



Deni Candra Ramadhan, S.Kep., Ners., M.Ken
dr. Aziz Nur Arraga
apt. Salsabiela Milenia Putri
Nur Aliya Arsyad, S.ST., M.Keb.
Permana Juliansyah, S.Farm, Apt
Mohamad Rusdiansyah, S.Kep., Ns., M.N.Sc.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM INOVASI PELAYANAN KESEHATAN

**Melda Emilyya, SKM.,MKM.
Dewi Junita Lamtumiari, SKM, S.Keb, M.Kes
Zanedta Novenathania Putri Nugraha, S.Ked.
Anindya Salsabila Dwinanda, S.Tr.Kes
Ida Mahfiroh, SKM.
Deni Candra Ramadhan, S.Kep., Ners., M.Kep
dr. Azmi Aziz Nur Arraga
apt. Salsabiela Milenia Putri
Nur Aliya Arsyad, S.ST., M.Keb.
Permana Juliansyah, S.Farm, Apt
Mohamad Rusdiansyah, S.Kep., Ns., M.N.Sc.**



GET PRESS INDONESIA

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE
DALAM INOVASI PELAYANAN KESEHATAN**

Penulis :

Melda Emily, SKM.,MKM.
Dewi Junita Lamtumi, SKM, S.Keb, M.Kes
Zanedta Novenathania Putri Nugraha, S.Ked.
Anindya Salsabila Dwinanda, S.Tr.Kes
Ida Mahfiroh, SKM.
Deni Candra Ramadhan, S.Kep., Ners., M.Kep
dr. Azmi Aziz Nur Arraga
apt. Salsabiela Milenia Putri
Nur Aliya Arsyad, S.ST., M.Keb.
Permana Juliansyah, S.Farm, Apt
Mohamad Rusdiansyah, S.Kep., Ns., M.N.Sc.

ISBN : 978-634-255-632-0

Editor : Melda Emily, SKM.,MKM.
Desain Sampul dan Tata Letak : Mila Sari, M.Si.

Penerbit : GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tengah, Padang, Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya, buku berjudul *Artificial Intelligence dalam Inovasi Pelayanan Kesehatan* ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai upaya untuk menghadirkan referensi yang komprehensif, ilmiah, sekaligus aplikatif mengenai salah satu disrupsi teknologi terbesar di abad ini, yaitu integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dalam dunia kesehatan.

Perkembangan teknologi digital telah membawa umat manusia ke ambang era baru, di mana kecerdasan buatan bukan lagi sekadar wacana masa depan, melainkan instrumen nyata yang mendisrupsi lanskap pelayanan medis global. Kehadiran buku ini dirancang secara sistematis untuk menjembatani teori-teori dasar AI, seperti *Machine Learning*, *Deep Learning*, dan *Natural Language Processing*, dengan implementasi praktisnya di lapangan. Pembaca akan diajak menyelami bagaimana AI mentransformasi administrasi rumah sakit, meningkatkan akurasi laboratorium diagnostik dan molekuler, mengoptimalkan surveilans kesehatan masyarakat, hingga merevolusi bidang keperawatan, *telemedicine*, serta nutrisi klinis.

Namun, di balik optimisme efisiensi dan terwujudnya *precision medicine*, adopsi AI memicu berbagai diskursus krusial. Oleh karena itu, buku ini juga memberikan perhatian mendalam pada aspek etika, mitigasi bias algoritma, perlindungan privasi data pasien, serta tantangan nyata infrastruktur dan regulasi yang dihadapi dalam konteks sistem kesehatan di Indonesia. Melalui pendekatan yang multidisipliner, buku ini diharapkan dapat memberikan arah strategis bagi pemanfaatan teknologi yang aman, adil, dan humanis.

Penulis menyadari bahwa selesainya buku ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Rasa terima kasih yang mendalam penulis sampaikan kepada rekan-rekan sejawat, para akademisi, praktisi kesehatan, serta penerbit yang telah membantu dalam proses penyusunan hingga buku ini siap diterbitkan.

Buku ini dihadirkan untuk para dosen, mahasiswa, praktisi klinis, pengambil kebijakan, serta siapa saja yang memiliki ketertarikan terhadap masa depan kesehatan digital. Penulis menyadari bahwa ilmu pengetahuan dan teknologi terus berkembang secara dinamis, sehingga kritik dan saran yang membangun dari para pembaca sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan wawasan baru, memantik riset-riset inovatif lanjutan, serta memberikan kontribusi positif bagi kemajuan dan transformasi sistem pelayanan kesehatan di Indonesia.

Padang, Maret 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR	vii
BAB 1 KONSEP DASAR ARTIFICIAL	
INTELLIGENCE DALAM KESEHATAN.....	1
1.1 Definisi Artificial Intelligence (AI)	1
1.2 Perkembangan Artificial Intelligence di Bidang Kesehatan.....	3
1.3 Jenis-jenis Artificial Intelligence di Kesehatan (<i>Machine Learning, Deep Learning, dan</i> <i>Natural Language Processing</i>)	5
1.4 Peran Artificial Intelligence dalam Transformasi Sistem Kesehatan.....	10
DAFTAR PUSTAKA.....	13
BAB 2 ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM	
ADMINISTRASI DAN MANAJEMEN PELAYANAN	
KESEHATAN.....	15
2.1 Artificial Intelligence dalam Manajemen Rumah Sakit.....	15
2.2 Prediksi Kebutuhan Layanan Kesehatan.....	17
2.3 Sistem Antrean dan <i>Scheduling</i> Berbasis Artificial Intelligence.....	20
2.4 Artificial Intelligence dalam Pengelolaan Klaim dan <i>Fraud Detection</i>	23
2.5 Otomatisasi Administrasi Pelayanan Kesehatan.....	25
2.6 Penggunaan Artificial Intelligence untuk Efisiensi Biaya Pelayanan Kesehatan.....	28
DAFTAR PUSTAKA.....	32

BAB 3 TRANSFORMASI DIGITAL PELAYANAN	
KESEHATAN DI ERA <i>ARTIFICIAL INTELLIGENCE</i>.....	35
3.1 Pendahuluan	35
3.2 Digitalisasi Layanan Kesehatan.....	36
3.3 Rekam Medis Elektronik.....	36
3.4 <i>Smart Hospital</i>	41
3.5 Integrasi AI dalam Sistem Pelayanan Kesehatan.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	49
BAB 4 PERAN <i>ARTIFICIAL INTELLIGENCE</i> DALAM	
LABORATORIUM DIAGNOSTIK.....	51
4.1 Pendahuluan	51
4.2 Pemanfaatan Artificial Intelligence dalam Diagnostik Laboratorium.....	53
4.3 Pemanfaatan Artificial Intelligence dalam Diagnostik Molekuler	57
4.4 Analisis Akurasi, Efektivitas, dan Tantangan Validasi AI Diagnostik	61
4.5 Masa Depan Artificial Intelligence dalam Diagnosis Penyakit	66
DAFTAR PUSTAKA.....	73
BAB 5 PEMANFAATAN <i>ARTIFICIAL</i>	
<i>INTELLIGENCE</i> DALAM KESEHATAN	
MASYARAKAT	76
5.1 Pendahuluan	76
5.2 Surveilans Penyakit Berbasis AI	79
5.3 Prediksi Wabah dengan Kecerdasan Buatan	81
5.4 Analisis Big Data Kesehatan	83
5.5 AI dalam Program Promotif dan Preventif	85
DAFTAR PUSTAKA.....	89
BAB 6 <i>ARTIFICIAL INTELLIGENCE</i> DALAM	
PELAYANAN KEPERAWATAN DAN KEDOKTERAN	91
6.1 Pendahuluan	91

6.2 Robotik dalam Pelayanan Medis	92
6.3 AI-Assistant Tenaga Kesehatan	94
6.4 Monitoring Pasien Berbasis Artificial Intelligence	96
6.5 Efisiensi Pelayanan Klinis	100
DAFTAR PUSTAKA	106
BAB 7 TELEMEDICINE DAN PELAYANAN KESEHATAN BERBASIS ARTIFICIAL INTELLIGENCE	
7.1 Pendahuluan	108
7.2 Perkembangan Telemedicine	109
7.3 Chatbot Kesehatan	110
7.4 Konsultasi Virtual berbasis AI	111
7.5 Peluang dan Hambatan Implementasi	113
DAFTAR PUSTAKA	117
BAB 8 ETIKA, PRIVASI DATA, DAN KEAMANAN PENGGUNAAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DI BIDANG KESEHATAN	
8.1 Pendahuluan	122
8.2 Kerahasiaan Data Pasien	124
8.3 Ancaman Bias Algoritma	126
8.4 Etika Penggunaan AI	131
8.5 Regulasi dan Perlindungan Data: Tanggung Jawab Lintas Sektor	133
DAFTAR PUSTAKA	135
BAB 9 TANTANGAN IMPLEMENTASI ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM SISTEM PELAYANAN KESEHATAN DI INDONESIA	
9.1 Pendahuluan	137
9.2 Konsep Implementasi AI dalam Pelayanan Kesehatan Indonesia	138
9.3 Tantangan Implementasi AI	140
9.4 Peluang dan Strategi Solusi	147

9.5 Arah Masa Depan AI Kesehatan di Indonesia.....	150
DAFTAR PUSTAKA.....	152
BAB 10 ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM GIZI DAN NUTRISI KLINIS SERTA KESEHATAN	
MASYARAKAT	154
10.1 Revolusi Nutrisi di Era Kecerdasan Buatan	154
10.2 AI dalam Penilaian Gizi.....	158
10.3 Peran Machine Learning dalam Prediksi Risiko Gizi dan Penyakit Metabolik.....	161
10.4 AI dalam Perencanaan Diet Klinis Otomatis: Bukti, Potensi, dan Tantangan.....	163
10.5 Integrasi <i>Wearables Devices</i> dan Big Data: Dari Monitoring <i>Real-Time</i> Individu hingga Surveilans Kesehatan Masyarakat	168
10.6 Implementasi Praktis di Indonesia.....	171
DAFTAR PUSTAKA.....	175
BAB 11 MASA DEPAN <i>ARTIFICIAL INTELLIGENCE</i> DALAM PELAYANAN KESEHATAN	184
11.1 Pendahuluan.....	184
11.2 Tren Teknologi Kesehatan Masa Depan	186
11.3 Precision Medicine Berbasis AI.....	190
11.4 AI dan <i>Sustainability</i> Sistem Kesehatan.....	195
11.5 Peluang Riset dan Pengembangan AI Kesehatan.....	199
DAFTAR PUSTAKA.....	206

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Penerapan <i>machine learning</i> dalam bidang Kesehatan.....	6
Gambar 2.	Penerapan <i>deep learning</i> pada analisis citra medis.....	8
Gambar 3.	Implementasi <i>Natural Language Processing</i> (NLP) dalam kesehatan.....	9
Gambar 4.	Alur Sistem Antrean.....	21
Gambar 5.	Ilustrasi <i>Scheduling</i> Berbasis Artificial Intelligence.....	23
Gambar 6.	Keterlibatan Artificial Intelligence dalam Pengolahan Big Data di Bidang Medis.....	52
Gambar 7.	Empat Tantangan Implementasi AI Kesehatan di Indonesia	138
Gambar 8.	Ekosistem AI dalam Pelayanan Kesehatan Indonesia	140
Gambar 9.	Dimensi Kesenjangan Digital dalam Layanan Kesehatan	147
Gambar 10.	Roadmap Implementasi AI Kesehatan Indonesia 2025–2045	151
Gambar 11.	UI/X Aplikasi dan AI Wearable devices untuk analisis gizi (A) FRANI App https://cdn.nutrition.org/ , (B) Keenoea AI Diary https://keenoea.com/ , (C) Kacamata AIM	157
Gambar 12.	Aplikasi MeThreeSixty.....	160
Gambar 13.	Ilustrasi peran AI dalam membangun pelayanan kesehatan masa depan yang prediktif, presisi, berkelanjutan, dan berpusat pada manusia	185

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Alur Pemanfaatan AI dalam Kesehatan Masyarakat.....	78
Tabel 2. Ringkasan Tantangan, Dampak, dan Strategi Solusi	148
Tabel 3. Perbandingan Metode Penilaian Gizi: Metode Tradisional vs Berbasis AI.....	155
Tabel 4. Matriks Bukti Ilmiah dan Validitas Perencanaan Diet AI.....	167

BAB 1

KONSEP DASAR ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM KESEHATAN

1.1 Definisi Artificial Intelligence (AI)

Artificial Intelligence (AI) atau kecerdasan buatan menurut World Health Organization (WHO), merupakan cabang ilmu komputer yang berfokus pada pengembangan sistem atau mesin yang mampu meniru kemampuan intelektual manusia, seperti belajar, memahami pola, melakukan penalaran, mengambil keputusan, dan menyelesaikan masalah secara otomatis (WHO, 2024a). Perkembangan AI semakin pesat dan telah diterapkan di berbagai bidang, termasuk pelayanan kesehatan, pendidikan, industri, hingga pemerintahan. Istilah Artificial Intelligence pertama kali diperkenalkan oleh John McCarthy pada tahun 1955 yang mendefinisikan AI sebagai *“the science and engineering of making intelligent machines”* atau ilmu dan teknik untuk membuat mesin cerdas. AI merupakan kemampuan algoritma yang terintegrasi dalam sistem dan perangkat untuk belajar dari data sehingga dapat melakukan tugas otomatis tanpa perlu diprogram secara eksplisit pada setiap tahap oleh manusia. AI modern mampu melakukan tugas-tugas yang biasanya membutuhkan kecerdasan manusia, seperti memahami bahasa, mengenali gambar, belajar dari data, melakukan penalaran, dan mengambil keputusan (WHO, 2024b). Definisi ini menekankan bahwa AI bertujuan menciptakan sistem komputer yang dapat melakukan fungsi-fungsi yang menyerupai kecerdasan manusia.

Dalam bidang kesehatan, AI didefinisikan sebagai teknologi komputasi yang menggunakan metode kecerdasan buatan untuk mendukung pelayanan kesehatan kepada pasien, tenaga kesehatan, maupun institusi pelayanan kesehatan. Teknologi tersebut meliputi perangkat lunak, algoritma, sistem pendukung keputusan klinis, hingga perangkat medis berbasis AI. Selain itu, WHO menjelaskan bahwa AI dalam pelayanan kesehatan lebih tepat dipandang sebagai teknologi yang dirancang untuk mendukung dan memperkuat pengambilan keputusan tenaga kesehatan, bukan menggantikan manusia sepenuhnya (WHO, 2021). Pendekatan ini menekankan kolaborasi antara manusia dan teknologi dalam meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan.

Menurut Stanford Human-Centered Artificial Intelligence (HAI), istilah Artificial Intelligence pertama kali diperkenalkan oleh John McCarthy pada tahun 1955 yang mendefinisikan AI sebagai *“the science and engineering of making intelligent machines”* atau ilmu dan teknik untuk membuat mesin cerdas (Stanford University, 2016). Definisi ini menekankan bahwa AI bertujuan menciptakan sistem komputer yang dapat melakukan fungsi-fungsi yang menyerupai kecerdasan manusia.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) mendefinisikan AI sebagai sistem berbasis mesin yang mampu menghasilkan prediksi, rekomendasi, keputusan, maupun konten berdasarkan data yang diterima untuk mencapai tujuan tertentu. Dalam konteks pelayanan kesehatan modern, AI memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi pelayanan, mempercepat diagnosis penyakit, membantu analisis data kesehatan, mendukung pengambilan keputusan klinis, serta meningkatkan kualitas hidup pasien melalui pelayanan kesehatan yang lebih personal dan prediktif (OECD, 2026). OECD menekankan bahwa sistem AI memiliki tingkat otonomi dan kemampuan adaptasi yang berbeda setelah diterapkan.

Definisi lain dikemukakan oleh Nils J. Nilsson dalam laporan Stanford AI100 yang menyatakan bahwa AI merupakan aktivitas yang bertujuan membuat mesin menjadi cerdas, sedangkan kecerdasan adalah kemampuan suatu entitas untuk berfungsi secara tepat dan memiliki antisipasi terhadap lingkungannya (Stanford University, 2016). Definisi ini memperlihatkan bahwa AI tidak hanya berkaitan dengan kemampuan menghitung, tetapi juga kemampuan memahami situasi dan merespons secara adaptif.

Dalam bidang Kesehatan National Center for Biotechnology Information (NCBI), AI didefinisikan sebagai teknologi komputasi yang menggunakan metode kecerdasan buatan untuk mendukung pelayanan kesehatan kepada pasien, tenaga kesehatan, maupun institusi pelayanan kesehatan (NCBI, 2025). Teknologi tersebut meliputi perangkat lunak, algoritma, sistem pendukung keputusan klinis, hingga perangkat medis berbasis AI.

1.2 Perkembangan Artificial Intelligence di Bidang Kesehatan

Perkembangan Artificial Intelligence (AI) di bidang kesehatan mengalami kemajuan yang sangat pesat dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan meningkatnya ketersediaan data kesehatan digital, perkembangan komputasi, serta kemajuan algoritma *machine learning* dan *deep learning*. Transformasi ini mengubah cara pelayanan kesehatan dari yang sebelumnya bersifat manual dan reaktif menjadi lebih prediktif, presisi, dan berbasis data (WHO, 2021).

Pada tahap awal (sekitar tahun 1960–1970-an), penerapan AI dalam kesehatan masih bersifat eksperimen dengan fokus pada sistem berbasis aturan (*rule-based systems*). Salah satu contoh awal adalah pengembangan sistem pakar (*expert systems*) seperti MYCIN yang digunakan untuk membantu diagnosis infeksi bakteri dan rekomendasi terapi antibiotik. Walaupun terbatas, fase ini menjadi fondasi penting bagi

perkembangan sistem pendukung keputusan klinis di masa depan (Shortliffe, 1976).

Memasuki era 1980–1990-an, perkembangan AI mulai diarahkan pada *clinical decision support systems* (CDSS) yang membantu tenaga kesehatan dalam pengambilan keputusan klinis berbasis data pasien. Sistem ini mulai diintegrasikan dengan rekam medis elektronik (*electronic health records*), meskipun masih terbatas pada rumah sakit dengan infrastruktur teknologi yang memadai (Coiera, 2003).

Perkembangan signifikan terjadi pada awal 2000-an ketika teknologi *machine learning* mulai banyak digunakan dalam analisis data medis. Algoritma seperti *support vector machine*, *random forest*, dan *neural networks* mulai diterapkan untuk klasifikasi penyakit, analisis citra medis, serta prediksi risiko kesehatan. Pada fase ini, AI mulai menunjukkan kemampuan untuk belajar dari data besar (*big data*) secara lebih efisien (Rajkomar, Dean and Kohane, 2019).

Sejak tahun 2010-an hingga saat ini, perkembangan AI di bidang kesehatan semakin pesat dengan hadirnya *deep learning* yang sangat efektif dalam pengolahan data tidak terstruktur, seperti gambar radiologi, hasil CT-scan, MRI, serta data genomik. Teknologi ini memungkinkan sistem AI mencapai akurasi yang mendekati bahkan dalam beberapa kasus melampaui tenaga medis manusia dalam tugas-tugas tertentu seperti deteksi kanker kulit, retinopati diabetik, dan pneumonia (Topol, 2019).

Selain itu, integrasi AI dengan *big data analytics*, *internet of medical things (IoMT)*, dan *cloud computing* telah mendorong lahirnya sistem kesehatan digital yang lebih canggih. Rumah sakit modern mulai mengadopsi *AI-powered hospital systems* untuk manajemen pasien, efisiensi operasional, hingga prediksi kebutuhan layanan kesehatan (OECD, 2023).

Pada masa pandemi COVID-19, penggunaan AI semakin meluas secara global. AI digunakan untuk mendeteksi pola penyebaran penyakit, memprediksi lonjakan kasus, mempercepat pengembangan vaksin, serta mendukung diagnosis

berbasis citra radiologi paru. Pandemi ini menjadi katalis penting yang mempercepat adopsi teknologi AI di berbagai sistem kesehatan dunia (WHO, 2021).

Saat ini, perkembangan AI bergerak menuju konsep *augmented intelligence*, yaitu AI yang berfungsi sebagai pendukung tenaga kesehatan dalam pengambilan keputusan, bukan pengganti manusia. Fokus utama saat ini adalah meningkatkan kolaborasi antara dokter dan sistem AI untuk meningkatkan akurasi diagnosis, efisiensi pelayanan, serta keselamatan pasien (OECD, 2023).

Ke depan, perkembangan AI di bidang kesehatan diprediksi akan mengarah pada *precision medicine*, yaitu pendekatan pengobatan yang disesuaikan dengan karakteristik genetik, lingkungan, dan gaya hidup individu. Selain itu, AI juga akan semakin terintegrasi dalam sistem kesehatan berbasis real-time monitoring melalui perangkat wearable dan sensor kesehatan (WHO, 2024).

1.3 Jenis-jenis Artificial Intelligence di Kesehatan (*Machine Learning, Deep Learning, dan Natural Language Processing*)

Artificial Intelligence (AI) dalam bidang kesehatan terdiri dari beberapa cabang utama yang saling berkaitan, yaitu *machine learning*, *deep learning*, dan *natural language processing* (NLP). Ketiga pendekatan ini memiliki peran penting dalam pengolahan data kesehatan yang kompleks, baik data terstruktur seperti rekam medis elektronik maupun data tidak terstruktur seperti catatan klinis, gambar radiologi, dan hasil laboratorium (Rajkomar *et al.*, 2019).

1.3.1 *Machine Learning* dalam Kesehatan

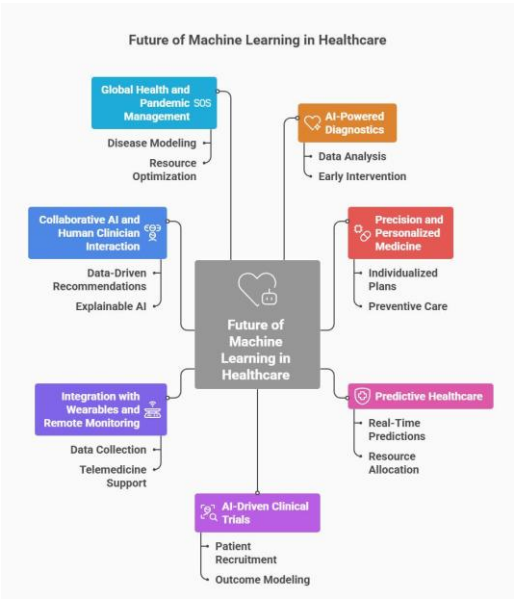
Machine learning (ML) merupakan cabang AI yang memungkinkan sistem komputer untuk belajar dari data dan meningkatkan performanya tanpa diprogram secara eksplisit.

Dalam konteks kesehatan, machine learning banyak digunakan untuk prediksi risiko penyakit, klasifikasi diagnosis, serta analisis data pasien berbasis rekam medis elektronik (Esteva *et al.*, 2017).

Algoritma machine learning seperti *random forest*, *support vector machine (SVM)*, dan *logistic regression* sering digunakan untuk memprediksi kondisi kesehatan seperti diabetes, penyakit jantung, dan risiko rawat inap. Keunggulan utama ML adalah kemampuannya dalam menemukan pola tersembunyi dalam data kesehatan yang sangat besar dan kompleks (Rajkomar *et al.*, 2019).

Selain itu, machine learning juga digunakan dalam sistem *clinical decision support system (CDSS)* untuk membantu tenaga kesehatan dalam menentukan diagnosis dan terapi berbasis data historis pasien (Topol, 2019).

Berikut contoh penerapan *machine learning* dalam bidang kesehatan untuk analisis data pasien, prediksi penyakit, pengambilan keputusan klinis, dan *personalized medicine*.



Gambar 1. Penerapan *machine learning* dalam bidang Kesehatan
Sumber: Xie *et al.*, 2024

1.3.2 Deep Learning dalam Kesehatan

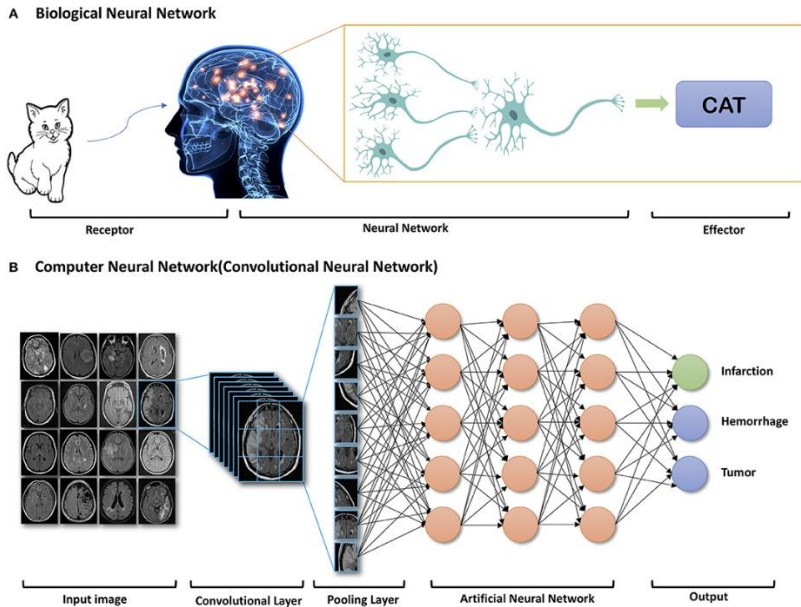
Deep learning (DL) merupakan sub-bidang dari machine learning yang menggunakan jaringan saraf tiruan (*artificial neural networks*) dengan banyak lapisan (*deep neural networks*) untuk memproses data yang lebih kompleks dan tidak terstruktur.

Dalam bidang kesehatan, deep learning sangat efektif digunakan untuk analisis citra medis seperti X-ray, CT-scan, MRI, dan histopatologi. Salah satu keunggulan utama deep learning adalah kemampuannya dalam melakukan ekstraksi fitur secara otomatis tanpa memerlukan rekayasa fitur manual (*manual feature engineering*) (Litjens *et al.*, 2017).

Contoh penerapan nyata deep learning adalah deteksi kanker kulit dari gambar dermatoskopi, deteksi retinopati diabetik dari gambar retina, serta identifikasi pneumonia dari hasil rontgen dada. Beberapa studi menunjukkan bahwa model deep learning dapat mencapai akurasi yang sebanding atau bahkan melampaui dokter spesialis dalam tugas tertentu (Esteva *et al.*, 2017).

Selain itu, deep learning juga digunakan dalam analisis genomik, prediksi struktur protein, serta pengembangan obat (*drug discovery*), yang mempercepat proses penelitian di bidang biomedis (Topol, 2019).

Berikut contoh gambar Penerapan *deep learning* pada analisis citra medis seperti MRI, CT-scan, deteksi tumor, klasifikasi paru-paru, dan diagnosis penyakit berbasis gambar radiologi (Zhu *et al.*, 2019).



Gambar 2. Penerapan *deep learning* pada analisis citra medis
 Sumber: Frontiers in Neurology

1.3.3 *Natural Language Processing (NLP)* dalam Kesehatan

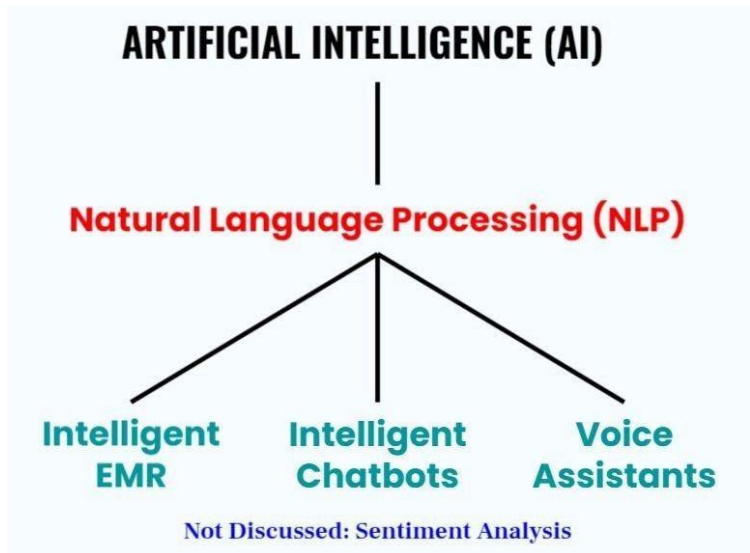
Natural Language Processing (NLP) merupakan cabang AI yang berfokus pada kemampuan komputer untuk memahami, menginterpretasikan, dan menghasilkan bahasa manusia. Dalam bidang kesehatan, NLP digunakan untuk menganalisis data tekstual seperti catatan medis, laporan dokter, hasil diagnosis, serta literatur medis dalam jumlah besar (Shickel *et al.*, 2018).

Penerapan NLP dalam kesehatan meliputi ekstraksi informasi dari rekam medis elektronik, otomatisasi dokumentasi klinis, serta pengembangan chatbot kesehatan untuk membantu komunikasi pasien. NLP juga digunakan dalam sistem *clinical documentation improvement* untuk meningkatkan kualitas pencatatan medis (Jiang *et al.*, 2017).

Selain itu, NLP berperan penting dalam analisis sentimen pasien, pengawasan penyakit melalui media sosial, serta pemrosesan literatur ilmiah untuk mendukung pengambilan

keputusan berbasis bukti (*evidence-based medicine*) (Shickel *et al.*, 2017).

Berikut contoh Implementasi *Natural Language Processing* (NLP) dalam kesehatan untuk analisis rekam medis elektronik, chatbot kesehatan, dokumentasi klinis, dan pemrosesan bahasa medis.



Gambar 3. Implementasi *Natural Language Processing* (NLP) dalam kesehatan
Sumber: Medium NeuroCare AI NLP Healthcare

Ketiga jenis AI ini machine learning, deep learning, dan natural language processing memiliki peran yang saling melengkapi dalam transformasi sistem kesehatan modern. Machine learning berfokus pada prediksi berbasis data, deep learning unggul dalam analisis data kompleks seperti citra medis, sedangkan NLP memungkinkan pemahaman data berbasis bahasa. Integrasi ketiganya menjadi fondasi utama dalam pengembangan sistem kesehatan berbasis kecerdasan buatan yang lebih akurat, efisien, dan adaptif (Topol, 2019).

1.4 Peran Artificial Intelligence dalam Transformasi Sistem Kesehatan

Artificial Intelligence (AI) memiliki peran yang sangat penting dalam transformasi sistem kesehatan modern. Perkembangan teknologi AI telah mendorong perubahan dari sistem pelayanan kesehatan konvensional menuju sistem kesehatan digital yang lebih efisien, cepat, akurat, dan berbasis data. Transformasi ini tidak hanya memengaruhi proses diagnosis dan pengobatan, tetapi juga manajemen pelayanan kesehatan, pengambilan keputusan klinis, penelitian medis, hingga kebijakan kesehatan masyarakat (WHO, 2021).

Salah satu peran utama AI dalam sistem kesehatan adalah meningkatkan akurasi dan kecepatan diagnosis penyakit. Teknologi AI, khususnya *machine learning* dan *deep learning*, mampu menganalisis data medis dalam jumlah besar secara lebih cepat dibandingkan manusia. AI telah digunakan dalam analisis citra radiologi seperti X-ray, CT-scan, dan MRI untuk mendeteksi penyakit seperti kanker, pneumonia, stroke, dan retinopati diabetik dengan tingkat akurasi yang tinggi (Topol, 2019).

Selain diagnosis, AI juga berperan dalam mendukung pengambilan keputusan klinis melalui *Clinical Decision Support System* (CDSS). Sistem ini membantu tenaga kesehatan dalam menentukan diagnosis, rekomendasi terapi, hingga prediksi risiko komplikasi pasien berdasarkan data historis dan kondisi klinis pasien secara real-time (Rajkomar *et al.*, 2019). Dengan demikian, AI dapat membantu meningkatkan keselamatan pasien dan mengurangi risiko kesalahan medis (*medical error*).

Dalam aspek pelayanan kesehatan, AI berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi operasional rumah sakit dan fasilitas kesehatan. AI dapat digunakan untuk manajemen jadwal pasien, prediksi kebutuhan tempat tidur rumah sakit, pengelolaan logistik obat, hingga optimalisasi alur pelayanan kesehatan. Penerapan AI dalam sistem administrasi kesehatan mampu mengurangi beban kerja administratif tenaga kesehatan

sehingga tenaga medis dapat lebih fokus pada pelayanan pasien (OECD, 2023).

AI juga berperan penting dalam pengembangan pelayanan kesehatan berbasis personal (*personalized medicine*). Dengan memanfaatkan data genomik, riwayat kesehatan, gaya hidup, dan faktor lingkungan pasien, AI dapat membantu menentukan terapi yang lebih spesifik dan sesuai dengan karakteristik individu pasien. Pendekatan ini memungkinkan pelayanan kesehatan menjadi lebih efektif dan tepat sasaran (Jiang *et al.*, 2017).

Dalam bidang kesehatan masyarakat, AI dimanfaatkan untuk surveilans penyakit, prediksi wabah, serta analisis *big data* kesehatan. Teknologi AI mampu menganalisis pola penyebaran penyakit secara cepat sehingga dapat membantu pemerintah dan institusi kesehatan dalam mengambil keputusan strategis terkait pencegahan dan pengendalian penyakit (WHO, 2021). Penggunaan AI selama pandemi COVID-19 menjadi contoh nyata bagaimana teknologi ini membantu pemantauan kasus, prediksi penyebaran virus, dan percepatan penelitian vaksin.

Perkembangan AI juga mendorong transformasi layanan kesehatan digital melalui telemedicine, chatbot kesehatan, dan perangkat wearable berbasis AI. Teknologi ini memungkinkan pasien memperoleh layanan kesehatan secara lebih mudah, cepat, dan fleksibel tanpa harus datang langsung ke fasilitas kesehatan. AI dalam telemedicine juga membantu proses triase awal, monitoring kondisi pasien secara jarak jauh, dan edukasi kesehatan masyarakat (OECD, 2023).

Meskipun demikian, penerapan AI dalam sistem kesehatan juga menghadapi berbagai tantangan, seperti masalah privasi data pasien, keamanan sistem, etika penggunaan AI, serta kesiapan sumber daya manusia kesehatan dalam mengoperasikan teknologi tersebut. Oleh karena itu, implementasi AI harus disertai regulasi yang jelas, pengawasan yang ketat, dan peningkatan kompetensi tenaga kesehatan agar pemanfaatannya dapat berjalan secara optimal dan bertanggung jawab (WHO, 2021).

Secara keseluruhan, AI memiliki potensi besar dalam mentransformasi sistem kesehatan menjadi lebih modern, efisien, dan berorientasi pada kebutuhan pasien. Integrasi AI dengan sistem pelayanan kesehatan diharapkan dapat meningkatkan kualitas pelayanan, memperluas akses kesehatan, serta mendukung terciptanya sistem kesehatan yang berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Coiera, E. (2003) "Guide to health informatics (2nd ed.)." Available at: www.ndl.ethernet.edu.et.
- Esteva, A. *et al.* (2017) "Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks," *Nature*, 542(7639), pp. 115–118. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature21056>.
- Jiang, F. *et al.* (2017) "Artificial intelligence in healthcare: past, present and future," *Stroke and Vascular Neurology*, 2(4). Available at: <https://doi.org/10.1136/svn-2017-000101>.
- Litjens, G. *et al.* (2017) "A survey on deep learning in medical image analysis," *Medical Image Analysis*, 42, pp. 60–88. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>.
- NCBI (2025) "2025 Watch List : Artificial Intelligence in Health Care," 5(3). Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK613808/>.
- OECD (2026) *Scaling Artificial Intelligence in Health*. Available at: https://www.oecd.org/en/publications/scaling-artificial-intelligence-in-health_a436e12d-en/full-report/responsible-scale-of-ai-in-health_1019e537.html.
- Kalia, J. (2022). *Natural language processing in healthcare* [Diagram]. Medium. <https://medium.com/aineurocare/natural-language-processing-in-healthcare-2c04cfe2727b>
- Rajkomar, A., Dean, J. and Kohane, I. (2019) "Machine Learning in Medicine," *New England Journal of Medicine*, 380(14), pp. 1347–1358. Available at: <https://doi.org/10.1056/NEJMra1814259>.
- Shickel, B. *et al.* (2018) "Deep EHR: A Survey of Recent Advances

in Deep Learning Techniques for Electronic Health Record (EHR) Analysis,” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 22(5), pp. 1589–1604. Available at: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2767063>.

