress and applications of gold nanotechnology in medical biophysics using artificial intelligence and mathematical modeling," *Nano Express*, vol. 2, 022001, 2021, doi: 10.1088/2632-959X/abddd3.
- [9] C. Primasari et al., "Kajian biofisika FRRS untuk mengurangi nyeri kelelahan pada kaki dengan stimulasi listrik dan magnet," *J. Fis. Unand (JFU)*, vol. 13, no. 6, pp. 762–770, Nov. 2024, doi: 10.25077/jfu.13.6.762-770.2024.
- [10] Y. Anwar et al., "Tanggung jawab hukum petugas fisikawan medis terhadap kualitas mutu pada izin operasional radiologi di Rumah Sakit Bhayangkara Banda Aceh," *SIBATIK J.*, vol. 2, no. 8, 2023, doi: 10.54443/sibatik.v2i8.1196.
- [11] S. Jebari et al., "Boosting cholesterol efflux from foam cells by sequential administration of rHDL to deliver microRNA and to remove cholesterol in a triple-cell 2D atherosclerosis model," *Small*, vol. 18, 2105915, 2022, doi: 10.1002/sml.202105915.
- [12] A. Mang et al., "Integrated biophysical modeling and image analysis: Application to neuro-oncology," *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 22, pp. 309–341, 2020, doi: 10.1146/annurev-bioeng-062117-121105.
- [13] E. Ferrara, "Large language models for wearable sensor-based human activity recognition, health monitoring, and behavioral modeling: A survey of early trends, datasets, and challenges," *Sensors*, vol. 24, 5045, 2024, doi: 10.3390/s24155045.
- [14] F. F. Flöther, "The state of quantum computing applications in health and medicine," *Quantum*, 2023, doi: 10.1017/qut.2023.4.
- [15] W. Nur, Y. W. Wardhana, and R. Indrati, "Pemanfaatan kecerdasan buatan (AI) pada MRI," *The Journal Publishing Poltekkes Kemenkes Semarang*, 2024, ISSN: 2798-5962.
- [16] A. Amanda et al., "Biophysical insights into OR2T7: Investigation of a potential prognostic marker for glioblastoma," *Biophys. J.*, vol. 121, pp. 3706–3718, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.bpj.2022.05.009.
- [17] J. T. Manik, W. Soetanto, M. Hanny, and T. Pandiangan, "Sosialisasi pemanfaatan fisika radiasi dalam bidang kesehatan kepada siswa kelas X di SMA Pramita Tangerang," *J. Community Serv.: Sustain. Empower.*, pp. 1–6, 2022.
- [18] S. Tovar-Arriaga, G. I. Pérez-Soto, K. A. Camarillo-Gómez, M. Aviles, and J. Rodríguez-Reséndiz, "Perspectives, challenges, and the future of biomedical technology and artificial intelligence," *Technologies*, vol. 12, no. 11, p. 212, 2024.

- [19] Zafar F., et al., "AI in Radiation Oncology: A Comprehensive Review of Current Applications and Future Directions," *Cureus*, vol. 17, 2025, doi: 10.7759/cureus.92964.
- [20] Shan G., et al., "A Review of Artificial Intelligence Application for Radiotherapy," *Dose-Response*, vol. 22, 2024, doi: 10.1177/15593258241263687.