Shortliffe, E. (1976) “Computer-based medical consultations: MYCIN,” *Artificial Intelligence - AI*, 388. Available at: <https://doi.org/10.1097/00004669-197610000-00011>.

Stanford University (2016) “ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND LIFE IN 2030.” Available at: <https://ai100.stanford.edu/2016-report/section-i-what-artificial-intelligence/defining-ai>.

Topol, E.J. (2019) “High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence,” *Nature Medicine*, 25(1), pp. 44–56. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>.

upGrad. (2023). *Machine learning applications in healthcare* [Infographic]. upGrad.
<https://www.upgrad.com/blog/machine-learning-applications-healthcare/>

WHO (2021) *ETHICS AND GOVERNANCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR HEALTH*. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240029200>.

WHO (2024a) “Artificial Intelligence for Health.” Available at: <https://www.who.int/publications/m/item/artificial-intelligence-for-health>.

WHO (2024b) *Ethics and governance of artificial intelligence for health*. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/375579>.

Zhu, G. *et al.* (2019) “Applications of Deep Learning to Neuro-Imaging Techniques,” *Frontiers in Neurology*, Volume 10-2019. Available at: <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00869>.

BAB 2

ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM ADMINISTRASI DAN MANAJEMEN PELAYANAN KESEHATAN

2.1 Artificial Intelligence dalam Manajemen Rumah Sakit

Artificial Intelligence (AI) merupakan teknologi yang semakin banyak diterapkan dalam sistem manajemen rumah sakit modern. Perkembangan AI mendorong transformasi pengelolaan rumah sakit menjadi lebih efektif, efisien, dan berbasis data. Rumah sakit sebagai institusi pelayanan kesehatan memiliki sistem operasional yang kompleks, mulai dari pengelolaan pasien, sumber daya manusia, logistik, administrasi, hingga keuangan. Kompleksitas tersebut menghasilkan data dalam jumlah besar yang memerlukan teknologi cerdas untuk membantu proses analisis dan pengambilan keputusan secara cepat dan akurat (Davenport and Kalakota, 2019).

Penerapan AI dalam manajemen rumah sakit membantu meningkatkan efisiensi operasional melalui otomatisasi berbagai proses administrasi dan pelayanan. AI mampu mengolah data pasien, memprediksi kebutuhan layanan kesehatan, serta membantu manajemen rumah sakit dalam menentukan kebijakan berbasis data (*data-driven decision making*). Penggunaan AI dalam manajemen rumah sakit juga mendukung peningkatan mutu pelayanan dan keselamatan pasien (Secinaro *et al.*, 2021).

Salah satu implementasi AI dalam rumah sakit adalah pengelolaan kapasitas tempat tidur (*bed management*). Sistem AI dapat menganalisis tren kunjungan pasien, lama rawat inap, dan pola penyakit tertentu untuk memprediksi kebutuhan tempat tidur rumah sakit. Dengan adanya prediksi tersebut, rumah sakit dapat mengurangi risiko penumpukan pasien dan meningkatkan efisiensi penggunaan ruang rawat inap (Reddy, Fox and Purohit, 2019).

Selain itu, AI juga digunakan dalam manajemen sumber daya manusia kesehatan. Teknologi AI mampu membantu penyusunan jadwal dokter, perawat, dan tenaga kesehatan lainnya berdasarkan jumlah pasien, tingkat kebutuhan pelayanan, serta beban kerja tenaga kesehatan. Sistem ini membantu meningkatkan efisiensi kerja dan mengurangi risiko kelelahan kerja (*burnout*) pada tenaga kesehatan akibat distribusi tugas yang tidak seimbang (Meskó, Hetényi and Györfy, 2018).

Dalam bidang logistik rumah sakit, AI digunakan untuk pengelolaan persediaan obat dan alat kesehatan. Sistem AI mampu memprediksi kebutuhan logistik berdasarkan data penggunaan sebelumnya sehingga rumah sakit dapat mengurangi pemborosan dan mencegah kekurangan stok obat maupun alat kesehatan penting. Teknologi ini membantu meningkatkan efisiensi biaya operasional rumah sakit (Haleem *et al.*, 2022).

AI juga berperan dalam optimalisasi penggunaan rekam medis elektronik (*electronic health records/EHR*) di rumah sakit. Teknologi AI mampu membantu proses pengelolaan, analisis, dan interpretasi data rekam medis secara otomatis sehingga informasi pasien dapat diakses dengan lebih cepat dan akurat. Melalui penerapan *machine learning* dan *natural language processing* (NLP), AI dapat mengidentifikasi pola penyakit, membantu dokumentasi klinis, serta mendukung pengambilan keputusan medis berbasis data pasien yang tersimpan dalam

sistem rekam medis elektronik. Pemanfaatan AI pada rekam medis elektronik juga meningkatkan efisiensi administrasi pelayanan kesehatan dan mengurangi risiko kesalahan pencatatan data pasien (Shickel *et al.*, 2018).

Selain mendukung operasional rumah sakit, AI juga dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas pelayanan pasien melalui analisis data kepuasan pasien dan evaluasi mutu pelayanan. Teknologi AI berbasis *natural language processing* (NLP) dapat menganalisis keluhan maupun umpan balik pasien dari berbagai sumber untuk membantu rumah sakit mengidentifikasi masalah pelayanan secara lebih cepat (Secinaro *et al.*, 2021).

Meskipun memiliki banyak manfaat, implementasi AI dalam manajemen rumah sakit masih menghadapi berbagai tantangan, seperti tingginya biaya investasi teknologi, perlindungan data pasien, keamanan sistem informasi, serta keterbatasan sumber daya manusia yang memahami teknologi AI. Oleh karena itu, diperlukan dukungan regulasi, penguatan infrastruktur digital, dan peningkatan kompetensi tenaga kesehatan agar implementasi AI dapat berjalan secara optimal dan berkelanjutan (Davenport and Kalakota, 2019).

Secara keseluruhan, AI memiliki peran penting dalam transformasi manajemen rumah sakit modern. Penerapan AI mampu meningkatkan efisiensi operasional, mendukung pengambilan keputusan berbasis data, meningkatkan mutu pelayanan kesehatan, serta membantu rumah sakit menghadapi tantangan pelayanan kesehatan di era digital.

2.2 Prediksi Kebutuhan Layanan Kesehatan

Prediksi kebutuhan layanan kesehatan merupakan salah satu penerapan penting Artificial Intelligence (AI) dalam mendukung perencanaan dan pengambilan keputusan di fasilitas

pelayanan kesehatan. Dengan meningkatnya volume data kesehatan yang dihasilkan dari rekam medis elektronik, sistem klaim asuransi, data demografi, serta data epidemiologi, AI menjadi alat yang sangat efektif untuk menganalisis pola tersebut dan menghasilkan prediksi kebutuhan layanan kesehatan secara lebih akurat (Ziad and J., 2026).

Dalam konteks manajemen rumah sakit dan sistem kesehatan, AI digunakan untuk memprediksi berbagai aspek kebutuhan layanan, seperti jumlah kunjungan pasien, tingkat rawat inap, kebutuhan unit gawat darurat, hingga kebutuhan sumber daya manusia kesehatan. Model *machine learning* mampu memanfaatkan data historis pasien untuk mengidentifikasi pola musiman, tren penyakit, serta faktor risiko yang memengaruhi peningkatan kebutuhan layanan kesehatan (Rajkomar *et al.*, 2019).

Salah satu penerapan utama AI adalah prediksi jumlah pasien yang akan datang ke fasilitas kesehatan. Dengan menggunakan algoritma seperti *time series forecasting*, *random forest*, dan *neural networks*, sistem AI dapat memperkirakan lonjakan pasien pada periode tertentu, misalnya saat musim penyakit infeksi atau wabah tertentu. Hal ini membantu rumah sakit dalam mengatur kapasitas layanan, termasuk jumlah tenaga medis, tempat tidur, serta ketersediaan obat dan alat kesehatan (Yu, Beam and Kohane, 2018).

Selain itu, AI juga digunakan untuk memprediksi kebutuhan rawat inap berdasarkan kondisi klinis pasien dan riwayat kesehatan sebelumnya. Sistem ini dapat membantu tenaga kesehatan dalam menentukan tingkat keparahan pasien dan kemungkinan kebutuhan perawatan lanjutan di rumah sakit. Dengan demikian, perencanaan layanan kesehatan menjadi lebih efisien dan berbasis data (*data-driven planning*) (Ziad and J., 2026).

Dalam skala yang lebih luas, AI juga berperan dalam perencanaan kebutuhan layanan kesehatan masyarakat. Data dari rekam medis elektronik, data kependudukan, serta data lingkungan dapat diintegrasikan untuk memprediksi beban penyakit di suatu wilayah. Hal ini sangat berguna bagi pemerintah dan pembuat kebijakan dalam menentukan distribusi sumber daya kesehatan secara lebih tepat sasaran (Rajkomar *et al.*, 2019).

Selain meningkatkan efisiensi, penggunaan AI dalam prediksi kebutuhan layanan kesehatan juga membantu mengurangi risiko kelebihan beban fasilitas kesehatan (*overcapacity*) maupun kekurangan layanan (*underutilization*). Dengan prediksi yang lebih akurat, rumah sakit dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya sehingga kualitas pelayanan tetap terjaga meskipun terjadi peningkatan jumlah pasien (Yu, Beam and Kohane, 2018).

Meskipun demikian, implementasi AI dalam prediksi kebutuhan layanan kesehatan masih menghadapi beberapa tantangan, seperti kualitas data yang tidak konsisten, keterbatasan integrasi antar sistem informasi kesehatan, serta kebutuhan akan validasi model prediksi agar sesuai dengan kondisi lokal. Oleh karena itu, pengembangan sistem AI harus disertai dengan evaluasi berkelanjutan dan kolaborasi antara ahli data, tenaga kesehatan, dan pembuat kebijakan (Ziad and J., 2026).

Secara keseluruhan, AI memiliki peran strategis dalam meningkatkan kemampuan sistem kesehatan untuk memprediksi kebutuhan layanan secara lebih akurat, efisien, dan responsif terhadap perubahan kondisi kesehatan masyarakat.

2.3 Sistem Antrean dan *Scheduling* Berbasis Artificial Intelligence

2.3.1 System Antrean Online

Sistem antrean dan penjadwalan (*scheduling*) merupakan komponen penting dalam manajemen pelayanan kesehatan karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi layanan, waktu tunggu pasien, serta kepuasan pasien. Dalam beberapa tahun terakhir, Artificial Intelligence (AI) mulai banyak diterapkan untuk mengoptimalkan sistem antrean dan penjadwalan di rumah sakit dan fasilitas kesehatan. Teknologi ini memungkinkan pengaturan jadwal pelayanan yang lebih adaptif, dinamis, dan berbasis data real-time (Reddy, Fox and Purohit, 2019).

Secara tradisional, sistem antrean rumah sakit masih menggunakan metode manual atau berbasis aturan sederhana (*rule-based system*), yang sering kali tidak mampu menyesuaikan diri dengan perubahan jumlah pasien secara cepat. Hal ini dapat menyebabkan penumpukan pasien, waktu tunggu yang lama, serta ketidakefisienan dalam penggunaan sumber daya kesehatan. Dengan hadirnya AI, sistem antrean dapat dianalisis dan dioptimalkan menggunakan data historis, pola kunjungan pasien, serta kondisi operasional rumah sakit (Meskó, Hetényi and Györfy, 2018).

AI dalam sistem antrean bekerja dengan memanfaatkan algoritma *machine learning* untuk memprediksi jumlah pasien yang datang pada waktu tertentu. Sistem ini dapat mengidentifikasi jam sibuk (*peak hours*), jenis layanan yang paling banyak digunakan, serta durasi rata-rata pelayanan. Berdasarkan analisis tersebut, AI dapat mengatur distribusi jadwal pasien dan tenaga kesehatan secara lebih seimbang sehingga mengurangi kepadatan antrean (Haleem *et al.*, 2022).

Berikut ilustrasi gambar yang menunjukkan alur sistem antrean pasien berbasis AI di rumah sakit, mulai dari pendaftaran pasien, penentuan prioritas layanan (triage), pengaturan jadwal dokter, hingga estimasi waktu tunggu secara real-time.



Gambar 4. Alur Sistem Antrean
Sumber: Indurock (2025)

2.3.2 Scheduling Berbasis Artificial Intelligence

Selain itu, AI juga digunakan dalam sistem *dynamic scheduling*, yaitu penjadwalan yang dapat berubah secara otomatis berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Misalnya, jika terjadi keterlambatan pelayanan atau peningkatan jumlah pasien secara tiba-tiba, sistem AI dapat menyesuaikan ulang jadwal konsultasi, tindakan medis, atau pemeriksaan tanpa mengganggu alur pelayanan secara keseluruhan (Reddy, Fox and Purohit, 2019).

Penerapan AI juga mendukung sistem *online appointment system* yang terintegrasi dengan aplikasi kesehatan digital. Pasien dapat memesan jadwal konsultasi secara daring, sementara

sistem AI akan mengatur slot waktu berdasarkan ketersediaan dokter, tingkat urgensi pasien, serta prioritas medis. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi layanan, tetapi juga mengurangi waktu tunggu pasien secara signifikan (Davenport and Kalakota, 2019).

Dalam konteks rumah sakit modern, sistem antrean berbasis AI juga terintegrasi dengan rekam medis elektronik dan sistem informasi rumah sakit. Integrasi ini memungkinkan AI untuk mempertimbangkan riwayat kesehatan pasien dalam menentukan prioritas layanan, sehingga pasien dengan kondisi lebih serius dapat ditangani lebih cepat melalui sistem *triage* berbasis data (Shickel *et al.*, 2018).

Meskipun memiliki banyak manfaat, implementasi sistem antrean dan penjadwalan berbasis AI masih menghadapi tantangan seperti ketergantungan pada kualitas data, resistensi dari tenaga kesehatan terhadap perubahan sistem, serta kebutuhan infrastruktur digital yang memadai. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi AI dalam sistem ini sangat bergantung pada kesiapan teknologi dan sumber daya manusia di fasilitas pelayanan kesehatan (Meskó, Hetényi and Györffy, 2018).

Berikut gambar ilustrasi yang menggambarkan penggunaan AI untuk memprediksi waktu tunggu pasien, mengatur jadwal dokter secara dinamis, serta mengoptimalkan slot pelayanan berdasarkan data historis dan kondisi real-time.



Gambar 5. Ilustrasi *Scheduling* Berbasis Artificial Intelligence

Sumber: Conceptual UI design of AI-based appointment scheduling system

Secara keseluruhan, penggunaan AI dalam sistem antrian dan penjadwalan memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan efisiensi operasional rumah sakit, mengurangi waktu tunggu pasien, serta meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan secara menyeluruh.

2.4 Artificial Intelligence dalam Pengelolaan Klaim dan *Fraud Detection*

Artificial Intelligence (AI) memiliki peran penting dalam pengelolaan klaim pelayanan kesehatan dan deteksi kecurangan (*fraud detection*) pada sistem pembiayaan kesehatan modern. Meningkatnya jumlah transaksi pelayanan kesehatan serta penggunaan sistem digital menyebabkan volume data klaim kesehatan menjadi sangat besar dan kompleks. Kondisi ini membuat proses verifikasi klaim secara manual menjadi kurang efektif dan membutuhkan waktu yang lama. Oleh karena itu, AI digunakan untuk membantu proses analisis klaim secara otomatis agar lebih cepat, akurat, dan efisien (Pitaloka and Nugroho, 2021).

Dalam sistem pelayanan kesehatan, fraud dapat terjadi dalam berbagai bentuk, seperti manipulasi diagnosis, pengajuan klaim fiktif, duplikasi klaim, hingga penggelembungan biaya pelayanan (*upcoding*). Praktik fraud tersebut dapat menyebabkan kerugian finansial bagi institusi pelayanan kesehatan maupun penyelenggara jaminan kesehatan. AI membantu mendeteksi indikasi fraud dengan cara menganalisis pola transaksi dan perilaku klaim yang tidak normal berdasarkan data historis pelayanan kesehatan (Bauder and Khoshgoftaar, 2018).

Teknologi AI dalam pengelolaan klaim umumnya memanfaatkan metode *machine learning*, *data mining*, dan analisis prediktif. Sistem AI mampu mempelajari pola klaim yang valid dan membandingkannya dengan data yang memiliki karakteristik mencurigakan. Dengan demikian, proses identifikasi fraud dapat dilakukan lebih cepat dibandingkan pemeriksaan manual konvensional (Hamid *et al.*, 2024).

Di Indonesia, penerapan AI dan analisis data dalam deteksi fraud kesehatan mulai berkembang terutama pada sistem Jaminan Kesehatan Nasional (JKN). Pemanfaatan teknologi digital dalam pengelolaan klaim BPJS Kesehatan membantu proses verifikasi klaim rumah sakit secara lebih sistematis dan terintegrasi. Analisis data berbasis AI juga berpotensi membantu mendeteksi pola kecurangan pelayanan kesehatan yang berulang sehingga dapat mendukung upaya pencegahan fraud dalam sistem pembiayaan kesehatan nasional (Tara Chrishanti, 2024).

Selain mendeteksi fraud, AI juga membantu meningkatkan efisiensi administrasi klaim pelayanan kesehatan. Sistem AI dapat mempercepat proses validasi dokumen, mencocokkan data pelayanan dengan rekam medis elektronik, serta membantu mengurangi kesalahan administrasi dalam pengajuan klaim. Hal ini berdampak pada peningkatan efisiensi operasional rumah

sakit dan percepatan proses pembayaran klaim (Pitaloka and Nugroho, 2021).

Penggunaan AI dalam fraud detection juga mendukung transparansi dan akuntabilitas sistem pelayanan kesehatan. Dengan sistem monitoring berbasis data real-time, institusi kesehatan dapat melakukan pengawasan secara lebih optimal terhadap aktivitas klaim pelayanan kesehatan. AI juga membantu proses audit internal dengan memberikan peringatan dini (*early warning system*) terhadap transaksi yang memiliki risiko tinggi terjadinya fraud (Nguyen *et al.*, 2015).

Meskipun demikian, implementasi AI dalam pengelolaan klaim kesehatan masih menghadapi beberapa tantangan, seperti kualitas data yang belum optimal, keterbatasan infrastruktur digital, perlindungan data pasien, serta kebutuhan tenaga ahli dalam pengelolaan sistem AI. Oleh karena itu, pengembangan teknologi AI harus disertai regulasi yang jelas dan peningkatan kapasitas sumber daya manusia agar penerapannya dapat berjalan secara efektif dan berkelanjutan (Tara Chrishanti, 2024).

Secara keseluruhan, AI memiliki potensi besar dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan klaim dan deteksi fraud pelayanan kesehatan melalui kemampuan analisis data yang cepat, akurat, dan berbasis prediksi. Implementasi AI diharapkan mampu mendukung terciptanya sistem pembiayaan kesehatan yang lebih transparan, efisien, dan akuntabel.

2.5 Otomatisasi Administrasi Pelayanan Kesehatan

Perkembangan teknologi digital dan Artificial Intelligence (AI) telah membawa transformasi signifikan dalam sistem administrasi pelayanan kesehatan. Proses administrasi yang sebelumnya dilakukan secara manual kini mulai beralih menjadi sistem digital yang lebih otomatis, efisien, dan terintegrasi. Otomatisasi administrasi kesehatan mencakup berbagai aspek,

seperti registrasi pasien, pengelolaan rekam medis elektronik, sistem antrian pelayanan, pengolahan data administrasi, hingga pelaporan layanan kesehatan secara real-time. Pemanfaatan AI dalam administrasi pelayanan kesehatan bertujuan meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi risiko kesalahan pencatatan data, serta mempercepat proses pelayanan kepada pasien (Haleem *et al.*, 2022).

Dalam pelayanan kesehatan modern, administrasi yang efektif sangat penting karena berkaitan langsung dengan kelancaran operasional rumah sakit dan fasilitas kesehatan. Proses administrasi yang tidak efisien dapat menyebabkan keterlambatan pelayanan, meningkatnya waktu tunggu pasien, terjadinya duplikasi data, serta bertambahnya beban kerja tenaga administrasi. Oleh karena itu, pemanfaatan Artificial Intelligence (AI) digunakan untuk membantu mengotomatisasi berbagai proses administratif agar pelayanan kesehatan menjadi lebih cepat, akurat, dan responsif terhadap kebutuhan pasien maupun tenaga kesehatan (Secinaro *et al.*, 2021).

Salah satu bentuk otomatisasi administrasi yang paling banyak diterapkan adalah sistem pendaftaran pasien digital (*digital registration system*). Melalui teknologi AI, proses registrasi pasien dapat dilakukan secara otomatis melalui aplikasi daring, *self-service kiosk*, maupun sistem informasi rumah sakit terintegrasi. Sistem ini mampu melakukan verifikasi identitas pasien, menyimpan data pasien secara otomatis, serta menghubungkan data administrasi dengan rekam medis elektronik sehingga mempercepat proses pelayanan (Haleem *et al.*, 2022).

AI juga berperan penting dalam pengelolaan rekam medis elektronik (*electronic medical record/EMR*). Teknologi *machine learning* dan *natural language processing* (NLP) memungkinkan AI membantu proses dokumentasi medis, pencarian data pasien, serta analisis informasi kesehatan secara otomatis. Penggunaan

EMR berbasis AI membantu meningkatkan akurasi pencatatan data, mengurangi risiko kehilangan dokumen, dan mempercepat akses informasi pasien oleh tenaga kesehatan (Shickel *et al.*, 2017). Implementasi EMR di Indonesia juga terbukti membantu mengurangi waktu tunggu pasien dan meningkatkan efisiensi pelayanan administrasi di fasilitas kesehatan (Juliansyah, 2024).

Selain itu, AI digunakan dalam sistem antrean dan penjadwalan pelayanan kesehatan. Sistem AI dapat mengatur jadwal konsultasi pasien secara otomatis berdasarkan ketersediaan dokter, tingkat urgensi pasien, dan kapasitas pelayanan rumah sakit. Otomatisasi ini membantu mengurangi antrean panjang, meningkatkan efisiensi penggunaan waktu tenaga kesehatan, serta meningkatkan kepuasan pasien terhadap pelayanan kesehatan (Meskó, Hetényi and Gyórfy, 2018).

Dalam aspek administrasi keuangan, AI membantu mempercepat proses pengelolaan klaim dan pembayaran layanan kesehatan. Sistem AI mampu melakukan validasi data administratif, mencocokkan data pelayanan dengan rekam medis elektronik, serta membantu mendeteksi kesalahan input data maupun potensi fraud dalam klaim pelayanan kesehatan. Hal ini mendukung peningkatan transparansi dan akuntabilitas administrasi rumah sakit (Hamid *et al.*, 2024).

Penerapan AI juga berkembang pada pelayanan informasi kesehatan berbasis chatbot dan *virtual assistant*. Teknologi ini memungkinkan pasien memperoleh informasi terkait jadwal pelayanan, prosedur administrasi, maupun status klaim kesehatan secara otomatis selama 24 jam. Penggunaan chatbot berbasis AI membantu mengurangi beban kerja petugas administrasi sekaligus meningkatkan aksesibilitas informasi bagi masyarakat (Davenport and Kalakota, 2019).

Di Indonesia, transformasi digital administrasi pelayanan kesehatan terus berkembang melalui implementasi Sistem Informasi Manajemen Rumah Sakit (SIMRS), rekam medis

elektronik, dan layanan administrasi digital BPJS Kesehatan. Pemanfaatan teknologi digital dalam administrasi kesehatan dinilai mampu meningkatkan efisiensi pelayanan, mempercepat proses birokrasi, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data (Hindarti, 2026).

Meskipun demikian, implementasi otomatisasi administrasi pelayanan kesehatan berbasis Artificial Intelligence (AI) masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan infrastruktur digital, tingginya biaya pengembangan teknologi, keamanan dan kerahasiaan data pasien, serta rendahnya kesiapan sumber daya manusia dalam mengoperasikan sistem digital kesehatan. Selain itu, integrasi antar sistem informasi kesehatan yang belum optimal juga menjadi hambatan dalam penerapan AI secara menyeluruh di fasilitas pelayanan kesehatan. Oleh karena itu, diperlukan dukungan regulasi, penguatan infrastruktur teknologi, serta peningkatan kompetensi tenaga kesehatan agar implementasi AI dapat berjalan secara efektif, aman, dan berkelanjutan (Ahmad *et al.*, 2021).

Secara keseluruhan, AI memiliki peran strategis dalam mendukung otomatisasi administrasi pelayanan kesehatan melalui peningkatan efisiensi operasional, akurasi pengelolaan data, dan kualitas pelayanan kepada pasien. Integrasi AI dalam administrasi kesehatan diharapkan mampu menciptakan sistem pelayanan kesehatan yang lebih modern, efektif, dan berorientasi pada kebutuhan masyarakat.

2.6 Penggunaan Artificial Intelligence untuk Efisiensi Biaya Pelayanan Kesehatan

Artificial Intelligence (AI) menjadi salah satu teknologi yang berperan penting dalam meningkatkan efisiensi biaya pelayanan kesehatan di era transformasi digital. Tingginya biaya

operasional rumah sakit, meningkatnya kebutuhan pelayanan kesehatan, serta keterbatasan sumber daya kesehatan mendorong fasilitas pelayanan kesehatan untuk memanfaatkan teknologi AI dalam mendukung efisiensi sistem pelayanan. AI membantu institusi kesehatan mengurangi pemborosan, meningkatkan produktivitas, dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya secara lebih efektif (Bohr & Memarzadeh, 2020).

Dalam pelayanan kesehatan, biaya operasional rumah sakit dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti penggunaan sumber daya manusia, pengelolaan logistik, administrasi pelayanan, lama rawat inap pasien, hingga proses diagnostik dan terapi. AI membantu meningkatkan efisiensi biaya melalui otomatisasi berbagai proses pelayanan dan pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*) (Davenport and Kalakota, 2019).

Salah satu penerapan AI untuk efisiensi biaya adalah optimalisasi penggunaan sumber daya rumah sakit. Teknologi AI mampu memprediksi jumlah pasien, kebutuhan tempat tidur, penggunaan obat, dan kebutuhan alat kesehatan berdasarkan data historis pelayanan. Dengan prediksi tersebut, rumah sakit dapat mengurangi pemborosan logistik serta menghindari kekurangan maupun kelebihan stok obat dan alat kesehatan (Haleem *et al.*, 2022).

Penerapan Artificial Intelligence (AI) dalam administrasi pelayanan kesehatan memungkinkan proses operasional rumah sakit berjalan lebih efisien melalui digitalisasi dan otomatisasi layanan administratif. Teknologi AI dapat membantu mempercepat proses input data pasien, pengarsipan dokumen kesehatan, pengelolaan jadwal pelayanan, hingga pemrosesan administrasi keuangan secara lebih akurat dan terintegrasi. Efisiensi tersebut membantu rumah sakit mengurangi biaya operasional, meningkatkan produktivitas tenaga kerja, serta

mempercepat pelayanan kepada pasien (Reddy, Fox and Purohit, 2019).

Dalam aspek klinis, AI mendukung efisiensi biaya melalui peningkatan akurasi diagnosis dan pengambilan keputusan medis. Sistem AI berbasis *machine learning* mampu membantu tenaga kesehatan mendeteksi penyakit lebih dini sehingga penanganan pasien dapat dilakukan lebih cepat dan mencegah komplikasi yang membutuhkan biaya perawatan lebih besar. Penggunaan AI juga membantu mengurangi pemeriksaan medis yang tidak diperlukan sehingga biaya pelayanan menjadi lebih efisien (Topol, 2019).

Selain itu, AI berperan dalam menurunkan lama rawat inap pasien (*length of stay*). Dengan analisis data pasien secara real-time, AI dapat membantu tenaga kesehatan memantau kondisi pasien dan menentukan intervensi medis yang lebih tepat. Penurunan lama rawat inap berdampak langsung pada pengurangan biaya pelayanan rumah sakit serta peningkatan kapasitas pelayanan pasien lainnya (Jiang *et al.*, 2017).

Dalam sistem pembiayaan kesehatan, AI juga digunakan untuk mendeteksi potensi fraud dan kesalahan klaim pelayanan kesehatan. Teknologi AI mampu mengidentifikasi pola klaim yang tidak normal sehingga membantu mencegah kerugian finansial akibat kecurangan dalam sistem asuransi kesehatan maupun jaminan kesehatan nasional. Penggunaan AI pada pengelolaan klaim membantu meningkatkan transparansi dan efisiensi pembiayaan kesehatan (Haleem *et al.*, 2022)

Di Indonesia, transformasi digital pelayanan kesehatan mulai mendorong pemanfaatan AI untuk meningkatkan efisiensi sistem kesehatan nasional. Implementasi rekam medis elektronik, Sistem Informasi Manajemen Rumah Sakit (SIMRS), dan layanan administrasi digital BPJS Kesehatan menjadi bagian dari upaya meningkatkan efisiensi operasional pelayanan kesehatan. Penggunaan teknologi digital dinilai mampu

membantu rumah sakit mengurangi biaya operasional dan meningkatkan kualitas pelayanan kepada masyarakat (Hindarti, 2026).

Meskipun memiliki banyak manfaat, penerapan AI untuk efisiensi biaya pelayanan kesehatan masih menghadapi berbagai tantangan, seperti biaya investasi teknologi yang tinggi, kebutuhan infrastruktur digital yang memadai, keamanan data pasien, serta keterbatasan tenaga kesehatan yang memahami teknologi AI. Oleh karena itu, diperlukan dukungan regulasi, investasi teknologi, dan peningkatan kompetensi sumber daya manusia agar implementasi AI dapat berjalan secara optimal dan berkelanjutan (Angle, 2022).

Secara keseluruhan, AI memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi biaya pelayanan kesehatan melalui optimalisasi sumber daya, otomatisasi administrasi, peningkatan akurasi pelayanan medis, dan pengurangan pemborosan operasional. Pemanfaatan AI diharapkan mampu mendukung terciptanya sistem pelayanan kesehatan yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Z. *et al.* (2021) "Artificial intelligence (AI) in medicine, current applications and future role with special emphasis on its potential and promise in pathology: present and future impact, obstacles including costs and acceptance among pathologists, practical and philosophical considerations. A comprehensive review.," *Diagnostic pathology*, 16(1), p. 24. Available at: <https://doi.org/10.1186/s13000-021-01085-4>.
- Angle, J. (2022) "Artificial Intelligence in Healthcare." Available at: https://www.researchgate.net/publication/357635116_Artificial_Intelligence_in_Healthcare.
- Bauder, R. and Khoshgoftaar, T. (2018) *A Survey of Medicare Data Processing and Integration for Fraud Detection*. Available at: <https://doi.org/10.1109/IRI.2018.00010>.
- Davenport, T. and Kalakota, R. (2019) "The potential for artificial intelligence in healthcare," *Future Healthcare Journal*, 6(2), pp. 94–98. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.7861/futurehosp.6-2-94>.
- Haleem, A. *et al.* (2022) "Medical 4.0 technologies for healthcare: Features, capabilities, and applications," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 2, pp. 12–30. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.04.001>.
- Hamid, Z. *et al.* (2024) "Healthcare insurance fraud detection using data mining.," *BMC medical informatics and decision making*, 24(1), p. 112. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02512-4>.

- Hindarti, A. (2026) "THE INFLUENCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DIAGNOSTIC SYSTEMS AND HEALTHCARE WORKERS ' DIGITAL COMPETENCE," 3(3), pp. 4532–4539.
- Jiang, F. *et al.* (2017) "Artificial intelligence in healthcare: past, present and future," *Stroke and Vascular Neurology*, 2(4). Available at: <https://doi.org/10.1136/svn-2017-000101>.
- Juliansyah, R. (2024) "Implementation of EMR System in Indonesian Health Facilities : Benefits and Constraints."
- Meskó, B., Hetényi, G. and Györffy, Z. (2018) "Will artificial intelligence solve the human resource crisis in healthcare?," *BMC Health Services Research*, 18(1), p. 545. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12913-018-3359-4>.
- Nguyen, T. *et al.* (2015) "Hidden Markov models for cancer classification using gene expression profiles," *Information Sciences*, 316. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.04.012>.
- Pitaloka, A. and Nugroho, A. (2021) "Digital Transformation in Indonesian Healthcare," *STI Policy and Management Journal*, 6. Available at: <https://doi.org/10.14203/STIPM.2021.301>.
- Reddy, Sandeep, Fox, John and Purohit, Maulik P (2019) "Artificial intelligence-enabled healthcare delivery," *Journal of the Royal Society of Medicine*, 112(1), pp. 22–28. Available at: <https://doi.org/10.1177/0141076818815510>.
- Secinaro, S. *et al.* (2021) "The role of artificial intelligence in healthcare: a structured literature review," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 21(1), p. 125. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12911-021-01488-9>.
- Shickel, B. *et al.* (2018) "Deep EHR: A Survey of Recent Advances in Deep Learning Techniques for Electronic Health Record (EHR) Analysis," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 22(5), pp. 1589–1604. Available at: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2767063>.

- Tara Chrishanti, M. (2024) *Analisis Pengendalian Fraud Pada Jaminan Kesehatan Nasional di Indonesia: Literature Review*.
- Topol, E.J. (2019) "High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence," *Nature Medicine*, 25(1), pp. 44–56. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>.
- Yu, K.-H., Beam, A.L. and Kohane, I.S. (2018) "Artificial intelligence in healthcare," *Nature Biomedical Engineering*, 2(10), pp. 719–731. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0305-z>.
- Ziad, O. and J., E.E. (2026) "Predicting the Future — Big Data, Machine Learning, and Clinical Medicine," *New England Journal of Medicine*, 375(13), pp. 1216–1219. Available at: <https://doi.org/10.1056/NEJMp1606181>.

BAB 3

TRANSFORMASI DIGITAL PELAYANAN KESEHATAN DI ERA *ARTIFICIAL INTELLIGENCE*

3.1 Pendahuluan

Perkembangan era transformasi digital saat ini memberikan dorongan ditemuinya perubahan dan penyesuaian di banyak sektor, tidak terkecuali paradigma pelayanan kesehatan. Tantangan-tantangan yang ada, seperti meningkatnya penyakit kronis, keterbatasan tenaga kesehatan sebagai sumber daya manusia, ketimpangan akses wilayah, serta waktu yang sempit menjadi alasan serta landasan utama pemanfaatan teknologi. (Pirma Ivan Ricky Manurung & Marice Simarmata, 2025)

Kecerdasan buatan (AI) menjadi salah satu teknologi yang banyak digunakan. Penerapan dan penggunaannya dalam pelayanan kesehatan tidak hanya berkaitan dengan sistem administrasi, namun juga memengaruhi proses penyimpanan data pasien, diagnosis, pengobatan, hingga komunikasi antart tenaga kesehatan maupun antara tenaga kesehatan dengan pasien. Adanya digitalisasi layanan kesehatan diharapkan mampu meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan agar dapat berjalan dengan lebih efektif dan efisien (Sikki *et al.*, 2026).

3.2 Digitalisasi Layanan Kesehatan

Digitalisasi layanan kesehatan merupakan proses perubahan sistematis dalam penyelenggaraan pelayanan kesehatan, di mana berbagai aktivitas pencatatan, pengelolaan informasi, dan pelayanan kepada pasien dialihkan dari mekanisme manual ke sistem berbasis teknologi informasi dan komunikasi. Transformasi ini mencakup pengembangan rekam medis elektronik, sistem pendaftaran dan antrian daring, serta platform layanan kesehatan berbasis jaringan untuk mendukung efisiensi alur kerja, memperluas akses, mengintegrasikan data antar fasilitas kesehatan, dan meningkatkan mutu serta keselamatan layanan yang diterima pasien.

3.3 Rekam Medis Elektronik

RME ataupun kepanjangannya yaitu Rekam Medis Elektronik yaitu termasuk ke dalam teknologi yang berkaitan melalui sistem informasi kesehatan dengan telah terkomputerisasi. Dalam pengembangan dari teknologi tersebut bertujuan agar dapat mendokumentasikan juga melakukan penyimpanan data administratif yang juga menyimpan data medis pasiennya secara lebih terstruktur serta berdasarkan pada standar. Rancangan dari sistem tersebut bertujuan agar dapat memberikan jawaban tantangan atas adanya sistem data kesehatan dengan saat sebelumnya masih berbasis kertas, yang akhirnya condong memakan waktu memiliki risiko duplikasi serta tidak lengkapnya data, dibutuhkan juga ruang penyimpanan dengan terbilang besar (Putra *et al.*, 2024). Pengaplikasian dari sistem informasi serta data dengan terintegrasikan melalui basis Rekam Medis Elektronik pastinya memberikan perubahan yang juga memberi kemudahan pada tahap manajemen data pasiennya.

RME menyediakan data serangkaian komponen klinis digital yang terstruktur dan terstandardisasi, meliputi identitas pasien, anamnesis, rekaman pemeriksaan fisik, penunjang diagnostik (laboratorium dan radiologi), justifikasi diagnosis kerja maupun banding, intervensi medis, regimen terapeutik, evaluasi respons klinis, hingga ringkasan pemulangan (*discharge summary*) serta perencanaan klinis lanjutan. Keberadaan RME tidak bersifat parsial, melainkan terkonvergensi secara holistik dengan subsistem informasi kesehatan lainnya, seperti manajemen registrasi, penjadwalan, pelayanan farmasi, administrasi klaim finansial, dan pelaporan program kesehatan masyarakat yang berguna untuk mengonstruksi ekosistem informasi yang menjamin kontinuitas pelayanan (*continuity of care*). Desain struktur data ini diorientasikan untuk memfasilitasi aksesibilitas, pembaruan, dan interoperabilitas data secara aman oleh otoritas medis yang kompeten, sekaligus mendukung fungsi filtrasi serta analisis data bagi kepentingan klinis dan manajerial. Implikasinya, RME memegang peranan krusial sebagai fondasi utama sistem informasi fasyankes yang mengakselerasi inteligensi keputusan klinis, mengeliminasi redundansi dokumentasi, serta mengoptimalkan akurasi pencatatan medis (Sukanto Koesnoe, 2025).

Regulasi mengenai digitalisasi rekam medis di Indonesia secara yuridis berakar pada Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) Nomor 24 Tahun 2022 tentang Rekam Medis. Kebijakan ini secara imperatif menginstruksikan seluruh fasilitas pelayanan kesehatan (fasyankes) untuk menghentikan penggunaan format berbasis kertas dan bermigrasi ke sistem elektronik. Sebagai instrumen katalis dalam transformasi tata kelola kesehatan nasional, regulasi ini diorientasikan untuk menciptakan standarisasi data, mengoptimalkan efisiensi operasional, serta mengeskalasi mutu layanan klinis. Berdasarkan tenggat waktu yang ditetapkan dalam amanat

tersebut, seluruh fasyankes baik pada level rumah sakit, puskesmas, maupun klinik pratama diwajibkan memenuhi dan menyelesaikan transisi rekam medis elektronik (RME) paling lambat pada 31 Desember 2023. Eksistensi payung hukum ini tidak hanya memberikan legitimasi yuridis yang kuat terhadap validitas data digital, tetapi juga menjadi instrumen pemaksa (*enforcement*) yang memotivasi institusi kesehatan untuk segera mengadopsi sistem tersebut demi kepatuhan regulasi.

Manfaat dari penggunaan RME sangatlah nyata. Berkaitan dengan efisiensi administrasi, RME mampu mempercepat proses pencatatan, meminimalisir adanya duplikasi, mempersingkat waktu pelayanan, dan memudahkan penelusuran data. Berkaitan dengan mutu dan keselamatan pasien, RME dapat menyediakan dokumentasi lengkap dan terstruktur, mendukung kontinuitas pelayanan multidisiplin dan manajemen pengambilan keputusan klinis berbasis data.

Transformasi implementasi RME pada masing-masing fasilitas layanan kesehatan pastinya memerlukan kesiapan baik pada SDM organisasi, teknologi, infrastruktur, kemudian juga regulasi yang seluruhnya berhubungan agar dapat memberikan dukungan pada pengaplikasian RME berkesinambungan (Izza & Lailiyah, 2024). Mengacu kepada penelitian yang telah ditemui serta didukung atas adanya fakta lapangan, SDM yaitu faktor terdominan pada memberikan pengaruh kepada kesiapan serta kesuksesan implementasi RME pada beragam fasilitas layanan kesehatan. SDM yang penilaiannya dilakukan dengan siap serta memadai guna memberikan peran pada menunjang komitmen agar dapat beralih serta rekam medis konvensional pada sistem elektronik ditinjau melalui tingkat pendidikannya, pengalaman kerjanya, lalu keahlian komputer juga kemampuan beradaptasi kepada suatu perubahan. Bukan sekedar peran individualnya, tetapi dukungan sosial diantara unit, serta antar profesi misalnya yaitu kolaborasi yang dilakukan antar dokter, perawat, kemudian juga farmasi, ahli gizi, serta sektor administrasi ikut menciptakan

peningkatan optimalisasi dari pemakaian RME. Adanya suatu dukungan manajerial atas pimpinannya serta organisasinya pada wujud menyediakan anggaran, menciptakan tim teknologi informasi sosialisasi, juga pelatihan dalam wujud terstruktur bisa dipakai sebagai faktor yang mendukung serta yang menentukan kesuksesan implementasi RME pada praktik sehari-harinya.

Berhubungan melalui faktor teknologi serta informasinya, aspek kesiapan pada hal ini melingkupi penyediaan dari infrastruktur kerat, stabilitas dari jaringan internetnya, keandalan dari perangkat lunaknya, juga kualitas sistem output informasi yang diproduksinya. Walaupun begitu, tahap implementasi sering bertabrakan melalui beberapa eksistensi kendala teknik, misalnya yaitu frekuensi gangguan sistem yang terbilang tinggi, latensi akses dengan terbilang rendah integrasi antar modul yang lemah tidak adanya fitur tanda tangan elektronik, sampai pada persistensi untuk duplikasi input datanya. Di dalam tingkat fasilitas Kesehatan primer tersebut misalnya berupa puskesmas serta klinik, hambatan itu lebih terelaksasi melalui perangkat yang terbatas jaringannya, bisa juga tidak adanya alokasi anggaran khusus bagi pemeliharaan ataupun juga pengembangan sistem dengan berkesinambungan (Anggraini *et al.*, 2025).

Pertimbangan etik, keamanan data, dan kepemilikan data klinis menjadi tantangan dalam implementasi penggunaan RME. Kerangka hukum tentang perlindungan terhadap aspek etika, hukum, dan privasi pasien ini dibangun di atas UU Kesehatan No. 17/2023 terkait kerahasiaan medis, UU ITE dengan mengandasi kepada keabsahan digital, juga UU PDP yang menjadi payung paling tinggi dalam memproteksi data privatnya. Aturan tersebut dipertegas melalui Permenkes No. 24/2022 dengan memberikan instruksi transisi digital fasyankes melalui adanya kewajiban melindungi validitas juga keamanan informasi pasiennya. Tetapi untuk aktualisasi menampilkan masih ditemui sebuah celah dengan signifikan diantara regulasi pada atas kertas serta

pengaplikasian teknologi pada fasyankes tingkat dasar, yang utamanya dalam aspek persetujuan penderita serta standar privasi sistem pengamanan informasinya (Studi *et al.*, n.d.).

Implikasi etik dari transisi ke RME ini memunculkan tantangan baru terkait tata kelola dan kepemilikan data, sekaligus memengaruhi kepercayaan dalam relasi dokter-pasien akibat kecemasan akan risiko peretasan data medis. Fenomena ini membebankan tanggung jawab hukum baru bagi tenaga medis dan manajemen rumah sakit untuk menjamin keterisian RME secara valid, sebab dokumen digital tersebut memegang peranan vital sebagai alat bukti sah dalam hukum pembuktian peradilan. Oleh karena itu, jaminan bahwa data tidak dimodifikasi secara ilegal (*data integrity*) menjadi syarat mutlak keabsahannya. Ketegangan konseptual akhirnya muncul ketika fasyankes diwajibkan menyuplai data RME kepada pemerintah untuk agregasi kebijakan kesehatan nasional, yang secara langsung berpotensi menegasikan hak privasi dan otonomi data pribadi individu.

Disebabkan hal tersebut, harmonisasi regulasi yang ada diantara UU Kesehatan, UU PDP, UU ITE, sampai pada Permenkes dibutuhkan perihal celah hukum serta etikanya yang juga dipakai sebagai penguat dalam kelembagaan perlindungan data pada lingkup Kesehatan melalui instansi pengawas dengan sifat independen. Bukan hanya itu, sedari masih di tahap perancangan, pengaplikasian dari RME diwajibkan mengamplifikasi prinsip dari *privacy by design* dalam menjadi instrumen proteksi dininya. Persoalan tersebut diaktualisasi lewat adanya fitur *audit trail* yang disediakan agar dapat memberikan pemantauan lalu lintas datanya, membatasi otorisasi akses di mana disesuaikan melalui adanya hierarki pengguna, juga penempatan penanggung jawab perlindungan data pada masing-masing fasyankes. Urgensi dari suatu payung hukum dengan semakin komprehensif sangatlah diperlukan pada hal ini; dengan tidak adanya regulasi menyeluruh yang memberikan aturan sekuritas informasi,

kemudian juga batas dari kepemilikan, serta Mekanisme pertukaran data dengan pejalan melalui nilai etika medisnya, lalu operationalisasi rme memberikan risiko menegasi hak privasi dari pasiennya yang juga memposisikan fasilitas kesehatan pada kondisi yang rentan akan adanya gugatan hukum.

3.4 Smart Hospital

Smart Hospital menjadi definisi dari sebuah institusi layanan kesehatan yang menerapkan konvergensi antara teknologi informasi, *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (AI), serta arsitektur data terpadu guna membangun sebuah ekosistem digital yang menyokong efisiensi operasional, mutu intervensi klinis, dan optimalisasi pengalaman pasien secara *real-time*. Berbeda dari adopsi digitalisasi konvensional yang bersifat parsial, *smart hospital* mengonstruksi sebuah ekosistem berbasis data (*data-driven ecosystem*) yang memfasilitasi penarikan keputusan klinis serta tata kelola sumber daya secara lebih presisi, prediktif, dan terkoneksi lintas kompartemen. Melalui kerangka konseptual ini, rekam medis pasien, instrumentasi medis, infrastruktur fisik, dan alur administratif saling terintegrasi dalam jaringan cerdas, yang pada gilirannya memungkinkan pemantauan kontinu, otomatisasi tugas rutin, serta penyediaan *decision support system* berbasis algoritma cerdas. Oleh sebab itu, implementasi *smart hospital* tidak semata-mata bertumpu pada modernisasi teknologi, melainkan juga mengandalkan transformasi budaya organisasi, tata kelola data yang akuntabel, serta pergeseran visi strategis menuju *digital-first* demi mewujudkan pelayanan kesehatan berbasis bukti (*evidence-based healthcare*) (Chow et al., 2025)

Komponen dari *smart hospital* dikonstruksikan oleh beberapa pilar teknologi utama:

1. RME Terintegrasi: Memiliki bukti dalam menjadi tulang punggung data terpusat dengan memberikan fertilitas akses informasi klinis multi departemen dengan sifat yang konsisten serta instan.
2. MIoT (*Medical Internet of Things*): Jaringan sensor dan perangkat medis pintar untuk pemantauan kondisi fisiologis pasien secara konstan dan presisi.
3. AI & Analitik Data: Pengelolaan informasi dengan memakai algoritma yang cerdas bertujuan agar dapat mendeteksi secara dini deteriorasi pasiennya, validnya diagnosis, serta mengoptimalkan manajemen operasionalnya.
4. *Telemedicine* serta Layanan Digital: Adanya suatu platform seluler dengan memangkas birokrasi kunjungan lewat adanya fitur yang berupa konsultasi jarak jauh, kemudian pelacakan pada antrian secara *real-time*, Halo juga akses data medis yang bersifat mandiri.
5. Robotika serta Otomasi (RPA): Mekanisme dalam pengiriman logistik medisnya, intervensi dari bedah mikrokoma juga otomatisasi tugas administratif agar dapat membuat *human error* menjadi terminimalisir.
6. Infrastruktur Pintar serta *Cloud*: Cloud yang tersimpan dengan mematuhi regulasi melalui dorongan konektivitas intramural yang memiliki kecepatan tinggi juga Tata pengelolaan energi bangunan yang otomatis. awan

Kondisi dari semua komponen digital tersebut dikontrol melalui kerangka *AI governance* agar dapat memastikan bahwasanya semua keputusan klinis ataupun manajerial dengan

diberikan bantuan atas algoritma tetaplah mengikuti standar etika medisnya, kemudian bersifat transparansi, serta berdasarkan akuntabilitas hukum (Loria *et al.*, 2024).

Implementasi *smart hospital* menghadirkan signifikansi manfaat tidak hanya bagi pasien, namun juga para klinisi dan manajemen. Bagi pasien, sistem ini mereduksi latensi tunggu, mengoptimalkan navigasi internal fasyankes, serta memperluas aksesibilitas melalui *telemedicine*. Bagi tenaga kesehatan, integrasi AI meminimalisir risiko *medical error* melalui adanya validasi otomatis dan *clinical decision support system* yang presisi. Sementara dari aspek manajerial, efisiensi operasional tercapai melalui otomatisasi logistik farmasi, tata kelola antrean rawat jalan, dan pemantauan parameter klinis yang simultan.

Namun demikian, faktor keberhasilan *smart hospital* tidak semata-mata bertumpu pada keandalan teknologi, melainkan pada maturitas tata kelola organisasi. Urgensi kerangka *AI governance* menjadi krusial demi menjamin transparansi, akuntabilitas, dan kepatuhan etis algoritma klinis. Mengingat tingginya dependensi terhadap infrastruktur digital, penerapan manajemen risiko korporat dan protokol *disaster recovery* yang rigid menjadi syarat mutlak mitigasi ancaman siber. Selain itu, eskalasi literasi AI di kalangan sumber daya manusia di lingkup medis diperlukan agar interpretasi sistem berjalan optimal. Oleh karena itu, adopsi strategi berorientasi *digital-first* harus disinergikan dengan stabilitas fiskal untuk pemeliharaan berkala serta kesiapan siber-infrastruktur guna menghindari kegagalan investasi teknologi (Sendlhofer, 2025).

Adopsi *smart hospital* menghadapi hambatan multidimensional yang signifikan, mulai dari defisit infrastruktur digital berupa instabilitas jaringan dan ketimpangan distribusi perangkat IoT di fasyankes daerah, hingga rendahnya literasi digital sasar—baik di tataran klinisi dalam mengoperasikan algoritma analitis maupun pasien dalam mengadopsi

platform *teleservice*. Fragmentasi tersebut bertambah parah diakibatkan atas permasalahan interferabilitas yang diakibatkan oleh tidak adanya standarisasi pertukaran data lintas unit, dengan terlaksana secara beriringan melalui eskalasi risiko kebocoran data fiber yang tinggi di dalam arsitektur penyimpanan terpusat. Ditinjau pada sisi lainnya, kendala finansial yang ada dalam alokasi anggaran pemeliharaan berkesinambungan, kemudian juga absennya kerangka yang berupa *AI governance* bertujuan agar dapat memberikan jaminan akuntabilitas keputusan klinis juga sistem dari *disaster recovery* korporat yang lemah menciptakan peningkatan pada kerentanan operasionalnya; yang akhirnya dengan tidak adanya keselarasan strategi yang dimiliki *digital-first* dengan holistik melalui kapabilitas SDM yang memuat investasi teknologi medis tersebut memberikan risiko terjadinya ketidakberhasilan sistemik maupun juga hanya menciptakan adopsi parsial dengan tidaklah maksimal.

3.5 Integrasi AI dalam Sistem Pelayanan Kesehatan

Integrasi AI ataupun dikenal dengan kecerdasan buatan pada bidang pelayanan medis memiliki konsep dengan menjadi pemanfaatan komputasi algoritma cerdas, kemudian juga *machine learning*, beserta analitik data dengan berkelanjutan agar dapat mengakselerasi akurasi keputusan klinisnya, melakukan penataan manajemen operasional fasyankes, serta membuat mutu juga responsivitas pelayanan pasiennya lebih optimal dengan instan. Adanya informasi tersebut telah melangkah jauh dari hanya otomatisasi pada berbagai tugas manual; dikonstruksi oleh AI yaitu suatu ekosistem yang mendukung keputusan dengan berbasis pada bukti ataupun dikenal dengan "*evidence-based decision support system*" gimana mempunyai kapabilitas dalam melakukan proses data kesehatan makro agar dapat mengeksplor berbagai pola laten, memproyeksi

risikonya, serta memberikan penyajian analisis prediktif yang melebihi batasan kemampuan yang dimiliki metodologi konvensional. Pada lingkup aplikatifnya, teknologi tersebut implementasinya dilakukan dengan komprehensif dalam beragam lini pelayanan, dengan melingkupi agen virtual cerdasnya ataupun dikenal dengan *chatbot* bagi suatu fungsi edukasi juga triase Mandiri, kemudian juga sistem diagnostik dengan basis kecerdasan buatan bagi pemindaian citra medisnya ataupun dikenal dengan "*early warning system*" kepada turunya keadaan pasien juga perancangan terapi individu dengan dijadikan selaras melalui ciri genetik serta riwayat klinis individualnya (Suriadi *et al.*, n.d.).

Terdapat berbagai bentuk dari integrasi AI pada suatu pelayanan kesehatan, yaitu berupa:

1. Agen Virtual Cerdas kemudian juga Triase Digital: Dengan pengoptimalan manfaat dari asisten yang memiliki basis kecerdasan buatan dengan memiliki fungsi memberikan fasilitas edukasi kesehatan Mandiri, kemudian juga dokumentasi untuk indikasi awal, juga melakukan klasifikasi skala prioritas urgensi klinis pasiennya saat akan memasuki tahap konsultasi medis.
2. Sistem Diagnostik Dengan Bantuan Komputasi (*Computer-Aided Diagnosis*): Mengimplementasikan algoritma machine learning yang bisa membaca gambar medis misalnya seperti foto rontgen, hasil biopsi, lalu dermatoskopi. Tujuan yang dimiliki berupa agar bisa menjumpai berbagai tanda penyakit seperti kanker, stroke, atau infeksi paru lebih awal dan hasilnya lebih valid.
3. Instrumen Peringatan Awal Deteriorasi Klinis (*Early Warning System*): Dengan algoritma dari AI menjalankan analisis kepada tanda vital dengan wujud simultan agar dapat melakukan proyeksi pada risiko turunya keadaan akut

penderitanya, misalnya yaitu onset sepsis, kemudian juga insufisiensi pernapasan, ataupun pada henti jantung yang mendadak.

4. Otomatisasi Administrasi beserta Skrining Dokumen: Menciptakan mekanisme pengelolaan dari rekam medisnya, kemudian verifikasi klaim jaminan kesehatannya, menerbitkan dokumen yang berupa legal-medis, juga melakukan penataan antrean poliklinik dengan diselaraskan melalui SIMRS ataupun kepanjangannya yaitu “Sistem Informasi Manajemen Rumah Sakit”.
5. Terapeutik Presisi Berbasis Karakteristik Individu (*Personalized Medicine*): Menciptakan rekomendasi rencana pengobatan yang disesuaikan bagi tiap pasiennya, berlandaskan pada hasil tes genetik, riwayat penyakit, respons obat sebelumnya, serta profil risikonya masing-masing.
6. Tata Kelola Logistik beserta Manajemen Alur Kerja Instansional: Menciptakan efisiensi rumah sakit lewat adanya sistem otomatis dengan mengatur jadwal operasinya, melakukan prediksi kepada jumlah tempat tidur berdasarkan fluktuasi pasiennya, juga melakukan pengelolaan stok obat memakai algoritma prediktif.
7. Autentikasi Biometrik Pasien: Memvalidasi identitas penggunaanya melalui sidik jari, scan wajah, ataupun melalui retina. Hal memiliki tujuan agar tidak ditemui kesalahan pada verifikasi pasien, tidak adanya data medis yang terduplikasi, serta tanpa bisa dimanipulasi.
8. Analisis Epidemiologis dan Surveilans Kesehatan Masyarakat: AI melakukan penggabungan data medis pasien serta data lingkungan agar bisa melakukan prediksi potensi wabah, melakukan pelacakan penyebaran penyakitnya, serta

membantu menciptakan kebijakan pencegahan yang lebih cepat.

9. Sistem Pendukung Keputusan Klinis Dengan Basis *Evidence-Based*: Sistem pintar dengan memberi rekomendasi diagnosis, sa kasih rekomendasi diagnosis, saran obatnya, serta memberikan panduan dalam menangani pasienobat, dan panduan dalam menangani pasien berdasarkan pada pedoman medis yang paling baru secara *real-time*.
10. *Remote Patient Monitoring* (Pemantauan Klinis Jarak Jauh) integrasi data kontinual atas suatu perangkat *wearables* kemudian juga IoT medis guna memberikan pemantauan stabilitas pasiennya yang mengidap penyakit kronis pada luar rumah sakit, dilengkapi melalui alarm otomatis jika dijumpai parameter fisiologis dengan sifat abnormal.

Agar AI bisa berjalan lancar pada rumah sakit, tidaklah cukup hanya membeli teknologinya. Dibutuhkan strategi menyeluruh, mulai dari investasi jangka panjang bagi infrastruktur digital, menciptakan sistem AI yang bisa beradaptasi, sampai pada menyiapkan anggaran untuk pelatihan, maintenance, serta upgrade teknologi. Selaras melalui itu, eskalasi kapabilitas SDM di posisikan dalam menjadi hal penting lewat restrukturisasi kurikulum pendidikan kedokteran dengan basis literasi AI, pengadaan pelatihan klinis yang berkesinambungan juga standarisasi sertifikasi digital agar dapat memberikan jaminan efektivitas serta sekuritas untuk operasi sistem atas staff medis. Adanya suatu proses tersebut ikut membutuhkan manajemen transisi ataupun dikenal dengan *change management* melalui sifat inklusif lewat mengikutsertakan semua unsur fasyankes dengan mencakup perawat, dokternya, faktor medisnya, sampai pada jajaran direksi agar bisa mereduksi resistensi kepada disruptsi teknologi juga meratakan persepsi fungsi dari AI untuk kualitas pelayanan.

Pada sisi lainnya, formulasi dari kerangka regulasi dengan sifat responsif perlu secepatnya diciptakan agar memberikan jaminan kepastian hukum, dengan melingkupi kode etik dari kecerdasan buatan, batasan tanggung gugat hukumnya ataupun dikenal dengan *liability* akan suatu kekeliruan diagnostik, kemudian transparansi formulasi algoritma, lalu juga protokol audit dengan berkelanjutan kepada sistem kecerdasan artifisial yang dioperasikan. Pada lingkup kesehatan adanya internalisasi budaya dengan inovasi digital memiliki peran dalam menjadi fondasi utama sehingga AI mengalami transformasi sebagai bagian inheren atas prosedur klinis hariannya, suatu visi dengan menciptakan kepemimpinan visioner juga keterbukaan kepada suatu uji coba teknologi. Lalu diakhir, dalam penetrasi AI harus diselaraskan melalui penebalan pada sistem proteksi privasi pasiennya lewat mekanisme enkripsi yang berlapis, membatasi otorisasi AI dengan basis peran, melakukan pelacakan pada *audit trail*, serta mengevaluasi dampak yang diberikan oleh proteksi data ataupun dikenal dengan *data protection impact assessment* pra-implementasi. Dengan sinergi yang absen diantara aspek infrastruktur, pengembangan SDM kemudian tetap pengelolaan transisi, serta instrumen hukum dengan rigid memberikan risiko dengan menjebak fasyankes di dalam adopsi parsial di mana tidak berhasil memberi keikutsertaan puncak untuk kualitas pelayanan kesehatan (Suriadi *et al.*, n.d.).

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, A. F., Administrasi, D., Kesehatan, K., Masyarakat, K., & Airlangga, U. (2025). *HAMBATAN IMPLEMENTASI REKAM MEDIS ELEKTRONIK DI INDONESIA MENGGUNAKAN HOT-FIT MODEL : LITERATURE REVIEW*. 6(1).
- Chow, W., Venkataraman, N., Oh, H. C., Ramanathan, S., Sridharan, S., Arish, S. M., Wong, K. C., Hay, K. K. X., Hoo, J. F., Tan, W. H. L., & Liew, C. J. Y. (2025). Building an artificial intelligence and digital ecosystem: a smart hospital's data-driven path to healthcare excellence. *Singapore Medical Journal*, 66, S75–S83. <https://doi.org/10.4103/singaporemedj.SMJ-2025-066>
- Izza, A. Al, & Lailiyah, S. (2024). Kajian Literatur: Gambaran Implementasi Rekam Medis Elektronik di Rumah Sakit Indonesia berdasarkan Permenkes Nomor 24 Tahun 2022 tentang Rekam Medis. *Media Gizi Kemas*, 13(1), 549–562. <https://doi.org/10.20473/mgk.v13i1.2024.549-562>
- Loria, G., Nayak, Y., & Nishit, N. (2024). A Comprehensive Analysis of Smart Hospital Technologies and Applications – Our Experience and Narrative Review of Literature. *Apollo Medicine*, 21(3), 245–249. <https://doi.org/10.1177/09760016241240006>
- Pirma Ivan Ricky Manurung, & Marice Simarmata. (2025). Digitalisasi Layanan Kesehatan: Tantangan Etika dan Keamanan Data Pasien. *Presidensial: Jurnal Hukum, Administrasi Negara, Dan Kebijakan Publik*, 2(2), 263–273. <https://doi.org/10.62383/presidensial.v2i2.811>

- Putra, B. R., Rosyidah, R., & Hariyono, W. (2024). Analisis Penerapan Rekam Medis Elektronik pada Klinik Utama Bunafsi di Kabupaten Wonogiri. *MAHESA : Malahayati Health Student Journal*, 4(10), 4416–4425. <https://doi.org/10.33024/mahesa.v4i10.15187>
- Sendlhofer, G. (2025). Smart Hospital. *Wiener Klinisches Magazin*, 28(3), 34–39. <https://doi.org/10.1007/s00740-025-00556-4>
- Sikki, N., Wulandari, D. P., Hidayat, G. R., Fallah, K., Yuzda, R., & Yuni, R. F. (2026). IMPLEMENTASI MODEL E-BUSINESS BUSINESS TO CONSUMER DALAM DIGITALISASI LAYANAN KESEHATAN. In *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika* (Vol. 10, Number 1).
- Studi, P., Hukum, I., Hukumuniversitas, F., & Surabaya, M. (n.d.). *Analisis Hukum Penggunaan Rekam Medis Elektronik Di Rumah Sakit Nanda Juwita*. <https://doi.org/10.36355/rlj.v6i1>
- Suriadi, H., Muhammadiyah, U., & Barat, S. (n.d.). *Pemanfaatan Teknologi AI untuk Meningkatkan Kualitas dan Responsivitas Pelayanan Publik di Era Digital Wiwin lovita*. 3(2).

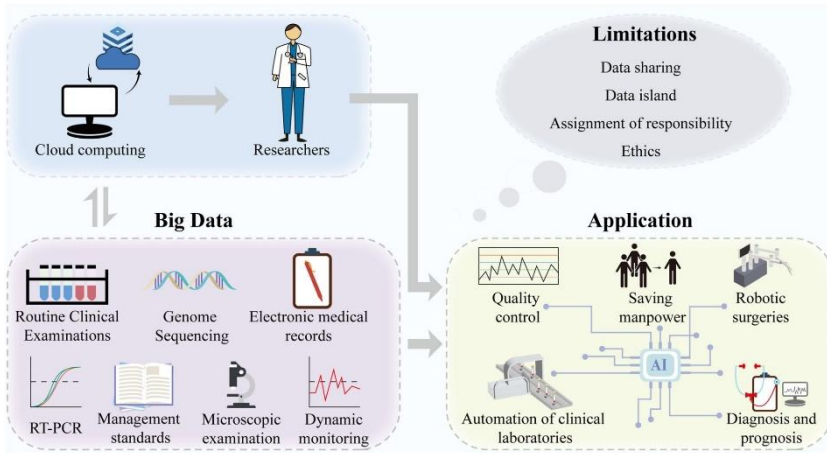
BAB 4

PERAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM LABORATORIUM DIAGNOSTIK

4.1 Pendahuluan

Diagnosis merupakan tahapan penting dalam pelayanan kesehatan karena menjadi dasar dalam penentuan terapi, prognosis, dan pengambilan keputusan klinis. Akurasi diagnosis sangat memengaruhi kualitas pelayanan kesehatan serta keselamatan pasien. Namun, kesalahan diagnosis masih menjadi tantangan global karena dapat menyebabkan keterlambatan penanganan, kesalahan terapi, hingga peningkatan risiko morbiditas dan mortalitas (World Health Organization, 2016). Di Indonesia, tantangan diagnostik semakin kompleks akibat tingginya jumlah pasien, meningkatnya kasus penyakit kronis dan infeksi, serta ketimpangan fasilitas kesehatan antarwilayah (Kementerian Kesehatan RI, 2023).

Metode diagnostik konvensional masih menghadapi berbagai keterbatasan, terutama dalam aspek efisiensi, kecepatan, dan pemerataan layanan. Tidak semua fasilitas kesehatan memiliki akses terhadap alat diagnostik modern maupun tenaga spesialis yang memadai, khususnya di daerah dengan keterbatasan infrastruktur kesehatan. Selain itu, interpretasi hasil pemeriksaan yang masih dilakukan secara manual berpotensi menimbulkan variasi hasil akibat faktor subjektivitas dan tingginya beban kerja tenaga kesehatan. Kondisi ini menunjukkan perlunya sistem diagnostik yang lebih cepat, konsisten, dan akurat.



Gambar 6. Keterlibatan Artificial Intelligence dalam Pengolahan Big Data di Bidang Medis
Sumber: Xie *et al.*, 2024

Perkembangan *Artificial Intelligence* (AI) memberikan peluang baru dalam mengatasi berbagai tantangan tersebut. Melalui pendekatan machine learning dan deep learning, AI mampu menganalisis data medis dalam jumlah besar secara otomatis dan mendukung interpretasi hasil laboratorium, pencitraan medis, identifikasi biomarker, hingga sistem pendukung keputusan klinis (Oduoye *et al.*, 2024; Rahman *et al.*, 2025). Pemanfaatan AI tidak hanya berpotensi meningkatkan akurasi diagnosis, tetapi juga mendukung efisiensi pelayanan kesehatan dan pemerataan layanan diagnostik, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia.

Pembahasan dalam bab ini diawali dengan pemanfaatan Artificial Intelligence (AI) dalam diagnostik laboratorium, mencakup penerapannya pada tahap pre-analytical, analytical, dan post-analytical. Selanjutnya, bab ini membahas peran AI dalam diagnostik molekuler, seperti analisis PCR dan sequencing, serta identifikasi biomarker penyakit berbasis data genomik dan transkriptomik. Bab ini juga mengulas evaluasi akurasi, sensitivitas, spesifisitas, serta tantangan validasi klinis teknologi AI diagnostik. Pada bagian akhir, dibahas pula berbagai tantangan

implementasi AI dalam sistem kesehatan serta prospek pengembangan AI diagnostik di masa depan, meliputi tren teknologi kesehatan, precision medicine, keberlanjutan sistem kesehatan, serta peluang riset dan pengembangan AI di bidang kesehatan.

4.2 Pemanfaatan Artificial Intelligence dalam Diagnostik Laboratorium

Perkembangan *Artificial Intelligence* (AI) telah membawa transformasi besar dalam bidang diagnostik laboratorium. Penerapan AI tidak lagi terbatas pada analisis hasil pemeriksaan, tetapi telah mencakup seluruh alur kerja laboratorium mulai dari tahap *pre-analytical*, *analytical*, hingga *post-analytical*. Integrasi teknologi ini bertujuan meningkatkan efisiensi kerja, mengurangi *human error*, mempercepat *turnaround time*, serta meningkatkan kualitas dan konsistensi hasil pemeriksaan laboratorium klinis. Menurut Khokhar *et al.* (2025), perkembangan AI laboratorium modern didukung oleh berbagai pendekatan seperti *machine learning*, *deep learning*, *computer vision*, dan *natural language processing* (NLP) yang memungkinkan pengolahan data laboratorium secara otomatis dan real-time.

4.2.1 Pemanfaatan AI pada Tahap Pre-Analytical

Tahap *pre-analytical* merupakan salah satu fase laboratorium yang paling rentan terhadap kesalahan karena mencakup proses pengambilan, identifikasi, transportasi, dan persiapan sampel sebelum pemeriksaan dilakukan. Kesalahan pada tahap ini dapat menyebabkan hasil pemeriksaan menjadi tidak akurat dan berpengaruh terhadap proses diagnosis pasien. Oleh karena itu, berbagai teknologi berbasis AI mulai dikembangkan untuk memperkuat kontrol kualitas dan meminimalkan kesalahan prosedural.

Pendekatan *computer vision* memungkinkan sistem laboratorium melakukan identifikasi sampel dan mendeteksi kesalahan pelabelan secara otomatis. Teknologi *optical character recognition* (OCR), misalnya, mampu mengenali ketidaksesuaian

identitas pasien pada label sampel dengan performa yang lebih konsisten dibandingkan pemeriksaan manual (Xie *et al.*, 2024). Selain itu, model *deep learning* juga dimanfaatkan untuk mengevaluasi kualitas serum melalui analisis citra sampel darah, termasuk dalam mendeteksi hemolisis, lipemia, dan ikterus secara otomatis. Di sisi lain, pendekatan NLP mulai digunakan untuk membantu proses *sample rejection* dan identifikasi data laboratorium yang tidak sesuai.

Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa AI berperan penting dalam meningkatkan standardisasi proses laboratorium yang selama ini masih sangat bergantung pada ketelitian operator. Integrasi *computer vision*, OCR, dan sistem *anomaly detection* memungkinkan identifikasi kesalahan dilakukan secara lebih cepat dan konsisten dibandingkan metode manual. Selain meningkatkan efisiensi kerja, pendekatan ini juga berpotensi menurunkan risiko kesalahan diagnosis akibat kesalahan identifikasi sampel yang selama ini menjadi salah satu sumber utama *laboratory error*.

4.2.2 Pemanfaatan AI pada Tahap Analytical

Pada tahap analytical, AI banyak digunakan untuk membantu interpretasi hasil pemeriksaan, mengenali pola abnormal, serta mendukung otomatisasi analisis data klinis. Pendekatan machine learning dan deep learning memungkinkan sistem mempelajari pola data dalam jumlah besar sehingga dapat meningkatkan akurasi, konsistensi, dan efisiensi pemeriksaan laboratorium. Pemanfaatannya berkembang luas dalam bidang hematologi, mikrobiologi, patologi digital, hingga pengendalian mutu laboratorium.

Dalam bidang hematologi, teknologi *Convolutional Neural Network* (CNN) telah banyak digunakan untuk klasifikasi sel darah putih secara otomatis. Berbagai model *deep learning*, seperti YOLOv5, ResNet, dan *Vision Transformer*, menunjukkan performa yang sangat baik dalam mengenali morfologi sel darah pada berbagai dataset hematologi (Hasanah *et al.*, 2025). Kehadiran sistem hematologi digital ini tidak hanya meningkatkan akurasi identifikasi sel, tetapi juga membantu

mempercepat proses analisis dan mengurangi beban kerja analisis laboratorium.

Perkembangan AI juga berlangsung pesat dalam bidang patologi digital, terutama untuk mendukung deteksi kanker berbasis citra histopatologi. Berbagai model *deep learning* mulai dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan interpretasi jaringan tumor secara otomatis. Salah satu pendekatan yang banyak mendapat perhatian adalah CancerNet, yaitu model yang mengombinasikan pendekatan *convolutional*, *involutional*, dan *transformer* untuk mengenali hubungan spasial serta pola jaringan secara lebih mendalam pada citra histopatologi. Selain menunjukkan performa diagnostik yang tinggi, pengembangan model seperti CancerNet juga mulai mengintegrasikan konsep *Explainable Artificial Intelligence* (XAI) sehingga proses pengambilan keputusan algoritma menjadi lebih transparan dan mudah dipahami oleh klinisi. Perkembangan ini menunjukkan bahwa AI diagnostik tidak hanya berfokus pada peningkatan performa algoritma, tetapi juga mulai mempertimbangkan aspek interpretabilitas dan penerimaan klinis.

Dalam bidang mikrobiologi klinis, AI dimanfaatkan untuk membantu identifikasi patogen dan deteksi resistensi antimikroba. Integrasi AI dengan teknologi seperti MALDI-TOF dan mikroskopi digital terbukti mampu meningkatkan sensitivitas identifikasi mikroorganisme sekaligus mempercepat proses analisis laboratorium (Ghedia *et al.*, 2026). Pendekatan berbasis CNN juga digunakan untuk meningkatkan deteksi malaria dan basil tahan asam pada pemeriksaan mikroskopi digital. Perkembangan tersebut menunjukkan arah transformasi mikrobiologi klinis menuju sistem diagnostik infeksi yang lebih cepat, otomatis, dan presisi. Teknologi ini menjadi semakin penting di tengah meningkatnya kasus resistensi antimikroba yang memerlukan identifikasi dini dan akurat guna mendukung pemberian terapi yang tepat.

AI juga mulai berperan penting dalam pengendalian mutu laboratorium melalui pendekatan prediktif berbasis *machine learning*. Berbeda dengan metode konvensional yang cenderung bersifat reaktif, sistem berbasis AI memungkinkan deteksi dini terhadap penyimpangan *Internal Quality Control* (IQC) sebelum

kegagalan sistem benar-benar terjadi. Algoritma seperti *Random Forest* menunjukkan performa yang baik dalam memprediksi kondisi penyimpangan kontrol kualitas (*out-of-control*) berdasarkan data pengendalian mutu laboratorium. Pendekatan prediktif tersebut menunjukkan perubahan paradigma pengendalian mutu laboratorium dari sistem yang reaktif menuju sistem yang lebih proaktif. Dengan kemampuan mendeteksi potensi kesalahan lebih awal, AI tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional laboratorium, tetapi juga memperkuat aspek keselamatan pasien dan keandalan hasil diagnostik.

Selain itu, AI juga dimanfaatkan untuk mendukung otomatisasi validasi hasil laboratorium melalui pengenalan pola data pemeriksaan. Berbagai algoritma berbasis pohon keputusan (*tree-based algorithm*) menunjukkan performa yang baik dalam sistem verifikasi otomatis laboratorium, termasuk dalam mengurangi kebutuhan peninjauan mikroskopis manual dan mempercepat proses validasi hasil pemeriksaan (Xie *et al.*, 2024). Integrasi teknologi ini berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi sekaligus menjaga konsistensi kualitas hasil laboratorium.

4.2.3 Pemanfaatan AI pada Tahap Post-Analytical

Tahap *post-analytical* mencakup interpretasi hasil pemeriksaan, validasi laporan, serta penyampaian informasi laboratorium kepada klinisi. Pada fase ini, AI berperan dalam mendukung interpretasi data dan pengambilan keputusan klinis secara lebih cepat, konsisten, dan terintegrasi. Pendekatan berbasis *Natural Language Processing (NLP)* mulai digunakan untuk membantu otomatisasi pelaporan hasil laboratorium dan identifikasi hasil abnormal secara lebih efisien. Teknologi ini memungkinkan sistem mengenali pola tertentu dalam laporan laboratorium serta membantu penyusunan laporan yang lebih terstandarisasi. Selain itu, penerapan *Clinical Decision Support System (CDSS)* memungkinkan integrasi data laboratorium dengan data klinis pasien secara lebih komprehensif sehingga mendukung proses pengambilan keputusan medis yang lebih tepat (Khokhar *et al.*, 2025).

Sistem berbasis AI juga dapat memberikan peringatan otomatis terhadap hasil pemeriksaan kritis yang memerlukan tindakan medis segera. Pendekatan ini membantu mempercepat komunikasi antara laboratorium dan klinisi, terutama pada kondisi kegawatdaruratan yang membutuhkan respons cepat. Dengan kemampuan mengolah data dalam jumlah besar secara real-time, AI berpotensi meningkatkan efisiensi interpretasi hasil sekaligus mengurangi risiko keterlambatan pelaporan.

Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa peran AI dalam laboratorium tidak hanya terbatas pada aspek teknis pemeriksaan, tetapi juga mulai berkontribusi dalam mendukung pengambilan keputusan klinis berbasis evidence. Integrasi data laboratorium dengan sistem CDSS memungkinkan interpretasi hasil yang lebih komprehensif, khususnya pada kasus klinis kompleks dengan volume data yang besar dan dinamis.

4.3 Pemanfaatan Artificial Intelligence dalam Diagnostik Molekuler

Perkembangan teknologi sequencing berkapasitas tinggi menghasilkan data molekuler dalam jumlah sangat besar dan kompleks, mulai dari genomik, transkriptomik, hingga metagenomik. Kondisi ini mendorong pemanfaatan Artificial Intelligence (AI) untuk membantu analisis data secara lebih cepat, akurat, dan terintegrasi. AI tidak hanya digunakan untuk mempercepat pengolahan data sequencing, tetapi juga mendukung interpretasi varian genetik, identifikasi biomarker penyakit, hingga deteksi dini berbagai penyakit berbasis multi-omics. Integrasi machine learning dan deep learning dalam diagnostik molekuler memungkinkan sistem mengenali pola biologis yang sulit dianalisis menggunakan pendekatan konvensional sehingga berpotensi meningkatkan presisi diagnosis dan personalisasi terapi, sebagaimana dijelaskan oleh Pranandi dan Tjhay (2025) dalam kajiannya mengenai AI molekuler.

4.3.1 AI pada Analisis PCR dan Sequencing

Pemanfaatan AI pada analisis PCR dan sequencing berkembang pesat seiring meningkatnya penggunaan teknologi Next Generation Sequencing (NGS) dan long-read sequencing dalam diagnostik molekuler. AI digunakan untuk membantu berbagai tahapan pengolahan data sequencing, mulai dari quality control, basecalling, assembly, hingga interpretasi hasil sequencing. Pendekatan ini menjadi penting karena data sequencing modern memiliki volume besar, kompleks, dan sering mengandung error yang sulit ditangani secara manual.

Mubaraki (2026) menjelaskan bahwa model berbasis transformer dan convolutional neural network (CNN), seperti DeepConsensus dan MSRCall, mampu meningkatkan akurasi basecalling pada platform Oxford Nanopore dan PacBio sekaligus menurunkan tingkat error pembacaan long-read sequencing. Selain meningkatkan akurasi, AI juga digunakan untuk quality control otomatis guna mendeteksi data sequencing berkualitas rendah dan melakukan koreksi error secara real-time.

Dalam analisis metagenomik, machine learning dan deep learning dimanfaatkan untuk proses assembly dan binning genom mikroba. Model seperti VAMB dan SemiBin2 mampu mengelompokkan fragmen genom berdasarkan pola sekuens dan kelimpahan data secara lebih efisien dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini membantu identifikasi mikroorganisme, analisis mikrobioma, dan surveilans resistensi antimikroba secara lebih akurat, sebagaimana dilaporkan oleh Mubaraki (2026) serta Khangarot dan kolega (2026).

AI juga diterapkan pada analisis qPCR dan digital PCR (dPCR), terutama untuk interpretasi amplification curve dan melt curve. Menurut Pranandi dan Tjhay (2025), machine learning mampu membedakan true amplification dan technical artifact sehingga meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas pemeriksaan molekuler. Teknologi ini banyak dimanfaatkan pada deteksi penyakit infeksi, pemantauan viral load, serta identifikasi minimal residual disease.

Secara umum, penerapan AI pada PCR dan sequencing menunjukkan transformasi diagnostik molekuler menuju sistem

analisis yang lebih otomatis, cepat, dan presisi. Integrasi AI memungkinkan pengolahan data sequencing berskala besar dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan analisis manual. Namun demikian, kualitas data input, standardisasi pipeline bioinformatika, dan validasi klinis tetap menjadi faktor penting agar hasil analisis AI dapat diterapkan secara andal dalam praktik diagnostik.

4.3.2 Pemanfaatan AI dalam Analisis Data Genomik

AI memiliki peran penting dalam analisis data genomik dan transkriptomik karena kedua jenis data ini bersifat kompleks, berdimensi tinggi, dan memerlukan interpretasi mendalam. Dalam genomik, machine learning digunakan untuk membantu identifikasi dan interpretasi varian genetik berdasarkan pathogenicity score, anotasi fungsional, serta frekuensi populasi. Pranandi dan Tjhay (2025) menjelaskan bahwa deep learning mampu membedakan varian benign dan pathogenic secara lebih cepat sehingga dapat mengurangi beban kurasi manual pada pemeriksaan genomik klinis.

Pemanfaatan AI juga berkembang pada diagnosis penyakit genetik langka. Sharma (2025) menyebutkan bahwa sistem seperti AI-MARRVEL dan SHEPHERD digunakan untuk menganalisis hubungan antara fenotipe klinis dan data genomik dalam identifikasi gen penyebab penyakit. Pendekatan ini memungkinkan analisis ribuan varian genetik dalam waktu singkat dan membantu meningkatkan efisiensi diagnosis penyakit hereditas yang sebelumnya sulit diidentifikasi menggunakan metode konvensional.

Pada bidang transkriptomik, AI diterapkan untuk menganalisis data RNA-seq guna mengidentifikasi pola ekspresi gen, jaringan co-expression, serta biomarker berbasis non-coding RNA. Algoritma seperti Support Vector Machine (SVM), Random Forest, dan deep neural network digunakan untuk klasifikasi penyakit dan prediksi respons terapi berdasarkan profil ekspresi gen pasien. Selain itu, AI juga mendukung analisis epigenetik seperti DNA methylation dan chromatin accessibility untuk deteksi dini kanker dan penyakit metabolik.

Dalam analisis metagenomik dan mikrobioma, AI digunakan untuk klasifikasi spesies mikroba, identifikasi resistensi antimikroba, serta prediksi fenotipe penyakit berbasis microbiome profiling. Khangarot dan kolega (2026) menjelaskan bahwa model transformer seperti DNABERT memiliki kemampuan tinggi dalam mengenali pola sekuens DNA dan mengelompokkan spesies mikroba secara lebih akurat dibandingkan pendekatan machine learning konvensional.

Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa AI telah menjadi komponen penting dalam interpretasi data genomik dan transkriptomik modern. Kemampuan AI dalam menganalisis data multidimensi memungkinkan identifikasi pola biologis yang sulit dikenali secara manual sehingga mendukung pengembangan precision medicine dan diagnostik personalisasi. Meski demikian, keberhasilan model AI tetap bergantung pada kualitas dataset, keberagaman populasi, serta interpretabilitas algoritma agar hasil analisis dapat diterapkan secara klinis dan etis.

4.3.3 Identifikasi Biomarker Penyakit Berbasis AI

Pemanfaatan AI dalam identifikasi biomarker penyakit berkembang melalui integrasi berbagai data biologis seperti genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik, dan epigenomik. Pendekatan multi-omics memungkinkan sistem AI menganalisis hubungan kompleks antarbiomolekul untuk menemukan biomarker yang berkaitan dengan diagnosis, prognosis, maupun respons terapi penyakit. Sharma menjelaskan bahwa integrasi multi-omics berbasis AI menjadi salah satu pendekatan penting dalam pengembangan precision medicine modern.

Machine learning dan deep learning telah banyak digunakan untuk mengidentifikasi biomarker kanker berbasis data sequencing dan ekspresi gen. Dalam bidang onkologi, AI mampu mengenali pola mutasi genetik, perubahan ekspresi gen, serta kelainan kromosom yang berkaitan dengan berbagai sub tipe kanker. Pranandi dan Tjhay (2025) menekankan bahwa integrasi multi-omics membantu meningkatkan akurasi

klasifikasi tumor sekaligus mendukung pemilihan terapi yang lebih personal.

Salah satu perkembangan penting adalah penggunaan liquid biopsy berbasis circulating tumor DNA (ctDNA). Sharma menjelaskan bahwa deep learning dapat menganalisis data sequencing ctDNA dari sampel darah untuk mendeteksi keberadaan kanker secara non-invasif. Teknologi ini menunjukkan potensi besar dalam deteksi dini kanker, pemantauan progresivitas penyakit, dan evaluasi respons terapi tanpa memerlukan biopsi jaringan yang invasif.

Selain kanker, AI juga digunakan untuk identifikasi biomarker penyakit infeksi, metabolik, dan neurologis. Analisis microbiome berbasis AI mampu mengidentifikasi microbial signatures yang berkaitan dengan penyakit gastrointestinal, gangguan metabolik, hingga penyakit hati. Beberapa studi yang dibahas oleh Khangarot dan kolega (2026) menunjukkan bahwa kombinasi data mikrobioma dengan data klinis pasien dapat meningkatkan performa prediksi penyakit secara signifikan.

Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa AI tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis data, tetapi juga menjadi pendekatan penting dalam penemuan biomarker penyakit yang lebih sensitif dan personal. Integrasi multi-omics berbasis AI berpotensi memperkuat diagnosis presisi serta mendukung pemilihan terapi yang lebih individual. Namun demikian, standarisasi data, validasi klinis, dan representasi populasi yang beragam tetap diperlukan agar biomarker berbasis AI dapat diterapkan secara luas dalam praktik klinis.

4.4 Analisis Akurasi, Efektivitas, dan Tantangan Validasi AI Diagnostik

Perkembangan *artificial intelligence* (AI) dalam bidang diagnostik menunjukkan peningkatan performa yang sangat signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai penelitian memperlihatkan bahwa sistem AI mampu mencapai sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi yang setara bahkan melampaui metode diagnostik konvensional pada tugas-tugas tertentu. Namun,

tingginya performa teknis tersebut belum sepenuhnya menjamin kesiapan implementasi klinis secara luas karena masih terdapat tantangan terkait validasi, generalisasi model, serta risiko bias algoritmik.

4.4.1 Sensitivitas, Spesifisitas, dan Akurasi

Berbagai studi menunjukkan bahwa AI memiliki performa diagnostik yang sangat tinggi dalam beragam cabang kedokteran laboratorium dan patologi digital. McGenity dan kolega (2024) melaporkan rerata sensitivitas sebesar 96,3% dan spesifisitas sebesar 93,3% pada puluhan studi AI diagnostik yang dianalisis. Performa terbaik ditemukan pada bidang uro pathology dan gastrointestinal pathology, sedangkan breast pathology cenderung menunjukkan performa yang lebih rendah dibandingkan subspecialty lainnya. Menariknya, model yang menggunakan external validation secara konsisten menunjukkan performa lebih baik dibandingkan model tanpa validasi eksternal, yang menandakan pentingnya keberagaman data dalam meningkatkan reliabilitas AI.

Performa tinggi juga terlihat pada bidang mikrobiologi klinik. Ghedia dan kolega (2026) menunjukkan bahwa algoritma *machine learning* dan *deep learning* mampu mencapai sensitivitas dan spesifisitas hingga 85–99% dalam identifikasi patogen berbasis MALDI-TOF maupun mikroskopi otomatis. Selain meningkatkan akurasi, AI juga mempercepat waktu diagnosis secara signifikan, termasuk pada prediksi *antimicrobial resistance* (AMR) yang menunjukkan performa lebih baik dibandingkan pendekatan *machine learning* tradisional. Perkembangan ini menunjukkan bahwa AI tidak hanya meningkatkan kemampuan identifikasi mikroorganisme, tetapi juga mendukung respons klinis yang lebih cepat terhadap penyakit infeksi.

Pada bidang hematologi, Gasparin dan kolega (2022) menunjukkan bahwa sistem *point-of-care* berbasis AI memiliki korelasi yang sangat kuat dengan alat hematologi standar, dengan sebagian besar parameter menunjukkan nilai korelasi di atas 0,9. Sistem ini juga memiliki sensitivitas dan spesifisitas tinggi dalam

mendeteksi abnormalitas hematologi, sehingga memperlihatkan potensi AI untuk mendukung pemeriksaan laboratorium yang cepat, portabel, dan efisien.

Sementara itu, pada klasifikasi sel darah putih berbasis citra mikroskopik, Hasanah dan kolega (2025) menjelaskan bahwa pendekatan *deep learning*, khususnya *convolutional neural network* (CNN), mendominasi penelitian karena mampu menghasilkan akurasi sangat tinggi, bahkan mendekati 100% pada beberapa model. Model hybrid seperti YOLOv5 dan CNN juga menunjukkan kemampuan deteksi *real-time* dengan performa yang sangat baik, sedangkan metode *machine learning* tradisional seperti *support vector machine* (SVM) dan *random forest* umumnya memiliki performa yang lebih rendah.

Meskipun demikian, Prasetya dan Edward (2025) mengingatkan bahwa tingginya nilai akurasi atau AUROC tidak otomatis menjamin manfaat klinis yang nyata. Beberapa sistem AI memang mampu menyamai atau melampaui performa klinisi pada tugas diagnostik spesifik, seperti deteksi retinopati diabetik, klasifikasi aritmia, maupun skrining kanker payudara. Namun, keberhasilan teknis tersebut tetap harus dievaluasi berdasarkan dampaknya terhadap alur kerja klinis, keselamatan pasien, dan luaran kesehatan secara keseluruhan.

4.4.2 Validasi Klinis Teknologi AI

Walaupun performa AI terlihat sangat menjanjikan, sebagian besar penelitian masih menghadapi keterbatasan pada aspek validasi klinis. McGenity dan kolega (2024) menemukan bahwa hanya sebagian kecil studi yang melakukan external validation maupun prospective clinical trial. Mayoritas penelitian masih menggunakan sumber data yang terbatas sehingga terdapat kemungkinan bahwa data pelatihan dan pengujian memiliki karakteristik yang terlalu mirip. Kondisi ini meningkatkan risiko overestimation terhadap performa model.

Permasalahan serupa juga ditemukan pada berbagai studi klasifikasi sel darah putih berbasis AI. Hasanah dan kolega (2025) menyoroti bahwa sebagian besar model hanya diuji pada dataset yang sama dengan data pelatihannya. Validasi lintas

laboratorium dan populasi pasien masih jarang dilakukan sehingga kemampuan generalisasi model di dunia nyata belum dapat dipastikan sepenuhnya. Selain itu, beberapa penelitian tidak melaporkan ukuran dataset, asal data, maupun standar pelabelan secara jelas sehingga menyulitkan proses replikasi dan evaluasi lintas studi.

Dalam mikrobiologi klinik, tantangan validasi juga berkaitan dengan standarisasi data. Ghedia dan kolega (2026) menjelaskan bahwa variasi pada proses pengambilan spesimen, preparasi sampel, hingga metode analisis dapat memengaruhi transferabilitas model AI antar institusi. Akibatnya, sistem AI yang menunjukkan performa sangat baik di satu fasilitas kesehatan belum tentu memberikan hasil yang sama ketika diterapkan pada populasi dan lingkungan klinis yang berbeda.

Prasetya dan Edward (2025) menegaskan bahwa sebagian besar penelitian AI diagnostik saat ini masih bersifat retrospektif dan *single-center*. Mereka menempatkan *external validation* dan *prospective trial* sebagai indikator utama kesiapan translasi klinis AI. Salah satu tantangan terbesar adalah fenomena *dataset shift*, yaitu perubahan distribusi data antara fase pelatihan dan implementasi klinis. Perbedaan karakteristik pasien, perangkat medis, maupun protokol klinis dapat menyebabkan penurunan performa model secara signifikan ketika digunakan di lingkungan nyata.

Meskipun demikian, beberapa bidang telah menunjukkan perkembangan validasi yang lebih matang. Dalam oftalmologi, misalnya, AI untuk deteksi retinopati diabetik telah memiliki bukti *prospective trial* dan bahkan diterapkan secara otonom pada layanan primer. Contoh ini menunjukkan bahwa translasi klinis AI dapat dicapai apabila didukung validasi yang kuat, keberagaman dataset, dan pemantauan performa yang berkelanjutan.

4.4.3 Keunggulan dan Keterbatasan AI dalam Diagnostik

AI menawarkan berbagai keunggulan dalam diagnostik medis, terutama dari segi kecepatan, efisiensi, dan konsistensi analisis. Pada mikrobiologi klinik, AI mampu mempercepat

turnaround time dari hitungan hari menjadi jam sekaligus mengurangi beban kerja laboratorium melalui otomatisasi pemeriksaan. Dalam hematologi, sistem berbasis AI memungkinkan pemeriksaan dilakukan secara cepat menggunakan perangkat portabel dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan instrumen konvensional.

Selain meningkatkan efisiensi, AI juga membantu mengurangi subjektivitas dan variasi antar pemeriksa. Hasanah dan kolega menjelaskan bahwa sistem klasifikasi leukosit berbasis *deep learning* menghasilkan interpretasi yang lebih konsisten dan reproduktif dibandingkan pemeriksaan manual. Dalam konteks klinis, AI juga berpotensi mendukung skrining, triase pasien, dan *early warning systems* karena mampu menganalisis data dalam jumlah besar secara cepat dan berkesinambungan.

Namun, di balik berbagai keunggulan tersebut, terdapat sejumlah keterbatasan penting yang masih menjadi perhatian utama. Salah satu isu terbesar adalah risiko bias algoritmik dan *overfitting*. McGenity dan kolega (2024) menemukan bahwa hampir seluruh studi yang dianalisis memiliki setidaknya satu area dengan *high risk* atau *unclear risk of bias*, terutama pada proses seleksi pasien dan metode validasi. Banyak penelitian menggunakan dataset yang tidak representatif sehingga model berpotensi menghasilkan performa yang terlalu optimistis.

Prasetya dan Edward (2025) menekankan bahwa bias algoritmik bukan sekadar persoalan teknis, tetapi juga berkaitan dengan etika dan keadilan kesehatan. Model AI yang dilatih menggunakan dataset yang kurang beragam dapat menunjukkan performa berbeda pada kelompok populasi tertentu dan berpotensi memperkuat ketimpangan layanan kesehatan yang telah ada sebelumnya.

Tantangan lain yang sering dibahas adalah keterbatasan *explainability* atau fenomena *black box*. Menurut Ghedia dan kolega (2026), banyak model *deep learning* menghasilkan keputusan yang sulit dijelaskan secara transparan kepada klinisi. Kondisi ini dapat menurunkan tingkat kepercayaan tenaga kesehatan terhadap sistem AI, terutama pada situasi diagnostik yang membutuhkan pertanggungjawaban klinis yang jelas.

Selain itu, risiko *false positive* dan *false negative* tetap menjadi perhatian penting. Walaupun sebagian besar model menunjukkan sensitivitas dan spesifisitas tinggi, performa antar aplikasi masih sangat bervariasi. *False positive* dapat meningkatkan beban layanan kesehatan melalui pemeriksaan tambahan yang tidak diperlukan, sedangkan *false negative* berisiko menyebabkan keterlambatan diagnosis dan penanganan pasien.

Keterbatasan lainnya meliputi kurangnya standardisasi *preprocessing* data, heterogenitas desain penelitian, keterbatasan dataset dunia nyata, serta integrasi yang belum optimal dengan sistem laboratorium dan rekam medis yang sudah ada. Oleh karena itu, banyak peneliti menekankan bahwa AI sebaiknya diposisikan sebagai alat pendukung keputusan klinis, bukan sebagai pengganti penuh tenaga kesehatan.

Secara keseluruhan, bukti yang ada menunjukkan bahwa AI memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas diagnostik medis melalui peningkatan akurasi, efisiensi, dan kecepatan analisis. Namun, keberhasilan implementasi klinis jangka panjang tetap bergantung pada kualitas validasi, kemampuan generalisasi model, transparansi algoritme, serta tata kelola dan regulasi yang memadai.

4.5 Masa Depan Artificial Intelligence dalam Diagnosis Penyakit

4.5.1 Tren Teknologi Kesehatan Masa Depan

Perkembangan *artificial intelligence* (AI) diperkirakan akan terus mengubah sistem diagnostik kesehatan menuju pendekatan yang lebih terintegrasi, real-time, dan berbasis data multidimensi. Salah satu tren utama adalah berkembangnya *multimodal AI*, yaitu sistem AI yang mampu mengintegrasikan berbagai jenis data kesehatan secara simultan, seperti data laboratorium, citra medis, sinyal fisiologis, rekam medis elektronik (*electronic health records* / EHR), hingga data genomik.

Pendekatan ini meniru proses berpikir klinisi yang mempertimbangkan berbagai sumber informasi sebelum menentukan diagnosis maupun terapi. Menurut Yuan *et al.* (2024), integrasi multimodal memungkinkan sistem AI menghasilkan interpretasi klinis yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu jenis data saja.

Perkembangan teknologi komputasi awan (*cloud computing*) dan basis data berskala petabyte juga menjadi fondasi penting dalam transformasi diagnostik modern. Rahman *et al.* (2025) menjelaskan bahwa analisis data pasien dalam skala sangat besar dapat dilakukan hanya dalam hitungan menit menggunakan ribuan prosesor secara paralel. Teknologi ini memungkinkan pengolahan *medical big data*, analisis bioinformatika *next-generation sequencing* (NGS), hingga integrasi data laboratorium secara real-time untuk mendukung pengambilan keputusan klinis yang lebih cepat dan akurat.

Selain itu, AI diprediksi semakin banyak diterapkan pada sistem *real-time diagnostics* dan *point-of-care testing* (POCT). Sistem diagnostik berbasis AI memungkinkan interpretasi otomatis terhadap data pemeriksaan langsung di lokasi pelayanan kesehatan tanpa harus menunggu analisis laboratorium terpusat. Dalam bidang pencitraan medis dan patologi digital, AI telah digunakan untuk *automated image screening*, identifikasi sel patologis, dan *microscopic disease diagnostics*. Teknologi ini berpotensi mempercepat diagnosis sekaligus meningkatkan akses layanan kesehatan, terutama di daerah dengan keterbatasan tenaga ahli. Dengan demikian, arah perkembangan teknologi kesehatan masa depan menunjukkan transformasi menuju sistem diagnostik yang lebih otomatis, terkoneksi, adaptif, dan berbasis integrasi data multidimensi.

4.5.2 Precision Medicine dan Personalized Diagnostics

Perkembangan AI turut mempercepat transisi menuju *precision medicine* dan *personalized diagnostics*, yaitu pendekatan

medis yang menyesuaikan diagnosis dan terapi berdasarkan karakteristik biologis individu. Rahman *et al.* (2025) menyebutkan bahwa AI memiliki potensi besar untuk menjadikan *personalized medicine* sebagai standar pelayanan kesehatan masa depan melalui integrasi berbagai sumber data klinis dan molekuler.

Salah satu fondasi utama *precision medicine* adalah integrasi data multi-omics, seperti genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik, dan epigenomik. AI memungkinkan analisis hubungan kompleks antar biomolekul dalam jumlah besar sehingga dapat mengidentifikasi biomarker penyakit, memprediksi progresivitas penyakit, serta menentukan terapi yang paling sesuai bagi pasien. Yuan *et al.* (2024) menjelaskan bahwa model *multimodal fusion* yang menggabungkan data metagenomik, metabolomik, dan metadata klinis menunjukkan performa prediksi yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan berbasis satu modalitas data.

Dalam bidang genomik, perkembangan *transformer models* dan *foundation models* semakin memperluas kemampuan AI dalam analisis sekuens DNA dan RNA. Algoritma berbasis transformer telah digunakan untuk anotasi genom otomatis, identifikasi *protein-binding sites*, hingga interpretasi varian genetik secara lebih akurat. Integrasi data genomik dengan EHR dan hasil pemeriksaan laboratorium memungkinkan sistem AI menghasilkan prediksi risiko penyakit dan respons terapi secara lebih personal.

Selain itu, perkembangan *liquid biopsy* berbasis *circulating tumor DNA* (ctDNA) diperkirakan menjadi salah satu inovasi penting dalam diagnostik kanker masa depan. AI mampu menganalisis data sequencing ctDNA untuk mendeteksi keberadaan kanker secara non-invasif, bahkan pada stadium awal penyakit. Teknologi ini memiliki potensi besar dalam skrining kanker, pemantauan progresivitas penyakit, dan

evaluasi respons terapi tanpa memerlukan biopsi jaringan invasif.

Secara keseluruhan, perkembangan AI menunjukkan bahwa masa depan diagnostik akan semakin mengarah pada pendekatan presisi berbasis integrasi multi-omics, analisis genomik, dan interpretasi biologis yang mendalam. Transformasi ini berpotensi meningkatkan efektivitas terapi, mengurangi variasi respons pengobatan, serta mendukung pengembangan pelayanan kesehatan yang lebih personal dan prediktif.

4.5.3 AI dan Sustainability Sistem Kesehatan

Perkembangan AI dalam kesehatan tidak hanya berfokus pada peningkatan performa diagnostik, tetapi juga pada keberlanjutan (*sustainability*) sistem kesehatan secara global. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah *federated learning* (FL), yaitu metode pelatihan model AI secara terdistribusi tanpa perlu memindahkan data pasien dari masing-masing institusi. Pendekatan ini memungkinkan kolaborasi antar rumah sakit atau laboratorium sambil tetap menjaga privasi data pasien. Yuan *et al.* (2024) menjelaskan bahwa FL telah digunakan untuk prediksi resistensi antimikroba lintas rumah sakit dengan hasil yang menjanjikan.

Untuk memperkuat keamanan data, berbagai mekanisme *privacy-preserving AI* seperti *homomorphic encryption* dan *differential privacy* mulai dikembangkan. Teknologi ini memungkinkan proses analisis dan pelatihan model dilakukan tanpa membuka data asli pasien. Namun, pendekatan tersebut masih menghadapi tantangan berupa peningkatan kebutuhan komputasi dan kompleksitas implementasi.

Isu pemerataan akses teknologi juga menjadi perhatian penting dalam pengembangan AI kesehatan global, terutama di negara berpendapatan rendah dan menengah (*low- and middle-income countries* / LMICs). Oduoye *et al.* (2024) menjelaskan

bahwa banyak laboratorium di LMICs masih menghadapi keterbatasan infrastruktur, konektivitas internet, sumber daya komputasi, serta tenaga ahli yang memahami AI dan bioinformatika. Selain itu, sistem informasi kesehatan yang terfragmentasi dan kurangnya interoperabilitas EHR menjadi hambatan utama dalam pengembangan AI berbasis data besar.

Meskipun demikian, beberapa implementasi AI di LMICs telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Penggunaan AI untuk deteksi tuberkulosis melalui analisis foto toraks di India, identifikasi malaria berbasis mikroskopi digital di Kenya, serta prediksi resistensi antibiotik di Brasil menunjukkan bahwa AI dapat membantu mengatasi keterbatasan sumber daya dan meningkatkan akses diagnostik di wilayah dengan tenaga spesialis terbatas.

Untuk mendukung keberlanjutan sistem kesehatan berbasis AI, diperlukan investasi pada infrastruktur digital, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, serta pengembangan standar interoperabilitas data. Selain itu, kolaborasi antara pemerintah, institusi kesehatan, organisasi internasional, dan penyedia teknologi menjadi faktor penting dalam memastikan implementasi AI berlangsung secara inklusif dan berkelanjutan. Dengan demikian, masa depan AI dalam kesehatan tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan algoritma, tetapi juga oleh kemampuan sistem kesehatan dalam membangun ekosistem digital yang adil, aman, dan dapat diakses secara global.

4.5.4 Peluang Riset dan Pengembangan AI Kesehatan

Perkembangan AI membuka berbagai peluang riset baru dalam bidang kesehatan, terutama terkait pengembangan *foundation models*, *explainable AI* (XAI), dan kerangka regulasi AI medis. Salah satu arah perkembangan utama adalah penggunaan *foundation models* yang mampu memproses berbagai jenis data, seperti teks, citra medis, sinyal fisiologis, dan data genomik,

dalam satu arsitektur terpadu. Yuan *et al.* (2024) menjelaskan bahwa model ini berpotensi merevolusi proses *data preparation*, *feature engineering*, dan pengembangan model AI kesehatan.

Kemampuan *zero-shot learning* pada *foundation models* memungkinkan sistem AI melakukan tugas tertentu tanpa pelatihan tambahan yang ekstensif. Pendekatan ini diperkirakan dapat mempercepat pengembangan aplikasi AI medis dan mengurangi kebutuhan sumber daya komputasi pada beberapa skenario klinis. Selain itu, integrasi *large language models* dengan data klinis membuka peluang pengembangan sistem pendukung keputusan medis yang lebih interaktif dan adaptif.

Aspek interpretabilitas juga menjadi fokus penting dalam penelitian AI kesehatan. Banyak model *deep learning* masih bersifat *black box* sehingga proses pengambilan keputusan sulit dipahami oleh klinisi. Oleh karena itu, pengembangan XAI bertujuan meningkatkan transparansi, kepercayaan, dan akuntabilitas sistem AI. Menurut Rahman *et al.* (2025), interpretabilitas akan menjadi faktor penting dalam penerimaan klinis AI di masa depan. Yuan *et al.* (2024) juga menekankan perlunya pengembangan kerangka XAI yang lebih spesifik terhadap konteks medis, termasuk mikrobiologi klinis dan genomik.

Selain aspek teknis, pengembangan kerangka regulasi AI kesehatan juga menjadi area riset yang sangat penting. Berbagai pedoman seperti CONSORT-AI, SPIRIT-AI, dan TRIPOD+AI mulai dikembangkan untuk meningkatkan transparansi pelaporan dan validasi model AI medis. Namun, regulasi spesifik untuk beberapa bidang, seperti mikrobiologi berbasis AI dan surveilans metagenomik, masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian mengenai tata kelola, validasi klinis, keamanan data, dan standar etika AI diperkirakan akan terus berkembang.

Peluang lain yang penting adalah pengembangan sistem AI yang mampu melakukan *automated data preparation*. Yuan *et al.*

(2024) menyebutkan bahwa proses pembersihan dan persiapan data dapat mencapai 50–80% dari keseluruhan beban kerja pengembangan model AI kesehatan. Otomatisasi tahapan ini berpotensi meningkatkan efisiensi pengembangan sistem AI dan mempercepat translasi teknologi ke praktik klinis.

Secara keseluruhan, masa depan AI kesehatan menunjukkan arah menuju sistem yang lebih terintegrasi, interpretatif, dan berbasis kolaborasi manusia–mesin. AI diperkirakan tidak akan menggantikan tenaga kesehatan, melainkan berperan sebagai *cognitive partner* yang membantu klinisi dalam memahami data kompleks, meningkatkan akurasi diagnosis, dan mendukung pengambilan keputusan medis yang lebih presisi dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Gasparin, A. T., Isabel, C., Araujo, F., Schmitt, P., Cardoso, M. R., Perussolo, M. C., Caroline, T., Jesus, S. De, Santiago, E. B., Lucas, I., Silva, R., Sousa, R. G. De, Teng, F. Z., Severo, E. B., Henrique, V., Ribeiro, A., Cardoso, M. A., Silva, F. D. A., Rodrigues, C., ... Almeida, M. De. (2022). Hilab system , a new point - of - care hematology analyzer supported by the Internet of Things and Artificial Intelligence. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13913-8>
- Ghedia, B., Dhokia, G., Dave, P., & Rana, P. (2026). *The Role of Artificial Intelligence in the Evolution of Clinical and Diagnostic Microbiology : A Systematic Review*. 20(March), 131–138. <https://doi.org/10.22207/JPAM.20.1.54>
- Hasanah, A. N., Sas, O. Al, & Kosen, Y. D. (2025). *APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN WHITE BLOOD CELL CLASSIFICATION BASED ON MICROSCOPIC IMAGES: A SCOPING REVIEW*. 18(2), 144–151.
- Kementerian Kesehatan RI. (2023). *Menkes Sasar Daerah Terpencil Tingkatkan Akses Kesehatan*. <https://www.kemkes.go.id/id/menkes-sasar-daerah-terpencil-tingkatkan-akses-kesehatan>
- Khargarot, R., Kumari, V., Mishra, R., & Singh, A. (2026). *Article in Press Artificial intelligence in microbiology : implications for metagenomics , diagnostics , and AMR surveillance IN AR IN*.
- Khokhar, M., Yadav, D., & Sharma, P. (2025). *Transforming Healthcare in the Age of Artificial Intelligence : A New Era of Diagnostic Excellence in Laboratory Medicine*. 163–164.

- Mcgenity, C., Clarke, E. L., Jennings, C., Matthews, G., Freduah-agyemang, H., Stocken, D. D., & Treanor, D. (2024). *Artificial intelligence in digital pathology: a systematic review and meta-analysis of diagnostic test accuracy*. *Cmiv*. <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01106-8>
- Mubaraki, F. A. (2026). *From sequencing to intelligence : how AI is transforming metagenomics*. 2024. <https://doi.org/10.7717/peerj.21137>
- Oduoye, M. O., Muzammil, M. A., Marbell, A., Dave, T., Scott, G. Y., Ubechu, S. C., & Elebesunu, E. E. (2024). *Impacts of the advancement in artificial intelligence on laboratory medicine in low - and middle - income countries: Challenges and recommendations — A literature review*. *August 2023*, 1–11. <https://doi.org/10.1002/hsr2.1794>
- Pranandi, I., & Tjhay, F. (2025). *Artificial Intelligence and Machine Learning in Biochemical and Molecular Diagnostics: A Transformative Review of Current Applications and Future Prospects*. 11(3), 4138–4147. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.2634>
- Prasetya, F., & Edward. (2025). *Diagnosis Penyakit Menggunakan Artificial Intelligence (AI)*: *JURNAL SAINS DAN KESEHATAN (J.SAINS.KES)*, 6.1, 98–107. <https://doi.org/10.30872/jsk.v6i1.976>
- Rahman, H., Biswash, A. R., Debnath, A., & Siddique, A. B. (2025). *The Future of AI in Laboratory Medicine: Advancing Diagnostics , Personalization , and Healthcare Innovation*. 2025.
- Sharma, R. M. (2025). *Artificial intelligence in medical image analysis and molecular diagnostics: recent advances and applications*. 1–8. <https://doi.org/10.21037/jmai-24-412>
- World Health Organization. (2016). *Diagnostic Errors: Technical Series on Safer Primary Care*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241511636>

- Xie, H., Jia, Y., & Liu, S. (2024). *medicine: Advancements and challenges*. November 2023, 1–13.
<https://doi.org/10.1002/INMD.20230056>
- Yuan, H., Yu, K., Xie, F., Liu, M., & Sun, S. (2024). *Automated machine learning with interpretation: A*. June, 205–237.
<https://doi.org/10.1002/med4.75>

BAB 5

PEMANFAATAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM KESEHATAN MASYARAKAT

Surveilans, Prediksi Wabah, dan Intervensi Berbasis Data

5.1 Pendahuluan

Sistem kesehatan masyarakat saat ini menghadapi tekanan yang semakin berat. Di satu sisi, penyakit menular seperti demam berdarah, tuberkulosis, dan potensi pandemi baru masih menjadi ancaman nyata. Di sisi lain, penyakit tidak menular seperti hipertensi, diabetes melitus, penyakit kardiovaskular, dan gangguan pernapasan kronis terus meningkat dan menjadi beban kesehatan jangka panjang. Kondisi ganda ini menuntut sistem kesehatan tidak sekadar bekerja ketika masyarakat sudah jatuh sakit, melainkan mampu mendeteksi risiko lebih awal, memantau pola penyakit secara berkelanjutan, dan merancang intervensi pencegahan yang cepat serta tepat sasaran.

Dalam konteks tersebut, Artificial Intelligence (AI) atau kecerdasan buatan telah berkembang menjadi salah satu teknologi paling menjanjikan di bidang kesehatan. Secara sederhana, AI adalah teknologi yang memungkinkan komputer mengenali pola dalam data, melakukan analisis dalam jumlah besar secara otomatis, membuat prediksi, dan memberikan rekomendasi berdasarkan bukti. Penting untuk dipahami sejak awal bahwa AI bukan pengganti tenaga kesehatan. AI adalah alat bantu yang mempercepat proses analisis dan memperkuat

pengambilan keputusan berbasis bukti. Kajian literatur tentang implementasi AI di sektor kesehatan Indonesia menegaskan bahwa AI berpotensi mendukung diagnosis, pengambilan keputusan klinis, manajemen data, dan peningkatan akses layanan, meski penerapannya masih menghadapi hambatan berupa regulasi, keterbatasan infrastruktur digital, isu etika, serta rendahnya literasi teknologi di kalangan tenaga kesehatan (Avianta *et al.*, 2025).

Pemanfaatan AI dalam kesehatan masyarakat tidak bisa dipisahkan dari keberadaan big data. Sumber data kesehatan kini jauh lebih beragam dibandingkan sebelumnya. Data tidak lagi hanya berasal dari laporan manual atau kunjungan pasien, tetapi juga mencakup rekam medis elektronik (RME), sistem surveilans epidemiologi, aplikasi mobile health, layanan telemedicine, media sosial, sensor lingkungan, perangkat wearable, data klaim asuransi kesehatan, hingga data mobilitas penduduk. Apabila seluruh data ini dianalisis dengan tepat menggunakan AI, tenaga kesehatan dan pemerintah dapat memperoleh gambaran yang jauh lebih lengkap tentang pola penyakit, kelompok berisiko, wilayah rawan, dan kebutuhan intervensi yang paling mendesak. Sebuah tinjauan literatur tentang big data dan AI dalam monitoring dan evaluasi program kesehatan menyimpulkan bahwa kombinasi teknologi ini mampu meningkatkan integrasi data lintas sektor, memungkinkan analisis secara real-time, memprediksi luaran kesehatan masyarakat, dan menguatkan pengambilan keputusan berbasis bukti (I'zza, 2025).

Dengan memahami potensi tersebut, pembahasan AI dalam kesehatan masyarakat perlu diletakkan dalam satu alur yang berkesinambungan. Pertama, data dikumpulkan melalui sistem surveilans yang kuat dan terintegrasi. Kedua, data dianalisis menggunakan AI untuk menemukan pola dan memprediksi potensi wabah. Ketiga, hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar untuk menyusun intervensi promotif dan preventif yang efektif. Alur inilah yang menjadikan AI bukan

sekadar teknologi tambahan, melainkan bagian integral dari sistem kesehatan masyarakat yang lebih responsif, adaptif, dan berorientasi pada pencegahan.

Tabel 1. Alur Pemanfaatan AI dalam Kesehatan Masyarakat

Tahap	Peran AI	Manfaat untuk Kesehatan Masyarakat
Pengumpulan Data	Menggabungkan data dari berbagai sumber: surveilans, rekam medis elektronik (RME), aplikasi mobile health, sensor Internet of Things (IoT), media sosial, dan perangkat wearable.	Data lebih lengkap, cepat tersedia, mudah ditelusuri, dan dapat diintegrasikan antar sistem.
Analisis Pola Penyakit	Membaca tren penyakit secara real-time, menemukan kelompok berisiko, dan memetakan wilayah rawan berbasis data spasial dan demografis.	Program kesehatan dapat diarahkan secara tepat sasaran pada masalah dan lokasi yang paling membutuhkan intervensi.

Tahap	Peran AI	Manfaat untuk Kesehatan Masyarakat
Prediksi Risiko dan Wabah	Memprediksi kemungkinan peningkatan kasus atau wabah berdasarkan data historis, data real-time, cuaca, mobilitas penduduk, dan faktor lingkungan.	Dinas kesehatan dapat mempersiapkan respons lebih awal, mengalokasikan sumber daya, dan menekan penyebaran penyakit.
Intervensi Promotif dan Preventif	Membantu menyusun materi edukasi yang personal dan berbasis bukti, mendukung skrining, serta menentukan prioritas program pencegahan.	Masyarakat menerima layanan yang lebih relevan, mudah dipahami, dan sesuai dengan kebutuhan spesifik kelompok sasaran.

5.2 Surveilans Penyakit Berbasis AI

Surveilans penyakit adalah fondasi utama kesehatan masyarakat. Namun, surveilans bukan sekadar menghitung jumlah kasus. Surveilans yang baik mencakup proses pengumpulan, analisis, dan interpretasi data kesehatan secara sistematis dan berkesinambungan, yang hasilnya digunakan

untuk perencanaan, pelaksanaan, pengendalian, serta evaluasi program kesehatan. Dalam literatur surveilans kesehatan masyarakat, fungsi surveilans dijelaskan sebagai mekanisme intelijen kesehatan yang membantu sistem kesehatan memantau, mengantisipasi, dan merespons masalah kesehatan yang berkembang di masyarakat (Kaunang *et al.*, 2023).

Dalam praktiknya, surveilans membantu petugas kesehatan menjawab pertanyaan-pertanyaan mendasar: penyakit apa yang sedang meningkat? Di mana lonjakan itu terjadi? Siapa kelompok yang paling berisiko? Apakah program pencegahan yang sudah berjalan efektif? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini sangat menentukan arah dan kualitas respons kesehatan. Misalnya, peningkatan kasus demam berdarah dengue (DBD) di suatu wilayah bukan hanya sinyal untuk pemberantasan sarang nyamuk, tetapi juga tanda perlunya penguatan edukasi masyarakat, kesiapan fasilitas kesehatan, dan percepatan sistem pelaporan. Pada penyakit tidak menular, surveilans dapat mengidentifikasi wilayah dengan beban hipertensi atau diabetes yang tinggi, sehingga program skrining dan edukasi gaya hidup dapat lebih difokuskan ke sana.

AI memperkuat surveilans dengan cara mempercepat pengolahan data dan membantu mendeteksi pola yang sulit dilihat secara manual. Pada sistem surveilans konvensional, laporan sering terlambat karena masih bergantung pada pencatatan manual atau pelaporan rutin mingguan bahkan bulanan. Dengan sistem digital berbasis AI, data dapat dianalisis hampir secara langsung untuk menangkap sinyal lonjakan kasus, perubahan tren penyakit, atau kemunculan kelompok berisiko baru. Literatur surveilans menyebutkan bahwa e-surveilans, aplikasi smartphone, big data, AI, dan Geographic Information System (GIS) dapat membantu memahami sebaran penyakit secara geografis serta mempercepat analisis data kesehatan (Kaunang *et al.*, 2023).

Pada penyakit menular, AI dapat digunakan untuk mendeteksi sinyal awal wabah dari berbagai sumber data secara bersamaan, mulai dari peningkatan kunjungan pasien dengan gejala tertentu, kenaikan hasil laboratorium positif, laporan masyarakat, tren pencarian informasi kesehatan di internet, hingga unggahan media sosial yang berkaitan dengan gejala penyakit. Pada penyakit tidak menular, AI dapat membantu mengidentifikasi kecenderungan peningkatan kasus berdasarkan umur, jenis kelamin, lokasi tempat tinggal, pola gaya hidup, dan faktor lingkungan secara lebih terperinci.

Namun, surveilans berbasis AI hanya dapat bekerja dengan baik apabila data yang digunakan juga berkualitas. Data yang tidak lengkap, terlambat dilaporkan, duplikatif, atau tidak seragam formatnya dapat menghasilkan analisis yang keliru dan berdampak pada keputusan yang salah sasaran. Oleh sebab itu, penguatan surveilans tidak cukup dilakukan dengan menyediakan aplikasi teknologi semata, tetapi harus didukung oleh pelatihan tenaga kesehatan, budaya pelaporan yang tertib dan tepat waktu, jaringan internet yang memadai di semua wilayah, integrasi antar sistem informasi kesehatan, serta kebijakan yang melindungi privasi dan keamanan data pribadi. Tantangan utama yang masih dihadapi meliputi kurangnya tenaga terlatih, keterbatasan infrastruktur teknologi informasi di daerah terpencil, rendahnya budaya pelaporan, dan isu etika dalam pengelolaan data kesehatan (Kaunang *et al.*, 2023).

5.3 Prediksi Wabah dengan Kecerdasan Buatan

Prediksi wabah adalah upaya untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya peningkatan kasus penyakit sebelum situasi tersebut berkembang menjadi Kejadian Luar Biasa (KLB). Dalam kesehatan masyarakat, prediksi wabah memiliki nilai strategis yang sangat tinggi karena kecepatan respons sangat menentukan seberapa luas penyakit dapat menyebar.

Keterlambatan penanganan bahkan beberapa hari saja sudah dapat menyebabkan penyakit menular meluas ke wilayah yang lebih luas dan meningkatkan beban pelayanan kesehatan secara signifikan.

AI dan machine learning menawarkan kemampuan yang jauh melampaui metode tradisional dalam memprediksi wabah. Model prediktif berbasis AI mampu menganalisis berbagai sumber data secara simultan, seperti rekam medis elektronik, laporan puskesmas, data laboratorium, data sensor lingkungan, pola mobilitas penduduk, data cuaca dan iklim, riwayat wabah sebelumnya, hingga informasi dari media digital. Sebuah penelitian tentang analisis big data dalam deteksi dini wabah penyakit menular melaporkan bahwa model prediktif berbasis machine learning yang mengolah rekam medis elektronik, data sensor, dan media sosial mampu mencapai akurasi 87%, sehingga secara signifikan lebih cepat dalam mendeteksi wabah dibandingkan metode konvensional (Rahayu *et al.*, 2024).

Lebih jauh lagi, prediksi wabah berbasis AI tidak hanya berguna untuk mengetahui kemungkinan peningkatan kasus secara keseluruhan, tetapi juga membantu menentukan lokasi spesifik dan kelompok masyarakat yang harus menjadi prioritas tindakan. Sebagai contoh, apabila model AI menunjukkan bahwa suatu kecamatan berisiko tinggi mengalami lonjakan demam berdarah berdasarkan kombinasi faktor curah hujan tinggi, kepadatan penduduk, dan riwayat kasus sebelumnya, maka dinas kesehatan dapat lebih awal mengirim petugas ke lapangan, memperkuat edukasi warga, menyiapkan logistik medis, dan meningkatkan kewaspadaan fasilitas kesehatan di wilayah tersebut.

Salah satu contoh penerapan yang menjanjikan adalah pengembangan model Support Vector Machine (SVM) yang dikombinasikan dengan Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) untuk memprediksi wilayah endemis demam berdarah.

Penelitian ini menggunakan data epidemiologi DBD, variabel iklim, kepadatan penduduk, dan data spasial untuk mengidentifikasi wilayah berisiko tinggi secara lebih presisi. Model SVM dan GeoAI dinilai mampu mendukung sistem peringatan dini serta membantu pengambilan keputusan strategis, termasuk alokasi tenaga kesehatan, penyiapan perlengkapan medis, dan sosialisasi pencegahan di wilayah prioritas (Meileni, 2025).

Meski demikian, hasil prediksi AI tidak boleh dipahami sebagai keputusan final yang berdiri sendiri. AI menghasilkan sinyal, pola, dan rekomendasi berdasarkan data, tetapi setiap keputusan kesehatan masyarakat tetap perlu dikaji dan divalidasi oleh epidemiolog, tenaga kesehatan berpengalaman, dan pembuat kebijakan. Model prediksi juga harus diperbarui secara berkala karena pola penyakit terus berubah akibat perubahan iklim, pergeseran mobilitas penduduk, evolusi perilaku masyarakat, perubahan cakupan imunisasi, atau pembaruan sistem pelaporan. Dengan kata lain, AI memperkuat kewaspadaan dini dan kapasitas analitis, tetapi tanggung jawab akhir dalam pengambilan keputusan tetap berada pada manusia dan sistem kesehatan.

5.4 Analisis Big Data Kesehatan

Big data kesehatan merujuk pada kumpulan data dalam volume sangat besar, berasal dari beragam sumber, berubah dengan cepat, dan memerlukan metode analisis khusus untuk menghasilkan informasi yang bermakna. Sumber data ini mencakup rekam medis elektronik (RME), klaim pembiayaan kesehatan dari BPJS, sistem surveilans epidemiologi, laporan laboratorium, aplikasi mobile health, layanan telemedicine, media sosial, data lingkungan dari sensor, hingga data aktivitas fisik dari perangkat wearable. Big data menjadi penting karena masalah kesehatan masyarakat tidak hanya dipengaruhi oleh

faktor medis semata, melainkan juga oleh perilaku individu, kondisi lingkungan, status sosial ekonomi, pola mobilitas, dan aksesibilitas pelayanan kesehatan.

Analisis big data membuka peluang bagi tenaga kesehatan dan pemerintah untuk melihat pola penyakit secara lebih luas dan mendalam. Pada penyakit tidak menular misalnya, big data dapat digunakan untuk melacak tren hipertensi, diabetes, penyakit kardiovaskular, atau penyakit pernapasan kronis berdasarkan segmentasi usia, jenis kelamin, wilayah geografis, gaya hidup, dan faktor risiko lingkungan. Sebuah tinjauan literatur tentang penerapan big data dalam kesehatan masyarakat menyimpulkan bahwa kombinasi big data dengan AI, Internet of Things (IoT), dan machine learning mampu mendukung pengawasan penyakit, deteksi sinyal dini, prediksi risiko kesehatan populasi, serta membuka peluang penerapan intervensi pencegahan yang lebih tepat sasaran (Sulaiman *et al.*, 2023).

AI berperan sebagai mesin analisis yang bekerja di balik big data. Ketika volume data begitu besar sehingga tidak mungkin dibaca atau diinterpretasikan secara manual oleh manusia, AI dapat melakukan proses data mining, clustering, pemetaan spasial, hingga pemodelan prediktif secara otomatis dan efisien. Dengan kemampuan ini, AI dapat mengelompokkan wilayah berdasarkan tingkat risiko penyakit, mengidentifikasi kelompok masyarakat yang paling membutuhkan skrining, serta membantu menentukan prioritas program pencegahan yang paling berdampak.

Dalam praktik kesehatan masyarakat, kemampuan analisis big data mendukung transformasi sistem kesehatan dari yang bersifat reaktif menuju proaktif. Artinya, tindakan kesehatan tidak lagi hanya dilakukan setelah pasien datang berobat ke fasilitas kesehatan, tetapi dimulai sejak sinyal risiko terdeteksi dalam data. Jika analisis menunjukkan bahwa suatu wilayah memiliki pola konsumsi makanan tidak sehat, rendah

aktivitas fisik, dan tren peningkatan kasus obesitas, maka program promotif dapat segera diarahkan ke sana sebelum kasus berkembang lebih lanjut. Penelitian mengenai pemantauan pola penyakit tidak menular pada masyarakat perkotaan di Indonesia menunjukkan bahwa big data dapat mendeteksi tren penyakit, mengidentifikasi kelompok populasi berisiko tinggi, mendukung intervensi dini, dan memperkuat perencanaan kebijakan kesehatan berbasis bukti. Namun, penelitian tersebut juga menekankan bahwa kualitas data, interoperabilitas antar sistem, dan perlindungan privasi pasien masih menjadi tantangan utama yang harus diatasi (Rahmawati, 2026).

Keberhasilan analisis big data kesehatan, oleh sebab itu, tidak semata-mata ditentukan oleh kecanggihan teknologi yang digunakan. Faktor tata kelola data memegang peranan yang sama pentingnya. Data harus dikumpulkan dengan standar yang jelas dan konsisten, disimpan secara aman menggunakan enkripsi yang memadai, dapat dipertukarkan antar sistem yang berbeda secara interoperabel, dan digunakan sesuai dengan prinsip etika serta regulasi yang berlaku. Tanpa tata kelola yang baik, big data justru dapat menimbulkan masalah baru, seperti kesalahan interpretasi yang menyesatkan, kebocoran data pribadi, potensi diskriminasi terhadap kelompok tertentu, atau keputusan program yang tidak tepat sasaran.

5.5 AI dalam Program Promotif dan Preventif

Program promotif dan preventif adalah inti sejati dari kesehatan masyarakat. Program promotif bertujuan meningkatkan pengetahuan, kesadaran, dan perilaku sehat masyarakat, sehingga mereka mampu menjaga kesehatannya secara mandiri. Sementara itu, program preventif bertujuan mencegah penyakit sebelum terjadi atau sebelum berkembang menjadi kondisi yang lebih berat dan mahal untuk ditangani. Di layanan kesehatan primer seperti posyandu, pustu/UPKDK (Unit

Pelayanan Kesehatan Tingkat Desa/Kelurahan) dan puskesmas, ini merupakan tulang punggung perlindungan kesehatan masyarakat sehari-hari.

Teknologi informasi telah mulai diintegrasikan untuk memperkuat program promotif dan preventif. Sebuah tinjauan literatur tentang pemantauan program promotif dan preventif di layanan kesehatan primer menemukan bahwa aplikasi mobile health, sistem pencatatan elektronik, dan telemedicine dapat membantu pencatatan yang lebih terstruktur, pemantauan jarak jauh, serta peningkatan keterlacakan data. Namun, penerapannya masih menghadapi kendala berupa keterbatasan sumber daya manusia, kekurangan infrastruktur pendukung, dan masalah pencatatan ganda yang menurunkan kualitas data (Aqila, 2025).

AI dapat memperkuat program promotif dan preventif melalui berbagai cara yang saling melengkapi. Pertama, AI membantu pembuatan materi edukasi kesehatan yang lebih menarik, kreatif, dan mudah dipahami oleh berbagai segmen masyarakat. Petugas puskesmas dapat memanfaatkan AI untuk membuat teks edukasi, desain poster, infografis informatif, caption media sosial yang menarik perhatian, naskah video pendek, atau materi penyuluhan tentang pencegahan stunting, diabetes, hipertensi, demam berdarah, jadwal imunisasi, kesehatan ibu dan anak, serta perilaku hidup bersih dan sehat (PHBS). Pelatihan pemanfaatan AI tools bagi petugas Puskesmas Sungai Bulian, misalnya, terbukti meningkatkan pengetahuan peserta secara signifikan dan memampukan mereka membuat konten edukasi kesehatan secara mandiri menggunakan smartphone (Ichsandi *et al.*, 2025).

Kedua, AI memungkinkan personalisasi pesan edukasi kesehatan sesuai kebutuhan spesifik individu atau kelompok tertentu. Alih-alih menyampaikan pesan kesehatan yang bersifat umum dan seragam untuk semua orang, AI dapat membantu menyusun konten yang relevan secara kontekstual. Misalnya,

wanita usia subur dapat memperoleh edukasi yang spesifik tentang persiapan kehamilan sehat, kebutuhan gizi selama masa reproduksi, pemeriksaan kehamilan yang dianjurkan, dan tanda bahaya yang perlu diwaspadai. Program pemanfaatan AI untuk mempersiapkan kehamilan sehat pada wanita usia subur menunjukkan peningkatan pengetahuan yang bermakna setelah intervensi, dan sebagian besar peserta mampu menggunakan aplikasi secara mandiri (Sari *et al.*, 2026). Ini membuktikan bahwa AI dapat menjadi media edukasi yang dekat dan relevan dengan kebutuhan nyata masyarakat.

Ketiga, AI mendukung penguatan promosi kesehatan di ruang digital yang kini menjadi arena utama pertukaran informasi. Masyarakat modern banyak memperoleh informasi dari internet dan media sosial, namun tidak semua informasi kesehatan yang beredar di ruang digital dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. Infodemi, yaitu banjir informasi yang bercampur antara fakta dan hoaks, merupakan tantangan serius dalam promosi kesehatan masa kini. Karena itu, tenaga kesehatan perlu mampu membuat konten yang akurat secara ilmiah, menarik secara visual, dan mudah dibagikan. Pelatihan AI untuk mahasiswa promosi kesehatan menunjukkan bahwa penggunaan tools seperti ChatGPT, DALL-E, ElevenLabs, dan Canva AI dapat meningkatkan pemahaman peserta tentang AI serta keterampilan membuat media promosi kesehatan digital yang efektif (Setiawan *et al.*, 2025).

Keempat, AI membantu menentukan sasaran program preventif secara lebih presisi berbasis data. Dengan menganalisis pola kesehatan populasi, AI dapat mengidentifikasi kelompok masyarakat yang memiliki risiko lebih tinggi sehingga skrining, edukasi, kunjungan rumah, atau konseling dapat diarahkan secara lebih efisien kepada mereka yang paling membutuhkan. Sebagai contoh, masyarakat dengan profil risiko hipertensi dan diabetes dapat diprioritaskan untuk skrining penyakit tidak menular (PTM), sementara wilayah dengan risiko tinggi DBD

berdasarkan analisis spasial dapat diprioritaskan untuk program pemberantasan sarang nyamuk (PSN) dan edukasi intensif bagi keluarga.

Kendati demikian, penggunaan AI dalam program promotif dan preventif harus tetap berada di bawah kendali dan pengawasan tenaga kesehatan yang kompeten. Materi edukasi yang dihasilkan AI perlu diperiksa dengan saksama untuk memastikan tidak mengandung informasi yang menyesatkan, tidak bertentangan dengan pedoman atau protokol kesehatan resmi, dan sesuai dengan nilai serta budaya masyarakat setempat. Tenaga kesehatan juga perlu mendapatkan pelatihan yang memadai agar mampu menggunakan AI secara etis, menjaga privasi masyarakat, menghindari bias algoritmik, dan tidak menggantungkan diri sepenuhnya pada output mesin. AI sebaiknya diposisikan sebagai alat bantu kreatif dan analitis yang memperkuat kapasitas tenaga kesehatan, sementara validasi konten dan keputusan program tetap menjadi tanggung jawab profesional kesehatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aqila, N. S. (2025). Pemanfaatan teknologi informasi dalam pemantauan program promotif dan preventif di layanan kesehatan primer: Tinjauan literatur.
- Avianta, N. A. S., Putra, D. H., Satrya, B. A., & Iqbal, M. F. (2025). Analysis of artificial intelligence implementation in the Indonesian healthcare sector: A literature review. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 5(4), 1199–1210. <https://doi.org/10.57152/malcom.v5i4.2229>
- Ichsandi, Aminurrahman, M., & Pingkan, N. (2025). Pelatihan pemanfaatan artificial intelligence tools untuk pengembangan konten edukasi kesehatan bagi petugas Puskesmas Sungai Bulian. *ABDIMASYA: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat*, 3(2), 44–51.
- I'zza, S. N. (2025). Literature review: Big data dan AI sebagai inovasi dalam evaluasi program kesehatan.
- Kaunang, W. P. J., Lamia, P. F. E., & Aling, V. H. (2023). Surveilans kesehatan masyarakat: Fondasi pengendalian penyakit dan peningkatan kesejahteraan.
- Meileni, H. (2025). Pengembangan model Support Vector Machine (SVM) dan Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) untuk prediksi wilayah endemis demam berdarah [Disertasi, Universitas Sriwijaya].
- Rachmawati, L. N., Fitri, C. R. K., & Octaviana, M. E. A. (2025). Peluang dan tantangan artificial intelligence terhadap optimalisasi layanan kesehatan: Systematic literature review. *JATI: Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, 9(1), 882–890.

- Rahayu, A. H., Sugianto, C. A., & Rohmayani, D. (2024). Analisis big data dalam deteksi dini wabah penyakit menular untuk mendukung sistem kesehatan publik. *Journal of New Trends in Sciences*, 2(1), 35–47. <https://doi.org/10.59031/jnts.v2i1.785>
- Rahmawati, S. (2026). Pemanfaatan big data kesehatan untuk monitoring pola penyakit tidak menular pada masyarakat perkotaan di Provinsi Kepulauan Riau. *Jurnal Informatika Medis*, 1(1), 31–40.
- Sari, D. P., Riani, S., & Yuliandari, M. (2026). Pemanfaatan artificial intelligence untuk mempersiapkan kehamilan sehat pada wanita usia subur di wilayah kerja RW 08, Desa Cangkuang, Kabupaten Rancekek. *Jurnal Pustaka Cendekia Hukum dan Ilmu Sosial*, 3(3), 778–782.
- Setiawan, R., Assegaff, S., & Winanto, E. A. (2025). Pelatihan pemanfaatan kecerdasan buatan (AI) dalam pembuatan media promosi kesehatan untuk mahasiswa di era digital. *Jurnal Pengabdian Dosen Indonesia*, 2(1), 27–34. <https://doi.org/10.62205/277mt931>
- Sulaiman, T. W., Fitriansyah, R. B., Alaudin, A. R., & Ratsanjani, M. H. (2023). Literature review: Penerapan big data dalam kesehatan masyarakat. *SATUKATA: Jurnal Sains, Teknik dan Kemasyarakatan*, 1(3), 129–138.

BAB 6

***ARTIFICIAL INTELLIGENCE* DALAM PELAYANAN KEPERAWATAN DAN KEDOKTERAN**

6.1 Pendahuluan

Fase baru dalam dunia kesehatan tidak lagi sekadar tentang bagaimana sebuah jarum suntik bekerja atau bagaimana sebuah diagnosis ditegakkan di atas meja periksa atau meja tindakan saja. Kita sedang menyaksikan sebuah lompatan besar di mana batas-batas antara kedokteran, keperawatan dan teknologi digital mulai melebur menjadi satu kekuatan baru. Kehadiran *Artificial Intelligence* (AI) di fasilitas kesehatan, terutama rumah sakit, bukan lagi sebuah fiksi ilmiah yang jauh dari realitas, melainkan sebuah kebutuhan mutakhir untuk menjawab kompleksitas kebutuhan pasien yang terus meningkat. Ketika AI berintegrasi dengan keperawatan dan kedokteran, yang terjadi bukanlah penggantian peran manusia secara mutlak, melainkan sebuah amplifikasi kemampuan. Kolaborasi ini melahirkan sebuah ekosistem pelayanan yang lebih presisi, responsif, dan humanis, di mana teknologi mengambil alih beban administratif dan mekanis, sehingga tenaga kesehatan dapat kembali pada esensi tertinggi mereka: **“merawat dengan empati”**.

6.2 Robotik dalam Pelayanan Medis

Perkembangan teknologi robotik dalam pelayanan medis telah menjadi salah satu bentuk transformasi terbesar dalam dunia kesehatan modern karena mampu menghadirkan sistem pelayanan yang lebih presisi, efisien, aman, dan terintegrasi dengan perkembangan teknologi digital berbasis *Artificial Intelligence* (AI). Kehadiran robot dalam bidang kesehatan bukan lagi dianggap sebagai gambaran masa depan semata, melainkan telah berkembang menjadi bagian nyata dari praktik pelayanan medis di berbagai rumah sakit modern di dunia. Teknologi robotik dirancang untuk membantu tenaga kesehatan dalam melaksanakan berbagai tindakan klinis yang membutuhkan tingkat ketelitian tinggi, kecepatan kerja, serta kemampuan operasional yang konsisten sehingga dapat meminimalkan risiko kesalahan medis yang selama ini menjadi salah satu tantangan dalam pelayanan kesehatan. Menurut Yang *et al.* (2017), integrasi robotik dan AI dalam pelayanan medis mampu meningkatkan ketepatan tindakan klinis sekaligus membantu menurunkan risiko kesalahan medis yang disebabkan oleh faktor manusia.

Dalam dunia kedokteran modern, penggunaan robotik paling banyak berkembang pada tindakan pembedahan atau *robotic surgery* yang memungkinkan dokter melakukan prosedur operasi dengan tingkat akurasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Sistem robotik bedah membantu dokter melakukan operasi dengan sayatan minimal sehingga risiko perdarahan dapat ditekan, nyeri pascaoperasi menjadi lebih ringan, serta proses penyembuhan pasien berlangsung lebih cepat. Teknologi ini juga mampu membantu meningkatkan stabilitas gerakan tangan dokter sehingga tindakan operasi yang rumit dapat dilakukan dengan lebih presisi dan aman. Penelitian yang dilakukan oleh Hashimoto *et al.* (2018) menjelaskan bahwa penggunaan sistem robotik dalam pembedahan modern terbukti meningkatkan presisi tindakan sekaligus memperbaiki hasil klinis pasien pada berbagai

jenis operasi minimal invasif. Kehadiran teknologi tersebut memberikan dampak yang sangat besar dalam meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan karena pasien dapat memperoleh tindakan medis yang lebih aman dan efektif.

Selain digunakan dalam tindakan operasi, robotik medis juga mulai berkembang dalam pelayanan keperawatan sehari-hari. Robot perawat dikembangkan untuk membantu berbagai pekerjaan rutin yang membutuhkan tenaga fisik cukup besar, seperti membantu memindahkan pasien, mengantarkan obat, mendistribusikan alat kesehatan, hingga membantu proses pemantauan kondisi pasien secara otomatis. Kehadiran robot dalam pelayanan keperawatan memberikan manfaat besar dalam mengurangi beban kerja tenaga kesehatan, terutama di rumah sakit dengan jumlah pasien yang tinggi dan keterbatasan sumber daya manusia. Menurut Robert (2019), penggunaan robot dalam pelayanan keperawatan mampu membantu mengurangi kelelahan fisik tenaga kesehatan sekaligus meningkatkan efisiensi pelayanan di rumah sakit modern. Selain membantu pekerjaan rutin, penggunaan robot juga dinilai mampu mengurangi risiko penularan penyakit infeksi karena beberapa pelayanan dapat dilakukan tanpa kontak langsung secara terus-menerus dengan pasien.

Perkembangan robotik medis juga mulai dimanfaatkan dalam bidang rehabilitasi pasien, terutama bagi pasien yang mengalami gangguan mobilitas akibat stroke, cedera saraf, maupun gangguan neurologis lainnya. Robot rehabilitasi memungkinkan pasien menjalani latihan gerak secara lebih terukur, konsisten, dan interaktif sehingga proses pemulihan fungsi tubuh dapat berlangsung lebih optimal. Teknologi ini memberikan harapan baru dalam pelayanan rehabilitasi modern karena pasien dapat memperoleh terapi yang lebih personal dan berbasis evaluasi digital secara berkala.

Meskipun perkembangan robotik dalam pelayanan medis memberikan banyak manfaat, implementasinya tetap menghadapi berbagai tantangan yang perlu diperhatikan secara serius. Tingginya biaya pengadaan dan pemeliharaan teknologi robotik menjadi salah satu hambatan utama bagi banyak fasilitas kesehatan, terutama di negara berkembang. Selain itu, penggunaan teknologi robotik juga membutuhkan tenaga kesehatan yang memiliki kemampuan digital dan keterampilan teknis dalam mengoperasikan sistem robotik secara aman dan efektif. Di sisi lain, pelayanan kesehatan tidak hanya berbicara mengenai kecanggihan teknologi, tetapi juga menyangkut empati, komunikasi terapeutik, dan hubungan interpersonal antara tenaga kesehatan dan pasien. Oleh karena itu, penggunaan robotik medis sebaiknya dipandang sebagai alat bantu yang mendukung kualitas pelayanan kesehatan, bukan sebagai pengganti sepenuhnya peran manusia dalam memberikan pelayanan yang humanis dan berorientasi pada keselamatan pasien.

Dengan demikian, perkembangan robotik medis tidak hanya menjadi simbol kemajuan teknologi kesehatan modern, tetapi juga menjadi bagian penting dalam menciptakan pelayanan kesehatan yang lebih presisi, efisien, dan berorientasi pada keselamatan pasien.

6.3 *AI-Assistant* Tenaga Kesehatan

Perkembangan *Artificial Intelligence* dalam pelayanan kesehatan telah melahirkan berbagai inovasi yang membantu tenaga kesehatan dalam menjalankan tugas pelayanan secara lebih cepat, tepat, dan efisien. Salah satu inovasi yang berkembang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir adalah penggunaan *AI Assistant* atau asisten berbasis kecerdasan buatan yang dirancang untuk membantu dokter, perawat, dan tenaga kesehatan lainnya dalam berbagai aktivitas pelayanan klinis

maupun administratif. Kehadiran AI Assistant menjadi solusi penting di tengah meningkatnya jumlah pasien, kompleksitas pelayanan kesehatan, serta tingginya beban administrasi yang sering kali menyebabkan kelelahan kerja pada tenaga medis. Davenport & Kalakota (2019) menjelaskan bahwa AI dalam pelayanan kesehatan memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi administrasi sekaligus membantu tenaga medis mengambil keputusan klinis secara lebih cepat dan akurat.

Dalam praktik pelayanan kesehatan modern, AI Assistant memiliki kemampuan untuk membantu proses dokumentasi medis yang selama ini menjadi salah satu pekerjaan administratif paling menyita waktu bagi tenaga kesehatan. Sistem AI mampu merekam percakapan medis, mengubah suara menjadi teks secara otomatis, hingga membantu menyusun dokumentasi rekam medis secara digital dan sistematis. Kehadiran teknologi ini memberikan dampak yang sangat besar terhadap efisiensi pelayanan karena tenaga kesehatan tidak lagi menghabiskan terlalu banyak waktu untuk melakukan pencatatan manual. Dengan demikian, dokter dan perawat dapat lebih fokus memberikan pelayanan langsung kepada pasien serta meningkatkan kualitas komunikasi terapeutik selama proses perawatan berlangsung.

Selain membantu pekerjaan administratif, AI Assistant juga berkembang sebagai sistem pendukung pengambilan keputusan klinis atau *Clinical Decision Support System* (CDSS). Teknologi ini mampu menganalisis data kesehatan pasien dalam jumlah besar untuk membantu tenaga medis menentukan diagnosis, memprediksi risiko komplikasi, hingga memberikan rekomendasi terapi berdasarkan data ilmiah dan riwayat kesehatan pasien. Penelitian oleh Briganti & Le Moine (2020) menjelaskan bahwa AI Assistant mampu membantu tenaga kesehatan dalam mendeteksi risiko penyakit lebih dini serta meningkatkan akurasi diagnosis melalui analisis data kesehatan secara cepat dan sistematis. Kemampuan tersebut menjadi sangat

penting dalam pelayanan kesehatan modern karena ketepatan pengambilan keputusan klinis sangat memengaruhi keselamatan pasien.

Dalam pelayanan keperawatan, penggunaan AI Assistant juga membantu meningkatkan efektivitas pengelolaan pelayanan pasien melalui sistem pengingat tindakan keperawatan, jadwal pemberian obat, serta prioritas pelayanan berdasarkan kondisi pasien. Teknologi ini membantu perawat memperoleh informasi kondisi pasien secara real-time sehingga tindakan keperawatan dapat dilakukan secara tepat waktu dan sesuai kebutuhan pasien. Selain meningkatkan efisiensi kerja, penggunaan AI Assistant juga membantu memperkuat koordinasi antar tenaga kesehatan melalui sistem informasi digital yang terintegrasi.

Meskipun AI Assistant memberikan banyak manfaat dalam pelayanan kesehatan, implementasi teknologi ini tetap memerlukan perhatian terhadap berbagai aspek penting, terutama terkait keamanan data pasien, validitas rekomendasi sistem, serta etika penggunaan teknologi dalam pelayanan kesehatan. Penggunaan AI tidak boleh sepenuhnya menggantikan peran profesional tenaga kesehatan karena pelayanan kesehatan tetap membutuhkan empati, komunikasi, dan pertimbangan moral yang tidak dapat digantikan oleh teknologi. Oleh sebab itu, AI Assistant sebaiknya digunakan sebagai alat bantu yang mendukung profesionalisme tenaga kesehatan dalam menciptakan pelayanan yang lebih berkualitas, aman, dan berorientasi pada kebutuhan pasien.

6.4 Monitoring Pasien Berbasis Artificial Intelligence

Perkembangan *Artificial Intelligence* dalam dunia kesehatan telah membawa perubahan besar terhadap sistem pemantauan pasien yang sebelumnya dilakukan secara manual

menjadi lebih modern, cepat, dan terintegrasi secara digital. Monitoring pasien berbasis AI menjadi salah satu inovasi penting dalam pelayanan kesehatan karena memungkinkan tenaga medis dan tenaga keperawatan melakukan pengawasan kondisi pasien secara real-time, berkelanjutan, dan lebih akurat melalui bantuan sensor digital, perangkat wearable, *Internet of Things* (IoT), serta sistem analisis data otomatis. Teknologi ini berkembang sebagai jawaban atas meningkatnya kebutuhan pelayanan kesehatan yang menuntut ketepatan, kecepatan respons, dan kemampuan deteksi dini terhadap perubahan kondisi pasien yang berpotensi membahayakan keselamatan jiwa. Penggunaan AI dalam monitoring pasien mampu meningkatkan kemampuan prediksi klinis sekaligus membantu mempercepat respons tenaga kesehatan terhadap kondisi kritis pasien (Topol, 2019).

Dalam praktik pelayanan kesehatan modern, sistem monitoring berbasis AI bekerja dengan mengumpulkan berbagai data fisiologis pasien seperti denyut jantung, tekanan darah, suhu tubuh, laju pernapasan, kadar oksigen dalam darah, hingga pola aktivitas pasien secara terus-menerus. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan algoritma kecerdasan buatan untuk mendeteksi pola tertentu yang dapat menunjukkan adanya penurunan kondisi kesehatan pasien. Teknologi AI memiliki kemampuan mempelajari ribuan pola data klinis sehingga mampu mengenali tanda-tanda awal kondisi kritis bahkan sebelum gejala terlihat secara nyata oleh tenaga kesehatan. Kondisi ini memberikan keuntungan besar dalam meningkatkan keselamatan pasien karena tindakan medis dapat dilakukan lebih cepat sebelum kondisi berkembang menjadi lebih serius.

Dalam ruang perawatan intensif atau *Intensive Care Unit* (ICU), penggunaan monitoring pasien berbasis AI memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap kualitas pelayanan kesehatan. Sistem monitoring modern mampu memberikan peringatan otomatis kepada dokter dan perawat apabila ditemukan perubahan tanda vital yang mengarah pada kondisi

kegawatan seperti gagal napas, sepsis, gangguan irama jantung, maupun penurunan kesadaran pasien. Penelitian yang dilakukan oleh Wong *et al.* (2021) menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis AI mampu membantu deteksi dini sepsis dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pemantauan konvensional. Kemampuan deteksi dini tersebut menjadi sangat penting karena keterlambatan penanganan pasien kritis sering kali meningkatkan risiko komplikasi bahkan kematian.

Selain digunakan dalam ruang perawatan intensif, monitoring pasien berbasis AI juga mulai diterapkan dalam pelayanan pasien penyakit kronis seperti diabetes, hipertensi, penyakit jantung, dan gangguan pernapasan kronis. Pasien dapat menggunakan perangkat wearable seperti smartwatch kesehatan atau sensor digital yang mampu mengirimkan data kondisi tubuh secara otomatis ke sistem rumah sakit maupun aplikasi kesehatan yang digunakan oleh tenaga medis dan tenaga kesehatan. Teknologi ini memungkinkan pasien tetap memperoleh pemantauan kesehatan tanpa harus selalu datang ke rumah sakit, sehingga pelayanan kesehatan menjadi lebih fleksibel, efisien, dan nyaman bagi pasien. Menurut Keesara *et al.* (2020), perkembangan teknologi digital dan sistem monitoring jarak jauh berbasis AI menjadi salah satu transformasi terbesar dalam pelayanan kesehatan modern, terutama setelah meningkatnya kebutuhan telemedicine pada masa pandemi COVID-19.

Dalam pelayanan keperawatan, monitoring pasien berbasis AI juga membantu meningkatkan efektivitas pengawasan kondisi pasien, terutama pada pasien dengan risiko tinggi yang membutuhkan observasi ketat selama 24 jam. Sistem AI membantu perawat memperoleh informasi kondisi pasien secara cepat melalui notifikasi otomatis apabila terjadi perubahan kondisi tertentu yang membutuhkan tindakan segera. Kehadiran teknologi ini membantu mengurangi beban observasi

manual yang selama ini membutuhkan banyak waktu dan tenaga sehingga perawat dapat lebih fokus memberikan pelayanan terapeutik dan dukungan emosional kepada pasien. Selain meningkatkan efisiensi kerja tenaga kesehatan, monitoring berbasis AI juga membantu meningkatkan ketepatan dokumentasi kondisi pasien karena seluruh data tersimpan secara digital dan dapat diakses secara real-time.

Perkembangan monitoring pasien berbasis AI juga memberikan dampak besar terhadap pelayanan kesehatan berbasis rumah atau *home care*. Pasien lanjut usia maupun pasien pascaoperasi dapat dipantau dari rumah melalui perangkat digital yang terhubung langsung dengan sistem pelayanan kesehatan. Kondisi tersebut membantu meningkatkan kualitas hidup pasien karena mereka tetap memperoleh pengawasan medis tanpa harus menjalani rawat inap dalam waktu lama. Selain itu, sistem monitoring jarak jauh juga membantu mengurangi kepadatan rumah sakit dan meningkatkan efisiensi penggunaan fasilitas pelayanan kesehatan.

Meskipun implementasi monitoring berbasis AI di Indonesia masih menghadapi keterbatasan infrastruktur digital, perkembangan teknologi kesehatan menunjukkan peluang besar dalam meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan terutama pada daerah dengan keterbatasan tenaga medis. Kehadiran sistem monitoring digital dinilai mampu membantu tenaga kesehatan melakukan pemantauan pasien secara lebih cepat dan efisien, terutama pada wilayah yang memiliki akses pelayanan kesehatan terbatas.

Meskipun monitoring pasien berbasis AI menawarkan berbagai manfaat dalam meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan, implementasi teknologi ini tetap menghadapi berbagai tantangan yang perlu diperhatikan secara serius. Salah satu tantangan terbesar adalah keamanan data pasien karena sistem monitoring digital mengumpulkan informasi kesehatan

yang bersifat sangat sensitif dan pribadi. Oleh karena itu, rumah sakit dan fasilitas kesehatan harus memiliki sistem keamanan siber yang kuat untuk mencegah kebocoran data maupun penyalahgunaan informasi pasien. Selain itu, akurasi sistem AI juga harus terus dievaluasi agar hasil analisis yang diberikan benar-benar sesuai dengan kondisi klinis pasien. Penggunaan AI yang tidak disertai pengawasan tenaga kesehatan profesional berpotensi menimbulkan kesalahan interpretasi yang dapat memengaruhi keselamatan pasien.

Di sisi lain, penggunaan monitoring pasien berbasis AI juga menuntut kesiapan sumber daya manusia dalam menghadapi transformasi digital pelayanan kesehatan. Tenaga kesehatan tidak hanya dituntut memiliki kemampuan klinis, tetapi juga harus memahami penggunaan teknologi digital dalam praktik pelayanan sehari-hari. Kondisi ini menunjukkan bahwa perkembangan teknologi kesehatan tidak hanya mengubah sistem pelayanan, tetapi juga mengubah pola kerja tenaga kesehatan secara menyeluruh. Oleh sebab itu, implementasi monitoring pasien berbasis AI harus dilakukan secara bertahap, terencana, dan tetap mengedepankan nilai-nilai kemanusiaan agar teknologi dapat menjadi alat bantu yang mendukung kualitas pelayanan kesehatan tanpa menghilangkan aspek empati dan hubungan interpersonal antara tenaga kesehatan dan pasien.

Oleh karena itu, monitoring pasien berbasis AI dapat menjadi langkah penting dalam membangun sistem pelayanan kesehatan yang lebih responsif, proaktif, dan berkelanjutan di masa depan.

6.5 Efisiensi Pelayanan Klinis

Perkembangan *Artificial Intelligence* dalam pelayanan kesehatan telah membuka peluang besar bagi rumah sakit dan fasilitas kesehatan untuk menciptakan sistem pelayanan yang

lebih cepat, efektif, dan terintegrasi tanpa mengurangi kualitas pelayanan kepada pasien. Kehadiran AI dalam pelayanan klinis menjadi salah satu bentuk transformasi digital yang tidak hanya mengubah cara tenaga kesehatan bekerja, tetapi juga mengubah pola manajemen pelayanan kesehatan secara menyeluruh. Di tengah meningkatnya jumlah pasien, keterbatasan sumber daya manusia, serta tingginya tuntutan pelayanan yang cepat dan akurat, teknologi AI hadir sebagai solusi yang membantu berbagai proses pelayanan menjadi lebih efisien melalui otomatisasi sistem, pengolahan data digital, dan analisis klinis berbasis kecerdasan buatan. Menurut Rajpurkar *et al.* (2022), penerapan AI dalam manajemen pelayanan kesehatan mampu meningkatkan efisiensi operasional rumah sakit sekaligus mempercepat proses pelayanan klinis secara signifikan.

Dalam praktik pelayanan kesehatan modern, AI membantu mempercepat berbagai proses administratif yang selama ini menjadi salah satu penyebab lambatnya pelayanan di rumah sakit. Sistem berbasis AI mampu membantu pengelolaan rekam medis elektronik, sistem penjadwalan pasien, pengaturan antrean pelayanan, hingga pengolahan data administrasi secara otomatis dan terintegrasi. Sebelumnya, tenaga kesehatan sering kali menghabiskan banyak waktu untuk melakukan pencatatan manual, menginput data pasien, maupun menyusun laporan administrasi yang cukup kompleks. Namun dengan adanya teknologi AI, berbagai pekerjaan administratif tersebut dapat dilakukan secara lebih cepat dan sistematis sehingga tenaga kesehatan memiliki lebih banyak waktu untuk fokus memberikan pelayanan langsung kepada pasien.

Di Indonesia, transformasi digital pelayanan kesehatan mulai berkembang melalui penerapan rekam medis elektronik dan integrasi platform SATU SEHAT Kementerian Kesehatan yang bertujuan memperkuat pertukaran data kesehatan secara terintegrasi antar fasilitas pelayanan kesehatan.

Dalam bidang kedokteran, penggunaan AI juga berkembang pesat dalam membantu proses diagnosis dan analisis klinis. Teknologi AI mampu menganalisis hasil radiologi, pemeriksaan laboratorium, maupun data kesehatan pasien dalam waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan dengan metode konvensional. Sistem kecerdasan buatan memiliki kemampuan mempelajari jutaan data medis sehingga mampu mengenali pola penyakit secara lebih cepat dan akurat. Penelitian yang dilakukan oleh Rajpurkar *et al.* (2022) menunjukkan bahwa sistem AI dalam analisis radiologi memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi dalam mendeteksi beberapa jenis penyakit tertentu bahkan mendekati kemampuan dokter spesialis. Kehadiran teknologi ini membantu dokter memperoleh hasil analisis secara lebih cepat sehingga proses pengambilan keputusan klinis dapat dilakukan tanpa menunggu waktu yang terlalu lama.

Selain membantu proses diagnosis, AI juga membantu meningkatkan efisiensi pelayanan melalui sistem prediksi kebutuhan pelayanan rumah sakit. Teknologi AI mampu menganalisis pola kunjungan pasien, memprediksi jumlah pasien harian, mengatur kebutuhan tempat tidur rawat inap, hingga membantu pengelolaan sumber daya manusia secara lebih efektif. Dengan adanya sistem prediksi berbasis AI, rumah sakit dapat melakukan perencanaan pelayanan secara lebih baik sehingga risiko penumpukan pasien maupun keterlambatan pelayanan dapat diminimalkan. Kondisi ini sangat penting terutama pada rumah sakit dengan tingkat kunjungan pasien yang tinggi karena efisiensi pelayanan sangat memengaruhi kualitas pelayanan dan kepuasan pasien.

Dalam pelayanan keperawatan, pemanfaatan AI juga memberikan dampak yang cukup besar terhadap efektivitas kerja tenaga perawat. Sistem dokumentasi keperawatan berbasis AI membantu mempercepat pencatatan asuhan keperawatan, pemantauan kondisi pasien, serta koordinasi antar tenaga kesehatan melalui sistem digital yang terintegrasi. Menurut

Zhang *et al.* (2025), penggunaan AI dalam dokumentasi keperawatan membantu meningkatkan efisiensi kerja perawat sekaligus mengurangi risiko kesalahan pencatatan klinis. Dengan adanya sistem digital yang terintegrasi, informasi pasien dapat diakses secara real-time oleh seluruh tenaga kesehatan sehingga proses pelayanan menjadi lebih cepat, tepat, dan terkoordinasi dengan baik.

Perkembangan AI juga membantu meningkatkan efisiensi pelayanan melalui sistem *telemedicine* dan pelayanan kesehatan jarak jauh. Pasien kini dapat melakukan konsultasi medis secara online tanpa harus datang langsung ke rumah sakit untuk kondisi tertentu. Teknologi AI membantu proses triase digital, penjadwalan konsultasi, hingga analisis awal kondisi pasien sebelum bertemu dokter. Kehadiran pelayanan digital tersebut memberikan manfaat besar dalam mengurangi kepadatan fasilitas kesehatan sekaligus memperluas akses pelayanan kesehatan bagi masyarakat yang berada di daerah terpencil. Kondisi ini menunjukkan bahwa AI tidak hanya membantu meningkatkan efisiensi internal rumah sakit, tetapi juga membantu menciptakan sistem pelayanan kesehatan yang lebih inklusif dan mudah dijangkau masyarakat.

Meskipun AI mampu meningkatkan efisiensi pelayanan kesehatan, penggunaan teknologi ini tetap memerlukan pengawasan tenaga kesehatan karena keputusan klinis tidak dapat sepenuhnya diserahkan kepada sistem otomatis. Dalam praktik pelayanan kesehatan, pertimbangan etis, komunikasi terapeutik, serta kondisi klinis pasien secara menyeluruh tetap membutuhkan penilaian profesional yang tidak dapat sepenuhnya digantikan oleh kecerdasan buatan.

Meskipun implementasi AI memberikan banyak manfaat terhadap efisiensi pelayanan klinis, penggunaan teknologi ini tetap memerlukan kesiapan infrastruktur, regulasi, serta kompetensi sumber daya manusia yang memadai. Tidak semua

fasilitas kesehatan memiliki kemampuan teknologi yang sama, sehingga penerapan AI di beberapa daerah masih menghadapi keterbatasan akses digital dan pendanaan. Selain itu, penggunaan AI dalam pelayanan kesehatan juga harus memperhatikan keamanan data pasien, validitas hasil analisis sistem, serta etika penggunaan teknologi dalam praktik klinis. Pelayanan kesehatan tetap membutuhkan empati, komunikasi, dan pertimbangan manusia yang tidak dapat sepenuhnya digantikan oleh mesin atau sistem otomatis.

Di sisi lain, perkembangan AI dalam pelayanan klinis juga menunjukkan bahwa tenaga kesehatan di masa depan dituntut memiliki kemampuan adaptasi terhadap perkembangan teknologi digital. Dokter dan perawat tidak lagi hanya dituntut memiliki kompetensi klinis, tetapi juga harus mampu memahami sistem teknologi kesehatan yang digunakan dalam praktik pelayanan sehari-hari. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa transformasi digital dalam pelayanan kesehatan bukan hanya tentang penggunaan teknologi canggih, melainkan juga tentang perubahan budaya kerja, pola komunikasi, dan sistem pelayanan kesehatan secara keseluruhan. Oleh karena itu, implementasi AI dalam efisiensi pelayanan klinis harus dilakukan secara seimbang dengan tetap mempertahankan nilai-nilai kemanusiaan, keselamatan pasien, dan kualitas hubungan interpersonal antara tenaga kesehatan dan pasien.

Perkembangan Artificial Intelligence dalam pelayanan keperawatan dan kedokteran menunjukkan bahwa transformasi digital kesehatan bukan lagi sekadar wacana masa depan, melainkan telah menjadi bagian nyata dari sistem pelayanan kesehatan modern. Kehadiran robotik medis, AI Assistant, monitoring pasien berbasis AI, serta sistem pelayanan klinis yang semakin terintegrasi membuktikan bahwa teknologi mampu membantu meningkatkan efisiensi, ketepatan, dan kualitas pelayanan kesehatan secara menyeluruh.

Meskipun demikian, penggunaan Artificial Intelligence dalam pelayanan kesehatan tetap memerlukan pengawasan tenaga kesehatan profesional karena pelayanan kesehatan tidak hanya berkaitan dengan teknologi dan data, tetapi juga menyangkut empati, komunikasi, serta nilai-nilai kemanusiaan dalam proses perawatan pasien. Oleh karena itu, kolaborasi antara teknologi dan tenaga kesehatan menjadi kunci utama dalam menciptakan pelayanan kesehatan masa depan yang lebih responsif, aman, humanis, dan berorientasi pada keselamatan pasien.

DAFTAR PUSTAKA

- Briganti, G., & Le Moine, O. (2020). Artificial Intelligence in Medicine: Today and Tomorrow. *Frontiers in Medicine*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmed.2020.00027>
- Davenport, T., & Kalakota, R. (2019). The Potential for Artificial Intelligence in Healthcare. *Future Healthcare Journal*, 6(2), 94–98. <https://doi.org/10.7861/futurehosp.6-2-94>
- Hashimoto, D. A., Rosman, G., Rus, D., & Meireles, O. R. (2018). Artificial Intelligence in Surgery: Promises and Perils. *Annals of Surgery*, 268(1), 70–76. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000002693>
- Keesara, S., Jonas, A., & Schulman, K. (2020). Covid-19 and Health Care's Digital Revolution. *New England Journal of Medicine*, 382(23). <https://doi.org/10.1056/NEJMp2005835>
- Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O., & Topol, E. J. (2022). AI in Health and Medicine. *Nature Medicine*, 28(1), 31–38. <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01614-0>
- Robert, N. (2019). How Artificial Intelligence is Changing Nursing. *Nursing Management*, 50(9), 30–39. <https://doi.org/10.1097/01.NUMA.0000578988.56622.21>
- Topol, 44RE. (2019). *Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again* (Basic Book).
- Wong, A., Otles, E., Donnelly, J. P., Krumm, A., McCullough, J., DeTroyer-Cooley, O., Pestue, J., Phillips, M., Konye, J., Penoz, C., Ghous, M., & Singh, K. (2021). External Validation of a Widely Implemented Proprietary Sepsis Prediction Model in Hospitalized Patients. *JAMA Internal Medicine*, 181(8), 1065. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2021.2626>

- Yang, G.-Z., Cambias, J., Cleary, K., Daimler, E., Drake, J., Dupont, P. E., Hata, N., Kazanzides, P., Martel, S., Patel, R. V., Santos, V. J., & Taylor, R. H. (2017). Medical robotics-Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Science Robotics*, 2(4). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aam8638>
- Zhang, Z., Gupta, P., Potts-Thompson, S., Prescott, L., Morrison, M., Sittig, S., McDonald, M. V, Raymond, C., Taylor, J. Y., & Topaz, M. (2025). Identifying and Reducing Stigmatizing Language in Home Health Care With a Natural Language Processing-Based System (ENGAGE): Protocol for a Mixed Methods Study. *JMIR Research Protocols*, 14, e69753. <https://doi.org/10.2196/69753>

BAB 7

TELEMEDICINE DAN PELAYANAN KESEHATAN BERBASIS ARTIFICIAL INTELLIGENCE

7.1 Pendahuluan

Telemedicine merupakan layanan kesehatan oleh profesional kesehatan menggunakan teknologi informasi dan komunikasi untuk pertukaran informasi yang valid untuk keperluan diagnosis, pengobatan, pencegahan penyakit serta evaluasi dengan tujuan memajukan kesehatan individu dan komunitas (World Health Organization, 2010). Telemedicine tidak lagi terbatas pada konsultasi telepon atau video, melainkan telah berkembang menjadi ekosistem layanan kesehatan digital yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan (artificial intelligence/AI), analitik data besar (big data analytics), dan Internet of Things (IoT) medis (Topol, 2019).

Sistem pelayanan kesehatan konvensional menghadapi tekanan yang semakin besar akibat peningkatan prevalensi penyakit kronis, penuaan populasi global, distribusi tenaga kesehatan yang tidak merata, serta keterbatasan infrastruktur di wilayah terpencil dan negara berkembang. Di Indonesia, rasio dokter terhadap penduduk masih berada di angka 0,47 per 1.000 penduduk, jauh di bawah standar WHO sebesar 1 per 1.000 penduduk (Kementerian Kesehatan RI, 2022). Kondisi ini diperparah oleh disparitas geografis yang signifikan antara kawasan perkotaan dan pedesaan, sehingga akses terhadap layanan kesehatan berkualitas menjadi hak yang belum merata

dinikmati oleh seluruh lapisan masyarakat. Pandemi COVID-19 pada tahun 2020–2022 semakin mengekspos kerentanan sistem kesehatan tradisional yang bergantung sepenuhnya pada interaksi tatap muka, sekaligus mempercepat adopsi solusi kesehatan digital secara masif di berbagai belahan dunia (Ohannessian *et al.*, 2020).

Integrasi AI ke dalam platform telemedicine bertujuan untuk otomatisasi triase klinis, analisis gejala berbasis algoritma pembelajaran mesin (machine learning), hingga pemberian rekomendasi terapi yang dipersonalisasi berdasarkan riwayat kesehatan dan data genomik pasien. Chatbot kesehatan berbasis pemrosesan bahasa alami (Natural Language Processing/NLP) telah terbukti mampu menangani lebih dari 70% pertanyaan kesehatan rutin tanpa intervensi tenaga medis manusia, sehingga secara signifikan mengurangi beban kerja fasilitas kesehatan primer (Palanica *et al.*, 2019). Sementara itu, konsultasi virtual berbasis AI dengan kemampuan analisis citra medis (medical image analysis) dan pengolahan data multimodal telah menunjukkan tingkat akurasi diagnostik yang setara dengan kemampuan klinisi berpengalaman pada beberapa spesialisasi tertentu (Rajpurkar *et al.*, 2022).

7.2 Perkembangan Telemedicine

Sejarah telemedicine dimulai pada awal abad ke-20 melalui komunikasi panduan medis menggunakan radio kapal laut dan pengiriman EKG pertama via telepon oleh Willem Einthoven pada 1906 (Bashshur *et al.*, 2016). Perkembangan ini berlanjut pada dekade 1960-an hingga 1970-an saat NASA mengembangkan sistem pemantauan astronot jarak jauh dan program STARPAHC untuk komunitas terpencil di Arizona, Amerika Serikat (Doarn & Merrel, 2014). Memasuki era 1990-an, revolusi internet dan jaringan broadband memungkinkan transmisi data medis besar secara real-time, yang memicu

lahirnya spesialisasi telepsikiatri, teleradiologi, dan teledermatologi (Snowswell *et al.*, 2020). Demokratisasi telemedicine kemudian terjadi pada era 2000-an berkat smartphone, perangkat wearable, dan aplikasi mHealth, yang menjadi fondasi bagi integrasi AI dalam ekosistem digital klinis yang cerdas dan adaptif (Tuckson *et al.*, 2017).

COVID-19 menjadi akselerator global telemedicine, di AS dan Eropa terjadi lonjakan kunjungan hingga ratusan kali lipat. Pemerintah dunia memfasilitasi ekspansi telemedicine dengan melonggarkan regulasi serta memperluas cakupan asuransi virtual (Hollander & Carr, 2020). Di Indonesia, konsultasi daring telah terintegrasi JKN (Jaminan Kesehatan Nasional) tercatat lebih dari 1,5 juta pada tahun 2020–2021 (Kementerian Kesehatan RI, 2021).

7.3 Chatbot Kesehatan

Chatbot kesehatan, conversational agents atau virtual health assistants, merupakan perangkat lunak berbasis AI yang dirancang untuk berinteraksi dengan pengguna untuk memberikan informasi, dukungan, atau layanan kesehatan. Dari perspektif teknis, chatbot kesehatan modern dibangun di atas tiga lapisan arsitektur utama: (1) modul pemahaman bahasa alami (Natural Language Understanding/NLU) untuk menginterpretasikan maksud dan entitas dari input pengguna; (2) sistem manajemen dialog untuk mengelola alur percakapan secara koheren; dan (3) modul pembuatan respons (Natural Language Generation/NLG) untuk menghasilkan tanggapan yang kontekstual dan relevan secara klinis (Laranjo *et al.*, 2018). Model bahasa besar (Large Language Models/LLM) seperti GPT-4 dan variannya yang disesuaikan untuk domain medis telah membawa kemajuan revolusioner dalam kualitas interaksi chatbot kesehatan, dengan kemampuan memahami konteks percakapan

yang kompleks dan menghasilkan penjelasan medis yang nuansif (Thirunavukarasu *et al.*, 2023).

Chatbot terbukti efektif meningkatkan kepatuhan pasien dengan penyakit kronis terhadap pengobatan dan pemantauan mandiri. Sebuah uji klinis acak yang diterbitkan dalam *Journal of Medical Internet Research* menunjukkan bahwa penggunaan chatbot berbasis AI untuk manajemen diabetes tipe 2 secara signifikan meningkatkan kontrol glikemik pasien, dengan penurunan HbA1c rata-rata sebesar 1,1% dibandingkan kelompok kontrol yang hanya menerima edukasi konvensional (Stein *et al.*, 2021). Di bidang kesehatan mental, chatbot seperti Woebot dan Wysa telah menunjukkan efektivitas dalam memberikan dukungan psikologis berbasis terapi kognitif-perilaku (CBT) kepada pengguna yang mengalami gejala kecemasan dan depresi ringan hingga sedang, dengan keunggulan aksesibilitas 24/7 tanpa stigma sosial yang sering menghambat pencarian bantuan profesional (Fitzpatrick *et al.*, 2017). Studi meta-analisis yang dilakukan oleh Palanica *et al.* (2019) mengindikasikan bahwa chatbot kesehatan mampu mengurangi kunjungan tidak urgent ke unit gawat darurat hingga 30% melalui triase daring yang akurat, dengan implikasi efisiensi biaya yang substansial bagi sistem kesehatan.

7.4 Konsultasi Virtual berbasis AI

Konsultasi virtual berbasis AI merupakan pengembangan telemedicine yang tidak hanya menjadi media komunikasi, tetapi juga mendukung proses diagnostik dan terapi melalui analisis data klinis secara real-time, seperti percakapan, ekspresi wajah (analisa nyeri atau distress), data wearable, dan lembar penunjang pencitraan medis (Topol, 2019). Sistem pendukung keputusan klinis berbasis AI mampu mengolah data tersebut untuk memberikan rekomendasi diagnosis dan terapi yang lebih

personal, sehingga meningkatkan kualitas dan efisiensi layanan (Sutton *et al.*, 2020).

AI berbasis deep learning, khususnya Convolutional Neural Networks (CNN), telah menunjukkan akurasi tinggi dalam interpretasi pencitraan medis. Esteva *et al.* (2017) melaporkan bahwa model CNN mampu mengklasifikasikan kanker kulit dengan akurasi setara dermatologis. Di bidang radiologi, sistem CheXNet dari Stanford juga mampu mendeteksi pneumonia pada foto toraks dengan akurasi melebihi rata-rata radiologis manusia (Rajpurkar *et al.*, 2017). Integrasi teknologi ini dalam konsultasi virtual memungkinkan skrining dini yang cepat dan akurat, terutama di daerah yang kekurangan SDM spesialis.

Dalam oftalmologi, sistem AI IDx-DR menjadi perangkat diagnostik otonom pertama yang disetujui FDA untuk mendeteksi retinopati diabetik tanpa interpretasi klinisi (Abramoff *et al.*, 2018). AI juga mulai diterapkan pada analisis EKG dari perangkat wearable untuk mendeteksi aritmia dan tanda awal penyakit jantung koroner secara akurat (Hannun *et al.*, 2019).

Konsultasi virtual berbasis AI terintegrasi dengan *Remote Patient Monitoring* (RPM) melalui perangkat wearable dan IoT medis yang memantau data seperti denyut jantung, saturasi oksigen, tekanan darah, dan glukosa darah. Algoritma AI menganalisis data tersebut untuk mendeteksi perubahan klinis lebih awal. Meta-analisis Kruse *et al.* (2019) menunjukkan bahwa RPM berbasis AI pada pasien gagal jantung kronis dapat menurunkan angka rawat inap ulang hingga 20–35% serta mengurangi mortalitas. Selain itu, predictive analytics pada sistem RPM memungkinkan personalisasi yang adaptif jadwal konsultasi pasien (Steinhubl *et al.*, 2015).

Integrasi dengan Rekam Medis Elektronik (RME) mendukung kesinambungan layanan karena klinisi dapat mengakses riwayat pasien secara real-time dan menyinkronkan hasil konsultasi secara otomatis. AI juga dapat menganalisis data

RME untuk mengidentifikasi risiko kesehatan yang mungkin terlewatkan dalam konsultasi konvensional (Shickel *et al.*, 2018). Interoperabilitas ini didukung standar HL7 FHIR yang memungkinkan pertukaran data kesehatan secara aman dan terstruktur.

7.5 Peluang dan Hambatan Implementasi

7.5.1 Peluang Implementasi

Integrasi telemedicine dan AI memberikan peluang besar dalam meningkatkan akses layanan kesehatan, terutama di negara kepulauan seperti Indonesia yang memiliki distribusi tenaga kesehatan tidak merata. Teknologi ini memungkinkan masyarakat di daerah terpencil memperoleh akses terhadap layanan dan konsultasi spesialis tanpa harus melakukan perjalanan jauh. McKinsey Global Institute (2022) memperkirakan digitalisasi kesehatan, termasuk telemedicine dan AI, dapat menghasilkan nilai ekonomi global sebesar 350–410 miliar dolar AS per tahun pada 2030 melalui peningkatan efisiensi dan pencegahan penyakit yang lebih efektif.

Dari sisi efisiensi, AI dalam konsultasi virtual mampu mengurangi beban administratif dokter melalui otomatisasi dokumentasi klinis, pengkodean diagnosis, dan pembuatan rujukan. Sinsky *et al.* (2016) menemukan bahwa dokter di Amerika Serikat menghabiskan sekitar dua jam untuk tugas administratif pada setiap satu jam interaksi dengan pasien, sehingga otomatisasi AI berpotensi meningkatkan waktu pelayanan klinis. Selain itu, predictive analytics membantu mengidentifikasi pasien berisiko tinggi untuk intervensi preventif sehingga dapat menekan angka rawat inap dan biaya perawatan (Obermeyer & Emanuel, 2016). Dalam konteks kesehatan masyarakat, telemedicine berbasis AI juga dapat berfungsi sebagai sistem peringatan dini untuk mendeteksi

potensi wabah melalui pola konsultasi virtual (Brownstein *et al.*, 2009).

7.5.2 Hambatan Implementasi

a. Hambatan Teknis dan Infrastruktur

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi telemedicine berbasis AI masih menghadapi berbagai hambatan teknis. Kesenjangan infrastruktur digital seperti internet yang tidak stabil, bandwidth terbatas, dan akses smartphone yang belum merata menjadi kendala utama, khususnya di negara berkembang. Data Badan Pusat Statistik (2022) menunjukkan masih terdapat 12.548 desa di Indonesia yang belum terjangkau internet, sehingga masyarakat yang paling membutuhkan layanan telemedicine justru sulit mengaksesnya. Kondisi ini berisiko memperlebar kesenjangan kesehatan apabila tidak diimbangi kebijakan infrastruktur yang merata (Lupton, 2014).

Hambatan lain adalah kualitas dan representativitas data untuk pelatihan AI medis. Dataset yang tidak mencerminkan keragaman populasi dapat menimbulkan bias algoritmik. Obermeyer *et al.* (2019) menemukan bahwa algoritma kesehatan di Amerika Serikat cenderung meremehkan kebutuhan pasien kulit hitam akibat bias data historis. Tantangan serupa juga dihadapi Asia Tenggara karena keterbatasan dataset medis lokal yang berkualitas (Nsoesie, 2018).

b. Hambatan Regulatoris dan Etis

Regulasi telemedicine berbasis AI masih belum sepenuhnya matang. Banyak aturan kesehatan belum mampu mengakomodasi isu seperti otonomi AI, akuntabilitas algoritma, dan tanggung jawab hukum akibat kesalahan diagnosis AI (Gerke *et al.*, 2020). Di Indonesia, UU No. 17 Tahun 2023 tentang Kesehatan telah mendukung layanan

kesehatan digital, namun regulasi khusus terkait AI diagnostik dan konsultasi virtual masih perlu dikembangkan.

Dari sisi etika, penggunaan AI menimbulkan tantangan pada prinsip informed consent, transparansi, dan keadilan layanan. Sistem AI yang bersifat black box membuat proses pengambilan keputusan sulit dipahami pasien maupun dokter. Karena itu, konsep Explainable AI (XAI) dikembangkan agar sistem AI tidak hanya akurat, tetapi juga mampu menjelaskan dasar rekomendasinya secara mudah dipahami (Reyes *et al.*, 2020). Selain itu, manfaat telemedicine dan AI perlu dijamin dapat diakses seluruh masyarakat tanpa diskriminasi sosial ekonomi maupun geografis.

c. Hambatan Sosiokultural dan Penerimaan Pengguna

Keberhasilan telemedicine berbasis AI juga dipengaruhi penerimaan tenaga kesehatan dan pasien. Model TAM dan UTAUT menunjukkan bahwa kemudahan penggunaan, manfaat, norma sosial, dan kepercayaan terhadap teknologi menjadi faktor utama adopsi telemedicine (Venkatesh *et al.*, 2012). Tenaga kesehatan sering khawatir terhadap berkurangnya hubungan terapeutik dan otonomi klinis, sedangkan pasien menghadapi hambatan berupa rendahnya literasi digital, kekhawatiran privasi, dan preferensi terhadap layanan tatap muka (Boonstra *et al.*, 2020).

Untuk mengatasi hambatan tersebut, diperlukan pendekatan yang tidak hanya berfokus pada teknologi, tetapi juga edukasi dan keterlibatan masyarakat. Program literasi digital kesehatan, desain aplikasi yang ramah pengguna, serta dukungan tokoh masyarakat menjadi strategi penting dalam meningkatkan penerimaan telemedicine. Model layanan hibrida yang menggabungkan konsultasi virtual dengan fasilitas kesehatan lokal seperti Puskesmas juga dinilai efektif dalam menjembatani kebutuhan masyarakat

terhadap layanan digital dan tatap muka (Dorsey & Topol, 2016).

DAFTAR PUSTAKA

- Abramoff, M. D., Lavin, P. T., Birch, M., Shah, N., & Folk, J. C. (2018). Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *npj Digital Medicine*, 1(1), 39. <https://doi.org/10.1038/s41746-018-0040-6>
- Badan Pusat Statistik. (2022). Statistik Telekomunikasi Indonesia 2022. Badan Pusat Statistik Republik Indonesia.
- Bashshur, R. L., Howell, J. D., Krupinski, E. A., Harms, K. M., Bashshur, N., & Doarn, C. R. (2016). The empirical foundations of telemedicine interventions in primary care. *Telemedicine and e-Health*, 22(5), 342–375. <https://doi.org/10.1089/tmj.2016.0045>
- Boonstra, A., Versluis, A., & Vos, J. F. J. (2020). Implementing electronic health records in hospitals: A systematic literature review. *BMC Health Services Research*, 14(1), 370. <https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-370>
- Brownstein, J. S., Freifeld, C. C., & Madoff, L. C. (2009). Digital disease detection — Harnessing the Web for public health surveillance. *New England Journal of Medicine*, 360(21), 2153–2157. <https://doi.org/10.1056/NEJMp0900702>
- Doarn, C. R., & Merrell, R. C. (2014). Telemedicine and e-health in disaster response. *Telemedicine and e-Health*, 20(7), 605–606. <https://doi.org/10.1089/tmj.2014.9983>
- Dorsey, E. R., & Topol, E. J. (2016). State of telehealth. *New England Journal of Medicine*, 375(2), 154–161. <https://doi.org/10.1056/NEJMra1601705>
- Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639), 115–118. <https://doi.org/10.1038/nature21056>

- Fitzpatrick, K. K., Darcy, A., & Vierhile, M. (2017). Delivering cognitive behavior therapy to young adults with symptoms of depression and anxiety using a fully automated conversational agent (Woebot): A randomized controlled trial. *JMIR Mental Health*, 4(2), e19. <https://doi.org/10.2196/mental.7785>
- Gerke, S., Minssen, T., & Cohen, G. (2020). Ethical and legal challenges of artificial intelligence-driven healthcare. In *Artificial Intelligence in Healthcare* (pp. 295–336). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818438-7.00012-5>
- Hannun, A. Y., Rajpurkar, P., Haghpanahi, M., Tison, G. H., Bourn, C., Turakhia, M. P., & Ng, A. Y. (2019). Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nature Medicine*, 25(1), 65–69. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0268-3>
- Hollander, J. E., & Carr, B. G. (2020). Virtually perfect? Telemedicine for Covid-19. *New England Journal of Medicine*, 382(18), 1679–1681. <https://doi.org/10.1056/NEJMp2003539>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2021). Laporan Kinerja Kementerian Kesehatan Tahun 2021. Kemenkes RI.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2022). Profil Kesehatan Indonesia 2022. Kemenkes RI.
- Kruse, C. S., Stein, A., Thomas, H., & Kaur, H. (2019). The use of Electronic Health Records to support population health: A systematic review of the literature. *Journal of Medical Systems*, 42(11), 214. <https://doi.org/10.1007/s10916-018-1075-6>

- Laranjo, L., Dunn, A. G., Tong, H. L., Kocaballi, A. B., Chen, J., Bashir, R., Surian, D., Paton, B., Coiera, E., & Lau, A. Y. S. (2018). Conversational agents in healthcare: A systematic review. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 25(9), 1248–1258. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocy072>
- Lupton, D. (2014). The commodification of patient opinion: The digital patient experience economy in the age of big data. *Sociology of Health & Illness*, 36(6), 856–869. <https://doi.org/10.1111/1467-9566.12109>
- McKinsey Global Institute. (2022). *The Future of Healthcare: Value Creation Through Next-Generation Business Models*. McKinsey & Company.
- Nsoesie, E. O. (2018). Evaluating artificial intelligence applications in clinical settings. *JAMA Network Open*, 1(5), e182658. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.2658>
- Obermeyer, Z., & Emanuel, E. J. (2016). Predicting the future — big data, machine learning, and clinical medicine. *New England Journal of Medicine*, 375(13), 1216–1219. <https://doi.org/10.1056/NEJMp1606181>
- Obermeyer, Z., Powers, B., Vogeli, C., & Mullainathan, S. (2019). Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science*, 366(6464), 447–453. <https://doi.org/10.1126/science.aax2342>
- Ohannessian, R., Duong, T. A., & Odone, A. (2020). Global telemedicine implementation and integration within health systems to fight the COVID-19 pandemic: A call to action. *JMIR Public Health and Surveillance*, 6(2), e18810. <https://doi.org/10.2196/18810>
- Palanica, A., Flaschner, P., Thommandram, A., Li, M., & Fossat, Y. (2019). Physicians' perceptions of chatbots in health care: Cross-sectional web-based survey. *Journal of Medical Internet Research*, 21(4), e12887. <https://doi.org/10.2196/12887>

- Rajpurkar, P., Irvin, J., Ball, R. L., Zhu, K., Yang, B., Mehta, H., Duan, T., Ding, D., Bagul, A., Langlotz, C., Shpanskaya, K., Lungren, M. P., & Ng, A. Y. (2017). CheXNet: Radiologist-level pneumonia detection on chest X-rays with deep learning. arXiv preprint arXiv:1711.05225.
- Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O., & Topol, E. J. (2022). AI in health and medicine. *Nature Medicine*, 28(1), 31–38. <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01614-0>
- Reyes, M., Meier, R., Pereira, S., Silva, C. A., Dahlweid, F. M., von Tengg-Kobligh, H., Summers, R. M., & Wiest, R. (2020). On the interpretability of artificial intelligence in radiology: Challenges and opportunities. *Radiology: Artificial Intelligence*, 2(3), e190043. <https://doi.org/10.1148/ryai.2020190043>
- Shickel, B., Tighe, P. J., Bihorac, A., & Rashidi, P. (2018). Deep EHR: A survey of recent advances in deep learning techniques for electronic health record (EHR) analysis. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 22(5), 1589–1604. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2767063>
- Sinsky, C., Colligan, L., Li, L., Prgomet, M., Reynolds, S., Goeders, L., Westbrook, J., Tutty, M., & Blike, G. (2016). Allocation of physician time in ambulatory practice: A time and motion study in 4 specialties. *Annals of Internal Medicine*, 165(11), 753–760. <https://doi.org/10.7326/M16-0961>
- Snoswell, C. L., Taylor, M. L., Comans, T. A., Smith, A. C., Gray, L. C., & Caffery, L. J. (2020). Determining if telehealth can reduce health system costs: Scoping review. *Journal of Medical Internet Research*, 22(10), e17298. <https://doi.org/10.2196/17298>
- Stein, N., Brooks, K. (2021). A fully automated conversational artificial intelligence for weight loss: Longitudinal observational study among overweight and obese adults. *JMIR Diabetes*, 6(4), e22836. <https://doi.org/10.2196/22836>

- Steinhubl, S. R., Muse, E. D., & Topol, E. J. (2015). The emerging field of mobile health. *Science Translational Medicine*, 7(283), 283rv3. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aaa3487>
- Sutton, R. T., Pincock, D., Baumgart, D. C., Sadowski, D. C., Fedorak, R. N., & Kroeker, K. I. (2020). An overview of clinical decision support systems: Benefits, risks, and strategies for success. *npj Digital Medicine*, 3(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0221-y>
- Thirunavukarasu, A. J., Ting, D. S. J., Elangovan, K., Gutierrez, L., Tan, T. F., & Ting, D. S. W. (2023). Large language models in medicine. *Nature Medicine*, 29(8), 1930–1940. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02448-8>
- Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44–56. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>
- Tuckson, R. V., Edmunds, M., & Hodgkins, M. L. (2017). Telehealth. *New England Journal of Medicine*, 377(16), 1585–1592. <https://doi.org/10.1056/NEJMSr1503323>
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2023 tentang Kesehatan. (2023). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2023 Nomor 105. Sekretariat Negara RI.
- Venkatesh, V., Thong, J. Y. L., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology: Extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS Quarterly*, 36(1), 157–178. <https://doi.org/10.2307/41410412>
- World Health Organization. (2010). Telemedicine: Opportunities and developments in member states (Report on the Second Global Survey on eHealth). WHO Press.

BAB 8

ETIKA, PRIVASI DATA, DAN KEAMANAN PENGGUNAAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DI BIDANG KESEHATAN

8.1 Pendahuluan

Integrasi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) ke dalam sistem pelayanan kesehatan telah memicu lompatan besar, dimulai dari percepatan penemuan obat baru (*drug discovery*) di ranah bioteknologi hingga otomatisasi manajemen inventaris maupun sistem pendukung keputusan klinis di apotek. Kemampuan AI dalam memproses set data kesehatan yang masif, termasuk rekam medis elektronik dan laporan reaksi efek samping obat yang merugikan, menawarkan potensi luar biasa untuk meningkatkan kepatuhan dan keselamatan dalam pengobatan pasien serta meningkatkan efisiensi pelayanan farmasi secara keseluruhan. Akan tetapi, pesatnya adopsi teknologi komputasi tingkat lanjut ini memunculkan lanskap etika yang sangat kompleks, sehingga menuntut keseimbangan antara pemanfaatan inovasi algoritma dan perlindungan hak-hak fundamental pasien. Penggunaan kecerdasan buatan yang dinamis dan terus belajar dari data baru memicu berbagai pertanyaan kritis mengenai pedoman operasional, transparansi, serta kepatuhan mutlak terhadap prinsip-prinsip bioetika di fasilitas kesehatan (Hasan *et al.*, 2024).

Dalam konteks pelayanan farmasi klinis, teknologi kecerdasan buatan harus diposisikan sebagai perangkat pendukung keputusan (*decision support*) secara mutlak, bukan sebagai entitas pengganti kepakaran klinis profesional. Federasi Farmasi Internasional secara tegas memadamkan bahwa apoteker harus selalu mengawasi dan memvalidasi setiap proses AI yang berkaitan dengan penyediaan pelayanan kesehatan kepada masyarakat. Arah ini selaras dengan prinsip global dari *World Health Organization* (WHO) dan UNESCO yang menitikberatkan pada pentingnya pengawasan manusia (*human oversight*), di mana sistem teknologi secanggih apapun tidak boleh menggeser atau menghilangkan tanggung jawab moral dan hukum dari tenaga kesehatan. Pada praktiknya, misalnya bagi apoteker, apoteker harus selalu siap untuk menelaah, mempertanyakan, atau memodifikasi rekomendasi dosis maupun interaksi obat yang dihasilkan oleh AI apabila rekomendasi tersebut tidak sejalan dengan *clinical judgement* dan kondisi spesifik dari pasien yang bersangkutan (UNESCO, 2021; WHO, 2021).

Tantangan etis terbesar bagi tenaga kesehatan di era digitalisasi ini berpusat pada urgensi perlindungan privasi data rekam medis pasien, ancaman peretasan keamanan siber, dan potensi bias dari algoritma itu sendiri. Model kecerdasan buatan yang dilatih menggunakan parameter data yang tidak lengkap atau tidak representatif sehingga sangat berisiko menghasilkan rekomendasi terapi yang bias, sehingga akhirnya dapat memperburuk ketidaksetaraan kesehatan pada demografi tertentu. Oleh karena itu, prinsip adopsi AI yang bertanggung jawab dalam praktik pelayanan kesehatan menuntut adanya transparansi logis dari pengembang algoritma, jaminan keamanan berlapis untuk data profil genomik maupun riwayat pengobatan yang sangat sensitif, serta pembentukan regulasi hukum yang kuat. Pasien memiliki hak penuh atas otonominya dan harus merasa yakin bahwa teknologi canggih seperti AI ini beroperasi hanya untuk mengoptimalkan luaran kesembuhan

mereka tanpa mengorbankan kerahasiaan data pribadi sekecil apapun (Hasan *et al.*, 2024; Mammen *et al.*, 2025).

8.2 Kerahasiaan Data Pasien

Dalam suatu ekosistem pelayanan kesehatan modern, data merupakan aset yang paling berharga, sekaligus suatu entitas yang rentan terhadap penyalahgunaan. Arus informasi medis tak lagi sekedar tumpukan kertas diagnosis, melainkan kumpulan *big data* yang mencakup riwayat pengobatan komprehensif, pola alergi, hingga profil genomik pasien yang sangat spesifik (Price & Cohen, 2019). Keberadaan data berskala masif ini dijadikan bahan bakar utama bagi algoritma kecerdasan buatan untuk melakukan analisis data secara prediktif dan menyusun rekomendasi pengobatan yang terindividualisasi (*personalized medicine*) yang presisi dan akurat.

Konsep privasi sangat sulit didefinisikan. Salah satu pandangan yang saat ini menonjol menghubungkan privasi dengan konteks. Terdapat aturan kontekstual tentang bagaimana informasi dapat mengalir yang bergantung pada aktor yang terlibat, proses akses informasi, frekuensi akses, dan tujuan akses tersebut. Ketika aturan kontekstual ini dilanggar, kita mengatakan telah terjadi pelanggaran privasi. Pelanggaran tersebut dapat terjadi karena aktor yang salah mendapatkan akses ke informasi, proses akses informasi dilanggar, atau tujuan akses tidak tepat, dan lain sebagainya. Ketika kita memikirkan alasan normatif mengapa pelanggaran tersebut bermasalah, alasan tersebut dapat dibagi (dengan beberapa penyederhanaan) menjadi dua kategori, yaitu kekhawatiran konsekuensialis dan deontologis. Dua peringatan perlu diperhatikan: pertama, beberapa pelanggaran privasi menimbulkan masalah di kedua kategori tersebut. Kedua, beberapa kekhawatiran yang kita bahas juga ada untuk pengumpulan "data kecil". Namun, pengaturan big data cenderung meningkatkan jumlah orang yang terpengaruh,

tingkat keparahan dampaknya, dan kesulitan bagi individu yang dirugikan untuk melakukan tindakan pencegahan atau swadaya (Price & Cohen, 2019)

Kekhawatiran konsekuensialis muncul dari konsekuensi negatif yang memengaruhi orang yang privasinya telah dilanggar. Konsekuensi negatif ini dapat berupa hal-hal nyata, misalnya, premi asuransi perawatan jangka panjang seseorang meningkat akibat informasi tambahan yang kini tersedia sebagai akibat dari pelanggaran privasi, seseorang mengalami diskriminasi pekerjaan, status HIV seseorang diketahui oleh orang-orang di lingkungan sosialnya, dan lain sebagainya, atau dapat berupa tekanan emosional yang terkait dengan mengetahui bahwa informasi medis pribadi "tersebar" dan berpotensi dieksploitasi oleh orang lain. Pertimbangkan potensi peningkatan kecemasan jika seseorang percaya bahwa dirinya kini rentan terhadap pencurian identitas, bahkan sebelum penyalahgunaan identitasnya terjadi (Price & Cohen, 2019).

Sementara itu, kekhawatiran deontologis tidak bergantung pada pengalaman konsekuensi negatif. Dalam kategori ini, kekhawatiran akibat pelanggaran privasi muncul bahkan jika tidak ada yang menggunakan informasi seseorang untuk melawan orang tersebut atau orang tersebut bahkan tidak pernah menyadari bahwa pelanggaran telah terjadi. Seseorang dapat dirugikan *oleh* pelanggaran privasi bahkan jika ia tidak dirugikan. Misalnya, anggaplah sebuah organisasi tanpa sengaja atau tanpa disadari mendapatkan akses ke data yang kita simpan di ponsel pintar kita sebagai bagian dari pengumpulan data yang lebih besar. Setelah meninjau data tersebut, termasuk foto-foto yang kita ambil tentang penyakit pribadi yang memalukan, organisasi tersebut menyadari bahwa data kita tidak berharga bagi mereka dan menghancurkan catatan tersebut. Kita tidak pernah mengetahui hal ini terjadi. Mereka yang meninjau data kita tinggal di luar negeri dan tidak akan pernah bertemu kita atau siapa pun yang mengenal kita. Sulit untuk mengatakan bahwa kita

telah dirugikan dalam pengertian konsekuensi, tetapi banyak yang berpikir bahwa hilangnya kendali atas data kita, invasi tersebut, itu sendiri bermasalah secara etis bahkan tanpa adanya kerugian (Price & Cohen, 2019).

Bagi apoteker dan tenaga kesehatan lainnya, integrasi antara sistem informasi rumah sakit dengan algoritma pihak ketiga membawa risiko kebocoran privasi yang signifikan. Perpindahan beberapa bagian data pengobatan yang sensitif, misalnya terapi HIV/AIDS, gangguan jiwa, ataupun riset farmakogenomik di bidang teknologi, ke dalam sistem berbasis *cloud* memunculkan kerentanan terhadap serangan siber (Gerke *et al.*, 2020). Jika perlindungan enkripsi tidak memadai, paparan data pengobatan ini dapat berujung pada pemberian stigma sosial ataupun diskriminasi asuransi kesehatan bagi pasien yang bersangkutan.

Oleh karena itu, prinsip *non-maleficence* (tidak merugikan) dalam praktik pelayanan kesehatan harus diperluas ke ranah digital. Suatu pedoman global dari WHO mengamatkan bahwa seluruh data medis yang digunakan untuk melatih sistem kecerdasan buatan harus melalui proses anonimisasi dan de-identifikasi yang sangat ketat. Tantangan terbesar bagi institusi kesehatan saat ini adalah memastikan bahwa arsitektur algoritma yang digunakan tidak memiliki celah yang memungkinkan pelacakan balik (reidentifikasi) data kesehatan ke identitas asli individu pasien (WHO, 2021).

8.3 Ancaman Bias Algoritma

Konsep dari penggunaan algoritma itu sendiri adalah suatu sistem kecerdasan buatan belajar mengklasifikasikan dari contoh yang sudah dilatih, yang menjadi bagian dari pembelajaran terawasi. Beberapa penelitian terkait kesehatan yang berkaitan dengan algoritma telah berfokus pada pengambilan keputusan diagnostik dalam praktik klinis, misalnya diagnosis keganasan

dari foto lesi kulit, prediksi penyakit mata yang mengancam penglihatan dari pemindaian tomografi koherensi optik, pemberian prediksi risiko penyakit berdasarkan banyak faktor kompleks, atau bahkan penyesuaian jenis terapi tertentu untuk individu. Algoritma adalah suatu strategi yang memaksimalkan 'imbalan' (pembelajaran penguatan) dan telah digunakan untuk menguji pendekatan terhadap masalah pengobatan personalisasi lainnya (Challen *et al.*, 2019).

Salah satu miskonsepsi terbesar dalam adopsi teknologi kesehatan adalah anggapan bahwa suatu sistem kecerdasan buatan selalu memberikan luaran yang sepenuhnya objektif dan netral. Faktanya, arsitektur kecerdasan buatan sangat bergantung pada set data historis yang digunakan selama fase pelatihannya (Challen *et al.*, 2019). Jika sebuah sistem dikembangkan menggunakan rekam medis yang didominasi oleh kelompok ras, gender, atau rentang usia tertentu, maka algoritma tersebut secara otomatis akan mereplikasi dan bahkan memperkuat bias sosial yang sudah ada.

Berbagai aplikasi pembelajaran untuk kecerdasan buatan ini membutuhkan algoritma yang berbeda, yang jumlahnya sangat banyak. Kinerja algoritma tersebut seringkali sangat bergantung pada komposisi data pelatihan yang tepat dan parameter lain yang dipilih selama pelatihan. Bahkan dengan mengontrol faktor-faktor ini, beberapa algoritma tidak akan menghasilkan keputusan yang identik ketika dilatih dalam keadaan yang identik. Hal ini menyulitkan untuk mereproduksi temuan penelitian dan akan menyulitkan untuk mengimplementasikan sistem AI atau ML yang 'siap pakai'. Patut dicatat dalam literatur yang terkait, belum ada cara yang disepakati untuk melaporkan temuan atau bahkan membandingkan akurasi sistem kecerdasan buatan yang ada (Challen *et al.*, 2019).

Misalnya dalam konteks farmasi klinis, bias algoritma ini secara langsung mengancam pilar keselamatan pasien (*patient safety*). Sebagai contoh, sistem *Clinical Decision Support* (CDS) yang tidak dilatih dengan variasi profil farmakokinetik kelompok lanjut usia berisiko menghasilkan rekomendasi penyesuaian dosis yang toksik. Kesalahan semacam ini dapat memicu *medication error* sistemik, di mana algoritma gagal mendeteksi kontraindikasi spesifik pada demografi minoritas yang kurang terwakili dalam data pelatihan (Hasan *et al.*, 2024).

Berikut ini beberapa pertimbangan isu kualitas dan keamanan AI yang berkaitan dengan ancaman bias algoritma (Challen *et al.*, 2019).

8.3.1 Jangka Pendek

a. Pergeseran Distribusi

Ketidaksesuaian antara data atau lingkungan tempat sistem dilatih dan yang digunakan dalam pengoperasian, karena bias dalam set pelatihan, perubahan dari waktu ke waktu, atau penggunaan sistem pada populasi yang berbeda, dapat mengakibatkan prediksi 'di luar sampel' yang salah. Contohnya, keakuratan suatu sistem yang memprediksi terjadinya cedera ginjal akut berdasarkan data rekam medis lainnya, menjadi kurang akurat seiring berjalannya waktu karena pola penyakit berubah (Davis *et al.*, 2017).

b. Ketidakpekaan terhadap benturan

Suatu sistem membuat prediksi yang gagal memperhitungkan dampak prediksi positif palsu atau negatif palsu dalam konteks penggunaan klinis. Contohnya, sistem diagnostik yang tidak aman dilatih untuk menjadi seakurat mungkin dengan mendiagnosis lesi jinak secara tepat, dengan mengorbankan kemungkinan terlewatnya deteksi keganasan (Esteva *et al.*, 2017).

- c. Pengambilan keputusan *black-box* (kotak hitam)
Prediksi suatu sistem tidak terbuka untuk pemeriksaan atau interpretasi dan hanya dapat dinilai benar berdasarkan hasil akhirnya. Contohnya, sistem AI yang menganalisis sinar-X mungkin tidak akurat dalam skenario tertentu karena masalah pada data pelatihan, tetapi sebagai kotak hitam, hal ini tidak mungkin diprediksi dan hanya akan terlihat setelah penggunaan yang lama (Rajpurkar *et al.*, 2017).
- d. Mode kegagalan tidak aman
Suatu sistem menghasilkan prediksi ketika sistem tersebut tidak yakin akan keakuratan prediksinya, atau ketika sistem tersebut memiliki informasi yang tidak cukup untuk membuat prediksi. Contohnya, sistem pendukung keputusan AI yang tidak aman dapat memprediksi risiko penyakit yang rendah ketika beberapa data yang relevan hilang. Tanpa informasi apa pun tentang kepercayaan prediksi, seorang dokter mungkin tidak menyadari betapa tidak dapat dipercayanya prediksi ini (Varshney *et al.*, 2016).

8.3.2 Jangka Menengah

- a. Sikap puas diri terhadap otomatisasi
Prediksi suatu sistem diberi bobot lebih besar daripada yang seharusnya karena sistem tersebut dianggap tidak mungkin salah atau mengkonfirmasi asumsi awal. Contohnya, seorang dokter yang sibuk berhenti mempertimbangkan alternatif lain ketika sistem AI yang biasanya dapat diprediksi menyetujui diagnosis mereka (Challen *et al.*, 2019).
- b. Penguatan praktik yang sudah ketinggalan zaman
Suatu sistem dilatih berdasarkan data historis yang memperkuat praktik yang ada, dan tidak dapat beradaptasi dengan perkembangan baru atau perubahan kebijakan yang

tiba-tiba. Contohnya, suatu obat ditarik dari peredaran karena masalah keamanan, tetapi sistem pendukung keputusan berbasis AI tidak dapat beradaptasi karena tidak memiliki data historis tentang alternatifnya (Challen *et al.*, 2019).

c. Ramalan yang menjadi kenyataan

Penerapan suatu sistem secara tidak langsung memperkuat hasil yang dirancang untuk dideteksi. Contohnya, sistem yang dilatih berdasarkan data hasil memprediksi bahwa pasien kanker tertentu memiliki prognosis yang buruk. Hal ini mengakibatkan mereka menerima perawatan paliatif daripada perawatan kuratif, yang memperkuat perilaku yang telah dipelajari (Challen *et al.*, 2019).

8.3.3 Jangka Panjang

a. Efek samping negatif

Sistem belajar untuk melakukan fungsi sempit yang gagal mempertimbangkan beberapa konteks yang lebih luas, sehingga menciptakan konsekuensi yang tidak diinginkan dan berbahaya. Contohnya, ventilator otonom menghasilkan strategi ventilasi yang berhasil mempertahankan oksigenasi jangka pendek dengan mengorbankan kerusakan paru-paru jangka panjang (Prasad *et al.*, 2017).

b. Peretasan "hadiah" dari suatu intervensi

Suatu pengganti untuk tujuan yang dimaksud digunakan sebagai 'hadiah', dan sistem yang terus belajar menemukan cara tak terduga untuk mencapai hadiah tersebut tanpa memenuhi tujuan yang dimaksud. Contohnya, infus heparin otonom menemukan cara untuk mengontrol waktu tromboplastin parsial teraktivasi (aPTT) pada saat pengukuran tanpa mencapai kontrol jangka panjang (Nemati *et al.*, 2016).

c. Eksplorasi yang tidak aman

Sistem pembelajaran aktif mulai mempelajari strategi baru dengan menguji kondisi batas dengan cara yang tidak aman. Contohnya, infus heparin otonom yang terus belajar mulai menggunakan dosis bolus yang sangat besar dan berbahaya untuk mencapai kontrol aPTT yang cepat (Nemati *et al.*, 2016).

d. Pengawasan yang tidak terukur

Suatu sistem membutuhkan tingkat pemantauan yang menjadi sangat memakan waktu untuk disediakan. Contohnya, pompa insulin subkutan otonom mengharuskan pasien untuk memberikan detail lengkap tentang semua yang telah mereka makan sebelum pompa tersebut dapat menyesuaikan regimen insulin (Challen *et al.*, 2019).

Mencegah diskriminasi berbasis algoritma ini menuntut keterlibatan aktif dari tenaga kesehatan lintas disiplin. Parameter validasi pengembangan AI tidak boleh hanya berfokus pada akurasi matematis, melainkan juga pada nilai keadilan dan inklusivitas (UNESCO, 2021). Sebelum sebuah sistem kecerdasan buatan diimplementasikan di rumah sakit atau apotek, pengembang teknologi dan praktisi klinis wajib melakukan uji komprehensif untuk memastikan sistem tersebut bekerja secara merata dan aman bagi seluruh keragaman populasi pasien.

8.4 Etika Penggunaan AI

Kemampuan kecerdasan buatan dalam memproses dan melakukan skrining atas ribuan resep yang kompleks dalam hitungan detik menawarkan efisiensi yang belum pernah terjadi sebelumnya. Namun, otomatisasi tingkat tinggi ini memunculkan dilema etis mendasar: sejauh mana tenaga kesehatan harus mendelegasikan kepercayaan mereka kepada sebuah mesin (Topol, 2019). Prinsip etis yang disepakati secara global menekankan bahwa sistem AI harus beroperasi sebagai

perangkat augmentasi (*human-in-the-loop*), bukan sebagai entitas otonom yang mengambil alih wewenang klinis.

Misalnya, Federasi Farmasi Internasional menegaskan bahwa tanggung jawab moral, etika profesi, dan kewajiban hukum (*professional liability*) atas keselamatan medikasi pasien tetap berada di tangan apoteker (FIP, 2025). Keputusan mutlak mengenai kelayakan sebuah terapi dan penyerahan obat tidak boleh diserahkan sepenuhnya kepada algoritma. Setiap rekomendasi yang dihasilkan oleh sistem AI wajib melalui proses telaah kritis dan validasi oleh tenaga kesehatan manusia yang memiliki pemahaman utuh mengenai kondisi holistik pasien.

Lebih lanjut, transparansi algoritma (*explainability*) menjadi prasyarat mutlak untuk menghindari fenomena *black-box*, di mana pengguna tidak memahami logika di balik rekomendasi mesin. Apoteker dan dokter harus dibekali hak serta kemampuan untuk mempertanyakan anomali perhitungan mesin. Mengabaikan *clinical judgment* demi mematuhi saran algoritma yang tidak transparan merupakan sebuah pelanggaran terhadap sumpah profesi dan etika perawatan pasien (Gerke *et al.*, 2020).

Secara umum, belum adanya regulasi khusus yang mengatur penggunaan AI di dunia kesehatan. Namun, WHO (2021) mempublikasikan *Ethics and Governance of Artificial Intelligence for Health: WHO Guidance* sebagai panduan AI dalam dunia kesehatan. Enam prinsip etik yang direkomendasikan dalam penggunaan AI di dunia kesehatan yaitu perlindungan otonomi, peningkatan keselamatan dan kesejahteraan manusia, pemastian transparansi, akuntabilitas dan tanggung jawab, pemastian inklusivitas dan kesetaraan, serta promosi AI yang berkelanjutan dan responsif. Hendaknya keenam prinsip ini diimplementasikan oleh semua pemangku kebijakan serta kementerian harus bekerja sama untuk mengintegrasikan norma-norma etika dalam setiap tahap pelayanan kesehatan.

Dalam panduan tersebut juga diatur terkait perlunya perlindungan data, otonomi pasien untuk menolak teknologi AI dalam perawatannya, serta kompensasi yang harus diberikan pada pasien jika terjadi efek dari kesalahan AI.

Kesimpulannya, setiap tenaga kesehatan harus berhati-hati dalam menerapkan AI dalam aktivitas klinis sehari-harinya. Jadikan AI sebagai perangkat yang membantu diagnosis dan tatalaksana penyakit. Keputusan klinis tetap di tangan dokter dan apoteker dengan berdasarkan dari anamnesis, pemeriksaan fisik, penunjang, dan kondisi khusus lainnya. Fasilitas kesehatan diharapkan memilih AI yang sistemnya dapat dipertanggungjawabkan, telah dievaluasi dan direkomendasikan sebelumnya yang menyatakan bahwa AI ini aman untuk digunakan dalam pelayanan kesehatan (Librianty & Prawiroharjo, 2023).

8.5 Regulasi dan Perlindungan Data: Tanggung Jawab Lintas Sektor

Menghadapi kecepatan inovasi AI yang eksponensial, kerangka hukum kesehatan konvensional saat ini seringkali tertinggal dalam mengakomodasi berbagai kompleksitas baru. Regulasi yang ada umumnya belum mendefinisikan dengan jelas batasan pertanggungjawaban hukum apabila terjadi malapraktik medis yang bersumber dari kesalahan prediksi sistem algoritmik. Akibatnya, terdapat celah regulasi yang menuntut pembentukan aturan baru yang spesifik mengikat pengembang teknologi sekaligus fasilitas layanan kesehatan (Mammen *et al.*, 2025).

Penerapan tata kelola ini tidak bisa berjalan hanya dengan mengandalkan inisiatif individu di lapangan. Jajaran pimpinan eksekutif atau *Board of Directors* (BOD) di rumah sakit dan industri kesehatan memegang peranan krusial dalam mendirikan berbagai macam strategi tata kelola keamanan yang harus dipatuhi seluruh tim. Keputusan strategis dari tingkat pimpinan

iniilah yang akan diterjemahkan menjadi prosedur operasional standar bagi apoteker, dokter, dan staf IT dalam menangani intervensi teknologi (WHO, 2021).

Strategi komprehensif tersebut harus diwujudkan ke dalam kebijakan perlindungan privasi yang proaktif, bukan sekadar reaktif. Fasilitas kesehatan diwajibkan untuk menjalankan audit algoritma secara berkala, menyusun protokol mitigasi jika terjadi kebocoran data (*data breach*), serta memperbarui mekanisme *informed consent*. Pasien berhak mendapatkan penjelasan yang transparan mengenai sejauh mana keterlibatan AI dalam proses diagnosis dan pengobatan mereka, memastikan hak otonomi mereka tetap terjaga di era digital (Price & Cohen, 2019).

DAFTAR PUSTAKA

- Challen, R., Denny, J., Pitt, M., Gompels, L., Edwards, T., & Tsaneva-Atanasova, K. (2019). Artificial intelligence, bias and clinical safety. *BMJ quality & safety*, 28(3), 231–237. <https://doi.org/10.1136/bmjqs-2018-008370>
- Davis, S. E., Lasko, T. A., Chen, G., Siew, E. D., & Matheny, M. E. (2017). Calibration drift in regression and machine learning models for acute kidney injury. *Journal of the American Medical Informatics Association : JAMIA*, 24(6), 1052–1061. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocx030>
- Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639), 115–118. <https://doi.org/10.1038/nature21056>
- Gerke, S., Minssen, T., & Cohen, G. (2020). Ethical and legal challenges of artificial intelligence-driven healthcare. *Artificial Intelligence in Healthcare*, 295–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818438-7.00012-5>
- Hasan, H. E., Jaber, D., Khabour, O. F., & Alzoubi, K. H. (2024). Ethical considerations and concerns in the implementation of AI in pharmacy practice: a cross-sectional study. *BMC medical ethics*, 25(1), 55. <https://doi.org/10.1186/s12910-024-01062-8>
- International Pharmaceutical Federation (FIP). (2025). *Statement of Policy on Artificial Intelligence (AI) in Pharmacy Practice*. The Hague: FIP.
- Librianty, N., & Prawiroharjo, P. (2023). Tinjauan Etika Penggunaan Artificial Intelligence di Kedokteran. *Jurnal Etika Kedokteran Indonesia*, 7(1), 1—9.

- Mammen, M. V., Suman, A., Anand, A., Kumar, A., & Singh, D. P. (2025). Artificial Intelligence in Pharmacy, Regulatory Challenges and Jurisdictional. *Lex Localis – Journal of Local Self-Government*, 23 (S5).
- Nemati, S., Ghassemi, M. M., & Clifford, G. D. (2016). Optimal medication dosing from suboptimal clinical examples: a deep reinforcement learning approach. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 2016*, 2978–2981. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591355>
- Prasad, N., Cheng, L. F., Chivers, C., Draugelis, M., & Engelhardt, B. E. (2017). A reinforcement learning approach to weaning of mechanical ventilation in intensive care units. *arXiv preprint arXiv:1704.06300*.
- Price, W. N., & Cohen, I. G. (2019). Privacy in the age of medical big data. *Nature medicine*, 25(1), 37–43. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0272-7>
- Rajpurkar, P., Irvin, J., Zhu, K., Yang, B., Mehta, H., Duan, T., & Ng, A. Y. (2017). Chexnet: Radiologist-level pneumonia detection on chest x-rays with deep learning. *arXiv preprint arXiv:1711.05225*.
- Topol, E. J. (2019). *Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again*. Basic Books.
- UNESCO. (2021). *Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- World Health Organization. (2021). *Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance*. Geneva: World Health Organization.
- Varshney, K. R., Grover, P., & Sahai, A. (2016). *Information Theory and Applications Workshop*.

BAB 9

TANTANGAN IMPLEMENTASI *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* DALAM SISTEM PELAYANAN KESEHATAN DI INDONESIA

9.1 Pendahuluan

Transformasi digital telah menjadi keniscayaan dalam pembangunan kesehatan nasional. Pemerintah Indonesia menempatkan layanan kesehatan sebagai prioritas pertama dalam Strategi Nasional Pemanfaatan Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence/AI*), mengakui potensi teknologi ini dalam meningkatkan akurasi diagnosis, memperluas akses layanan, dan mengoptimalkan manajemen kesehatan. Kementerian Kesehatan mengimplementasikan model prediktif, preventif, partisipatif, dan personal (4P) sebagai kerangka kerja adopsi AI di seluruh tingkatan layanan.

Optimisme ini perlu disikapi secara kritis, AI bukanlah solusi ajaib. (Wasir *et al.*, 2025) yang menganalisis 20 studi digital health di wilayah rural dan terpencil Indonesia menemukan bahwa implementasi masih menghadapi hambatan persisten: keterbatasan akses internet, infrastruktur tidak memadai, dan rendahnya literasi digital. Kesenjangan antara harapan dan kesiapan lapangan bersifat multidimensi, mencakup aspek sumber daya manusia, infrastruktur, regulasi, dan keadilan digital.

Bab ini menguraikan keempat tantangan tersebut secara sistematis. Tujuannya bukan untuk meremehkan potensi AI, melainkan untuk mengidentifikasi secara jujur apa yang perlu dibenahi agar teknologi ini benar-benar memberi manfaat bagi seluruh lapisan masyarakat Indonesia. Di tengah euforia digitalisasi, penting untuk mengingat bahwa keberhasilan transformasi kesehatan tidak diukur dari seberapa canggih teknologinya, melainkan dari seberapa banyak masyarakat yang merasakan manfaatnya.



Gambar 7. Empat Tantangan Implementasi AI Kesehatan di Indonesia
Sumber: Kemenkes RI (2025), WHO (2024), dan UU PDP (2022).

9.2 Konsep Implementasi AI dalam Pelayanan Kesehatan Indonesia

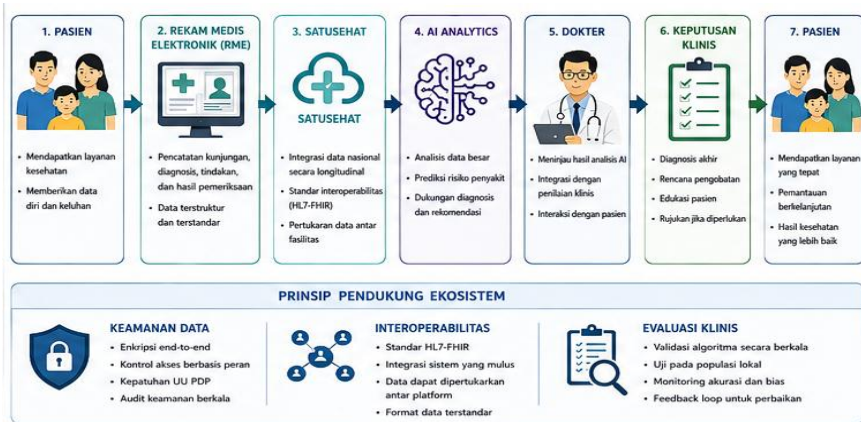
Kerangka kebijakan AI kesehatan Indonesia tertuang dalam Strategi Nasional Kecerdasan Artifisial (STRANAS KA) 2020–2045, yang dioperasionalkan melalui *National Artificial Intelligence Roadmap 2025–2029*. Dokumen yang dikoordinasikan Kementerian Komunikasi dan Digital ini menetapkan kesehatan sebagai salah satu bidang prioritas, bersama ketahanan pangan, pendidikan, ekonomi digital, dan

reformasi birokrasi (Azhar, 2025; OECD.AI, 2026). Empat pilar utama STRANAS KA meliputi:

1. Etika dan kebijakan
2. Pengembangan talenta
3. Infrastruktur dan data, serta
4. Riset dan inovasi industri

Kementerian Kesehatan mengimplementasikan pilar-pilar ini melalui platform SATUSEHAT, infrastruktur kritis nasional yang mengintegrasikan data rekam medis elektronik secara longitudinal. Sejak Desember 2024, seluruh fasilitas kesehatan diwajibkan mengirimkan data kunjungan dan diagnosis ke platform ini (Kemenkes, 2025). Di tingkat fasilitas, pemerintah mengembangkan Standar Nasional Indonesia (SNI) *Smart Hospital*. Standar ini menjadi pedoman bagi rumah sakit dalam membangun sistem yang terintegrasi, efisien, dan berorientasi pada pasien. Cakupannya meliputi interoperabilitas, keamanan data, efisiensi energi, dan keselamatan pasien. Beberapa rumah sakit besar seperti RSUP Dr. Sardjito di Yogyakarta dan RSUD Dr. Soetomo di Surabaya telah mulai mengintegrasikan AI untuk mendukung diagnosis radiologi dan manajemen antrean pasien (Edi Susilo, 2026).

Model 4P (prediktif, preventif, partisipatif, personal) menjadi pendekatan utama penerapan AI. Model ini menuntut ketersediaan data yang akurat, *real-time*, dan representatif secara nasional. Di sinilah letak tantangan utamanya: prasyarat ideal ini masih jauh dari kondisi aktual di lapangan. Penelitian oleh (Karami & Madloul, 2025) menegaskan bahwa di negara berkembang, hambatan sistemik seperti infrastruktur tidak memadai dan kekurangan tenaga kerja menyebabkan layanan kesehatan menjadi episodik dan meminggirkan populasi rentan. Padahal, penguatan layanan kesehatan primer dapat mencegah hingga 60 juta kematian pada 2030.



Gambar 8. Ekosistem AI dalam Pelayanan Kesehatan Indonesia

Sumber: Aisyah *et al.*, 2025; Amir *et al.*, 2025.

9.3 Tantangan Implementasi AI

9.3.1 Kesiapan Sumber Daya Manusia Kesehatan

Tantangan paling fundamental terletak pada kesiapan SDM kesehatan. Sebuah studi oleh (FITRI, 2025) tentang interoperabilitas Sistem Informasi Manajemen Rumah Sakit (SIMRS) dengan SATUSEHAT di Rumah Sakit Universitas Andalas menggunakan metode kualitatif dengan wawancara mendalam terhadap pengelola sistem, mengungkapkan bahwa pelatihan SDM belum disusun secara rutin dan sistematis. Rumah sakit belum memiliki SOP khusus terkait integrasi data, serta belum tersedia mekanisme evaluasi dan audit kepatuhan yang terdokumentasi. Temuan ini bukan kasus terisolasi. Sejalan dengan laporan (Wasir *et al.*, 2025) yang menganalisis 20 studi digital health di Indonesia, ditemukan bahwa variasi literasi digital menjadi salah satu hambatan utama adopsi di daerah terpencil. Tenaga kesehatan yang merupakan garis terdepan, terutama di puskesmas dan fasilitas layanan primer, kesulitan mengikuti tuntutan digitalisasi karena pelatihan yang tidak memadai. Di Nusa Tenggara Timur, misalnya, banyak bidan yang

masih harus menggunakan ponsel pribadi dan kuota sendiri untuk mengirimkan data pasien karena puskesmas tidak menyediakan perangkat yang memadai.

Di tingkat makro, (OECD.AI, 2026) mengidentifikasi bahwa Indonesia masih menghadapi kesenjangan signifikan dalam *supply and distribution of AI talent*, termasuk kesenjangan kesiapan etika, kapasitas infrastruktur, ketersediaan data, pendanaan penelitian, serta risiko seperti bias algoritma, pelanggaran privasi, dan penyalahgunaan AI. Distribusi talenta digital kesehatan sangat timpang antara Jawa dan luar Jawa, antara perkotaan dan pedesaan. Artinya, daerah yang paling membutuhkan inovasi justru paling kekurangan tenaga terlatih.

Ada persoalan struktural lain yang jarang disorot, yaitu pekerjaan digital entri data, penggunaan sistem rujukan elektronik, dan dokumentasi klinis sering kali tidak diakui sebagai bagian dari beban kerja resmi. Tenaga kesehatan mengalami beban digital yang tidak proporsional, bekerja di luar jam kerja tanpa kompensasi layak. Kondisi ini kontraproduktif dengan tujuan efisiensi yang hendak dicapai oleh transformasi digital

9.3.2 Infrastruktur Teknologi

Infrastruktur teknologi merupakan fondasi implementasi AI. (Astari *et al.*, 2025) yang menilai kepatuhan implementasi rekam medis elektronik menggunakan SATUSEHAT di Indonesia mengungkap disparitas yang mengkhawatirkan. Pada Oktober 2024, hanya 58 persen dari 33.901 fasilitas kesehatan yang memenuhi target 50 persen pengiriman data. Angka ini semakin menurun drastis ketika target dinaikkan menjadi 100 persen pada Desember 2024. Banyak fasilitas jelas belum siap secara teknis.

Rendahnya kepatuhan ini mencerminkan problematika yang lebih dalam. (Eli Sumarlia, Kawther Mousa, 2026)

penelitian yang diterbitkan di *Frontiers in Digital Health* menggunakan *multi-group structural equation modelling* pada 1.204 responden di Indonesia. Hasilnya menunjukkan bahwa pemanfaatan *mobile health* (mHealth) secara signifikan dipengaruhi oleh status sosial ekonomi, dan terdapat perbedaan struktural antara kelompok urban dan rural. Studi ini menegaskan bahwa manfaat teknologi kesehatan digital lebih banyak dinikmati oleh masyarakat urban dengan status sosial ekonomi tinggi, berpotensi memperlebar kesenjangan kesehatan yang sudah ada.

Penelitian (FITRI, 2025) tentang interoperabilitas SIMRS di Rumah Sakit Universitas Andalas menambahkan dimensi lain. Meskipun integrasi telah menggunakan standar HL7-FHIR, kegiatan pemeliharaan sistem belum terdokumentasi secara formal. Belum tersedia SOP pemeliharaan, log sistem yang terdokumentasi, maupun mekanisme audit kepatuhan yang terjadwal. Akibatnya, ketika sistem bermasalah, tidak ada prosedur baku untuk mengatasinya.

Pemerintah merespons melalui pengembangan *SNI Smart Hospital* dan program akselerasi infrastruktur digital di daerah 3T (tertinggal, terdepan, terluar). Namun skala tantangan jauh melampaui kapasitas respons saat ini. Investasi infrastruktur kesehatan digital membutuhkan komitmen jangka panjang dan alokasi anggaran yang signifikan, dua hal yang sering kali sulit diwujudkan di tengah keterbatasan fiskal daerah.

9.3.3 Hambatan Regulasi dan Etika

Ketiadaan regulasi spesifik AI menciptakan ketidakpastian hukum yang menghambat adopsi. Indonesia saat ini belum memiliki undang-undang atau peraturan pemerintah yang secara komprehensif mengatur kecerdasan buatan di sektor kesehatan. Pemerintah mengandalkan regulasi yang sudah ada, UU ITE, UU PDP, serta peraturan sektoral yang tidak dirancang untuk mengakomodasi karakteristik unik AI.

OECD.AI. (2026) mencatat bahwa Indonesia memasuki masa transisi regulasi pada awal 2026, di mana Menteri Komunikasi dan Digital menyatakan bahwa regulasi AI telah menjadi prioritas presiden dengan persiapan peraturan presiden tentang peta jalan AI nasional serta pedoman keselamatan dan etika. Tiga pilar regulasi sedang dikonvergensi: Perpres yang akan datang, STRANAS KA 2020–2045 yang telah memberikan fondasi normatif untuk membingkai AI di sekitar etika, pengambilan keputusan yang berpusat pada manusia, transparansi, nondiskriminasi, dan keselarasan dengan nilai-nilai Pancasila, serta UU PDP yang memberikan kepatuhan dengan penegakan penuh diharapkan pada akhir 2026 (Global, 2026).

Bias Algoritma: Isu Etis yang Terabaikan

Salah satu tantangan etis terbesar adalah risiko bias algoritmik. (Cui, 2025) menjelaskan bahwa bias representasi data dan *distribution shifts* adalah mekanisme kunci melalui mana determinan kesehatan mempengaruhi generalisasi model AI, yang pada gilirannya mempengaruhi hasil kesehatan dan ekuitas. Studi ini menegaskan bahwa jalur digital memperluas koneksi konvensional antara faktor sosial dan biologis terhadap hasil kesehatan, secara signifikan mempengaruhi ekuitas kesehatan.

Untuk konteks Indonesia, implikasi bias algoritma sangat serius. Sebagian besar model AI dilatih menggunakan data dari populasi Barat. Karakteristik demografis, epidemiologis, dan genetik populasi ini berbeda dengan Indonesia. Contoh konkretnya, algoritma deteksi penyakit kulit yang dilatih dengan data populasi Kaukasia akan kurang akurat ketika diterapkan pada pasien dengan warna kulit lebih gelap, yang merupakan mayoritas populasi Indonesia. Jika model tersebut diadopsi tanpa adaptasi, risiko misdiagnosis menjadi nyata. Kelompok yang paling terdampak adalah masyarakat dengan akses terbatas ke layanan kesehatan konvensional.

Di tingkat global, WHO telah membentuk *Technical Advisory Group on Artificial Intelligence for Health* (TAG-AI) untuk memandu penggunaan AI yang etis, bertanggung jawab, dan adil di bidang kesehatan. Fungsi inti TAG-AI mencakup: memberikan saran ahli tentang integrasi prinsip etika, tata kelola, regulasi, dan pengawasan ke dalam strategi AI; mendukung pengembangan kapasitas, penelitian, dan rekomendasi kebijakan; serta memastikan keamanan, efektivitas, kesetaraan, hak asasi manusia, transparansi, dan akuntabilitas (WHO, 2025).

Selain itu, WHO juga tengah membangun *Consortium of Collaborating Centres on AI for Health*, sebuah jaringan institusi terkemuka di seluruh enam region WHO, untuk mendukung negara-negara anggota dalam adopsi AI yang bertanggung jawab. Dalam lokakarya yang diadakan pada Januari 2026, para ahli menekankan tiga rekomendasi utama: pertama, penggunaan generative AI harus diakui sebagai masalah kesehatan masyarakat; kedua, kesehatan mental harus diintegrasikan ke dalam penilaian dampak dan pemantauan solusi AI; ketiga, alat AI untuk dukungan kesehatan harus dirancang bersama dengan ahli kesehatan mental dan individu dengan pengalaman langsung (WHO, 2026).

Indonesia merespons melalui penyusunan Buku Putih Peta Jalan AI dan Pedoman Etika Kecerdasan Artifisial (Surat Edaran No. 9 Tahun 2023) yang menekankan prinsip transparansi, akuntabilitas, keamanan data, inklusivitas, dan humanitas. Namun pedoman ini bersifat sukarela, tidak memiliki kekuatan mengikat secara hukum.

Beberapa pertanyaan kritis belum terjawab oleh regulasi yang ada. Bagaimana akuntabilitas jika diagnosis berbasis AI menyebabkan kesalahan medis? Siapa yang bertanggung jawab, dokter, rumah sakit, atau pengembang sistem? Bagaimana standar keamanan dan privasi data pasien yang diproses oleh

sistem AI? Ketiadaan jawaban menciptakan *liability vacuum* yang menghambat adopsi.

9.3.4 Kesenjangan Digital Layanan Kesehatan

Kesenjangan digital merupakan tantangan paling krusial dalam perspektif keadilan sosial. (Wasir *et al.*, 2025) yang menganalisis 20 studi digital health di Indonesia mengidentifikasi bahwa hambatan persisten di wilayah rural dan remote, yaitu keterbatasan akses internet, infrastruktur tidak memadai, dan rendahnya literasi digital, terus menghambat adopsi.

Penelitian (Eli Sumarlia, Kawther Mousa, 2026) memberikan bukti empiris yang kuat dengan menggunakan multi-group SEM pada 1.204 responden di Indonesia, studi ini menemukan bahwa:

1. Status sosial ekonomi secara signifikan terkait dengan pemanfaatan mHealth dan aktivitas fisik berkelanjutan
2. Pemanfaatan mHealth secara signifikan terkait dengan aktivitas fisik berkelanjutan untuk kontrol obesitas, dan
3. Terdapat perbedaan struktural antara kelompok urban dan rural dalam hal kekuatan asosiasi.

Temuan ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan mHealth mungkin lebih lazim di kota-kota Indonesia dengan status sosial ekonomi tinggi, berpotensi memperlebar kesenjangan kesehatan. Disparitas akses ini memiliki tiga dimensi yang saling terkait:

1. Dimensi geografis
Masyarakat di wilayah 3T tidak memiliki akses internet yang andal. Layanan telemedicine dan konsultasi daring tidak dapat diakses. Seorang ibu hamil di pegunungan Papua tidak bisa melakukan konsultasi prenatal jarak jauh meskipun teknologi sudah tersedia di Jakarta. Di Kabupaten Mahakam Ulu, Kalimantan Timur, fasilitas kesehatan harus

menggunakan jaringan satelit dengan biaya tinggi dan kecepatan rendah.

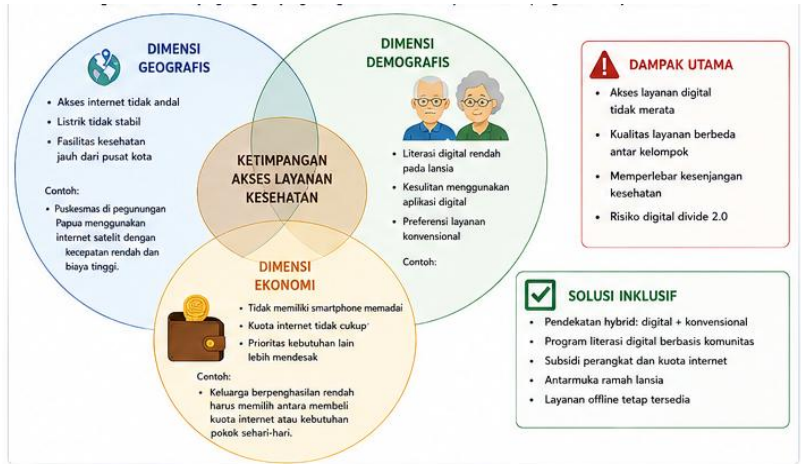
2. Dimensi demografis

Kelompok lansia yang secara umum memiliki literasi digital lebih rendah menghadapi hambatan dalam memanfaatkan layanan yang semakin digital. Aplikasi Mobile JKN yang memudahkan masyarakat perkotaan justru menjadi sumber frustrasi bagi lansia di pedesaan yang tidak terbiasa menggunakan *smartphone*.

3. Dimensi ekonomi

Masyarakat berpenghasilan rendah mungkin tidak memiliki perangkat *smartphone* memadai atau kuota internet yang cukup. Transformasi digital yang tidak disertai subsidi berisiko menciptakan sistem dua kelas: layanan digital cepat untuk yang mampu, dan antrean panjang konvensional untuk yang tidak mampu.

Temuan (Astari *et al.*, 2025) tentang disparitas kepatuhan pengiriman data SATUSEHAT mengonfirmasi bahwa kesenjangan ini juga terjadi di sisi penyedia layanan. Fasilitas kesehatan di perkotaan memiliki tingkat kepatuhan lebih tinggi dibandingkan di daerah terpencil. Artinya, ketimpangan terjadi dua arah, baik dari sisi pasien maupun dari sisi sistem.



Gambar 9. Dimensi Kesenjangan Digital dalam Layanan Kesehatan
Sumber: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2020

Kesenjangan digital menciptakan paradoks yang ironis. Alih-alih memperluas akses, digitalisasi yang tidak merata justru dapat memperdalam ketimpangan layanan kesehatan yang sebelumnya sudah terjadi. Tanpa intervensi kebijakan yang tepat, adopsi AI kesehatan dapat menciptakan *digital divide 2.0*, jurang pemisah baru antara mereka yang memiliki akses ke layanan kesehatan canggih berbasis AI dan mereka yang tetap bergantung pada layanan konvensional yang terbatas.

9.4 Peluang dan Strategi Solusi

Mengatasi tantangan implementasi AI memerlukan strategi yang sistematis dan kontekstual. Berikut adalah strategi solusi untuk masing-masing tantangan yang telah diidentifikasi, dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Tantangan, Dampak, dan Strategi Solusi

Tantangan	Dampak Utama	Strategi Solusi
Kesiapan SDM Kesehatan	Rendahnya adopsi AI, kesalahan input data, beban kerja tidak terkompensasi	Pelatihan digital berkelanjutan dengan sertifikasi; pengakuan pekerjaan digital sebagai beban kerja resmi; integrasi kompetensi digital dalam kurikulum profesi kesehatan
Infrastruktur Teknologi	Data tidak lengkap/terlambat, ketidakandalan sistem, disparitas antar fasilitas	Perluasan jaringan internet di 3T; standarisasi interoperabilitas (HL7-FHIR); implementasi bertahap SNI Smart Hospital; mekanisme audit dan pemeliharaan sistem
Regulasi dan Etika	Ketidakpastian hukum, risiko bias algoritma, liability vacuum	Regulatory sandbox; persyaratan transparansi data pelatihan; audit algoritmik berkala; pengesahan Perpres Strategi Nasional AI; pembentukan

Tantangan	Dampak Utama	Strategi Solusi
		dewan etika nasional
Kesenjangan Digital	Ketimpangan akses geografis, demografis, dan ekonomi	Pendekatan "digital by default, not digital only"; layanan offline sebagai alternatif; subsidi perangkat dan kuota; program literasi digital berbasis komunitas; antarmuka ramah lansia

Masing-masing strategi ini perlu diimplementasikan secara terukur. Untuk penguatan kapasitas SDM, pelatihan tidak bisa bersifat insidental. Program pelatihan berkelanjutan yang terstruktur perlu disertai mekanisme sertifikasi kompetensi digital. Laporan OECD (2026) mendorong pengembangan program pendidikan AI lintas disiplin yang melibatkan fakultas kedokteran, teknik, dan ilmu data.

Untuk infrastruktur, SNI Smart Hospital perlu diimplementasikan secara bertahap namun terukur. Prioritas diberikan pada fasilitas kesehatan di daerah dengan kesiapan terendah. Penguatan interoperabilitas melalui standardisasi format data dan peningkatan kapasitas jaringan di wilayah 3T menjadi keharusan.

Untuk regulasi, *lingkungan sandbox* regulatori terkontrol untuk menguji teknologi AI sebelum mendapatkan izin penuh perlu dipertimbangkan. Pendekatan ini memungkinkan

pemerintah memahami risiko dan manfaat teknologi baru sebelum merumuskan regulasi permanen. Untuk mengatasi bias algoritma, diperlukan persyaratan transparansi data pelatihan, uji coba pada populasi lokal, dan mekanisme audit algoritmik berkala.

Untuk kesenjangan digital, pendekatan "digital by default, but not digital only" perlu diadopsi. Layanan digital menjadi opsi utama, tetapi bukan satu-satunya opsi. Layanan offline harus tetap tersedia bagi masyarakat yang tidak memiliki akses atau literasi digital. Program literasi digital berbasis komunitas, subsidi perangkat dan kuota internet, serta pengembangan antarmuka yang ramah lansia merupakan langkah-langkah konkret yang dapat segera diambil.

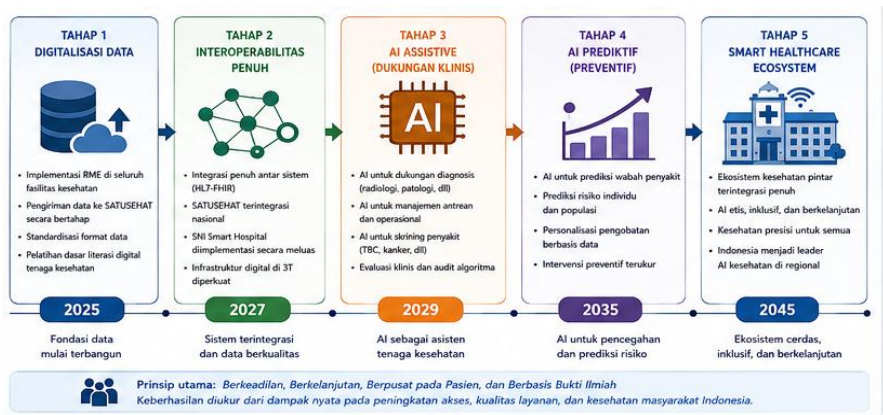
9.5 Arah Masa Depan AI Kesehatan di Indonesia

Proyeksi masa depan AI kesehatan Indonesia tidak dapat dilepaskan dari arah kebijakan nasional. *National Artificial Intelligence Roadmap 2025–2029* menetapkan program *quick win* di sektor kesehatan, termasuk AI untuk skrining TBC, AI untuk cek kesehatan gratis, dan AI untuk pemetaan wilayah rawan stunting (OECD.AI, 2026). Beberapa inisiatif telah mulai berjalan: di Jawa Timur, misalnya, AI digunakan untuk skrining awal pasien TBC berbasis foto rontgen; di Lombok, program SMART menggunakan perangkat *wearable* untuk memantau risiko kehamilan.

Implementasi program-program ini akan dilakukan secara bertahap dengan mekanisme monitoring dan evaluasi yang terukur melalui *National AI Coordination Task Force* yang bertanggung jawab mengevaluasi kemajuan implementasi secara periodik (OECD.AI, 2026).

Dari sisi tata kelola, pengesahan Perpres tentang Strategi Nasional AI (ditargetkan pada 2026) akan menjadi tonggak

sejarah. Dokumen ini diharapkan memberikan kepastian hukum bagi pengembangan dan pemanfaatan AI di seluruh sektor, termasuk kesehatan. Tiga pilar regulasi yang sedang dikonvergensi, Perpres, STRANAS KA, dan UU PDP, diharapkan menciptakan kerangka tata kelola yang komprehensif (Global, 2026).



Gambar 10. Roadmap Implementasi AI Kesehatan Indonesia 2025–2045
Sumber: Hassan & Sazonov, 2020

WHO, melalui pembentukan TAG-AI dan konsorsium pusat kolaborasi, terus mendukung negara-negara anggota dalam adopsi AI yang bertanggung jawab. Seperti dinyatakan Dr. Alain Labrique, Direktur Departemen Data, Digital Health, Analytics and AI WHO, ketika AI semakin berinteraksi dengan orang-orang dalam momen kerentanan emosional, kita harus memastikan sistem ini dirancang dan dikelola dengan keselamatan, akuntabilitas, dan kesejahteraan manusia sebagai inti (WHO, 2026).

Keberhasilan jangka panjang tidak hanya ditentukan oleh dokumen kebijakan. Komitmen implementasi di tingkat lapangan sama pentingnya. Sekolah-sekolah dan program pelatihan vokasi perlu menyiapkan generasi baru tenaga kesehatan yang melek

digital. Sistem kesehatan perlu dibangun di atas prinsip keadilan bahwa teknologi harus melayani semua warga negara, tanpa kecuali.

DAFTAR PUSTAKA

- Astari, L. A., Amalia, I., Indra, L., Sanjaya, G. Y., & Fuad, A. (2025). Assessing the Fidelity of Electronic Health Record Implementation Using SatuSehat Platform in Indonesia. *Studies in Health Technology and Informatics*, 329. <https://doi.org/10.3233/SHTI251128>
- Azhar, M. (2025). *Indonesia unveils national AI roadmap*. Gov Insider.
- Cui, Y. (2025). Digital pathways connecting social and biological factors to health outcomes and equity. In *npj Digital Medicine* (Vol. 8, Issue 1). <https://doi.org/10.1038/s41746-025-01564-8>
- Edi Susilo, T. S. K. (2026). Gubernur Khofifah Dorong Rumah Sakit di Jatim Adaptif AI. *Harian Disway*.
- Eli Sumarlia, Kawther Mousa, Y. I. (2026). Beyond the digital divide: Multi-group SEM examination of socioeconomic status, mHealth utilization, and urban-rural physical activity disparities in Indonesia. *Frontiers in Digital Health*.
- FITRI, D. Y. (2025). *Analisis Interoperabilitas Sistem Informasi Manajemen Rumah Sakit (SIMRS) dengan SATUSEHAT di Rumah Sakit Universitas Andalas* [UNIVERSITAS ANDALAS]. <http://scholar.unand.ac.id/505577/10/Cover> dan Abstrak_Dina Yulia Fitri.pdf#
- Global, R. (2026). *Governing Agentic AI in Indonesia: Bridging Global Standards with Local Law and Culture*. RSM Global.

- Karami, M., & Madloul, H. (2025). Artificial intelligence and digital health in the health systems of developing countries: the challenges and vision of integration in the primary health care setting. In *Frontiers in Digital Health* (Vol. 7). <https://doi.org/10.3389/fdgth.2025.1532361>
- Kemenkes, R. (2025). *SATUSEHAT Platform - Rujukan Pasien (Playbook Teknis)*. Kementerian Kesehatan RI. <https://satusehat.kemkes.go.id/platform/docs/id/interoperability/rujukan/>
- OECD.AI. (2026). *White paper on the National Artificial Intelligence Roadmap - Indonesia*. OECD.AI Policy Observatory.
- Wasir, R., Rahma, F. A., Ariyanto, J., Syamsir, S. B., Suparni, S., Raharjo, A., Jannah, F., & Basrowi, R. W. (2025). Strengthening Health System Resilience through Digital Health: Challenges and Prospects in Indonesia's Rural and Remote Regions - A Scoping Review Protocol. *The Open Public Health Journal*, 18(1). <https://doi.org/10.2174/0118749445393540250506115107>
- WHO. (2025). *WHO/Europe launches Technical Advisory Group on Artificial Intelligence for Health*. World Health Organization. <https://www.who.int/lithuania/news/item/29-09-2025-who-europe-launches-technical-advisory-group-on-artificial-intelligence-for-health>
- WHO. (2026). *Towards responsible AI for mental health and well-being: experts chart a way forward*. World Health Organization. <https://www.who.int/news/item/20-03-2026-towards-responsible-ai-for-mental-health-and-well-being--experts-chart-a-way-forward>

BAB 10

ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM GIZI DAN NUTRISI KLINIS SERTA KESEHATAN MASYARAKAT

10.1 Pemantauan Skala Mikro (Micro-Monitoring)

Kebijakan gizi konvensional umumnya bersandar pada pedoman berbasis populasi (seperti Angka Kecukupan Gizi) untuk mencegah defisiensi massal. Namun, strategi *one-size-fits-all* ini tidak efektif menghadapi epidemi Penyakit Tidak Menular (PTM) karena adanya variabilitas biologis individu; dua orang dengan asupan sama dapat menunjukkan respons metabolik dan glikemik yang sepenuhnya berbeda.

Keterbatasan metode tradisional mendorong lahirnya Precision Nutrition (Nutrisi Presisi). Pendekatan ini merancang rekomendasi diet spesifik dengan mengintegrasikan profil genetik (genomik), mikrobioma usus, metabolom, aktivitas fisik, gaya hidup, hingga paparan lingkungan individu menggunakan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dan *Machine Learning* (ML). Secara klinis, pendekatan ini terbukti lebih efektif memperbaiki kontrol glikemik, manajemen berat badan, dan kepatuhan diet dibandingkan konseling konvensional (Nourazarain & Vaziri, 2025).

Tinjauan sistematis menunjukkan bahwa perangkat berbasis AI (baik berbasis citra maupun sensor) mampu mencapai tingkat kesalahan (*error rate*) estimasi zat gizi dan energi di kisaran 10% hingga 38%. Angka ini setara dengan, atau

lebih baik daripada, metode tradisional seperti *24-hour recall* dan pencatatan penimbangan makanan (*weighed records*) manual. Keandalan instrumen AI ini diperkuat oleh nilai korelasi yang tinggi ($>0,77$) dengan metode standar emas (*gold standard*) dalam mengestimasi total kalori, zat gizi makro, serta mikronutrien esensial.

Tabel 3. Perbandingan Metode Penilaian Gizi: Metode Tradisional vs Berbasis AI

Aspek	Metode Tradisional (FFQ, recall, food diary)	Metode Berbasis AI (ML, Computer Vision, Sensor)
Cara Input	Mengandalkan ingatan/subjektif pasien dan pengisian kuesioner manual.	Foto/video makanan, rekaman suara/jaw motion, ekstraksi teks otomatis, dan perangkat <i>wearable</i> .
Bias & Error	Bias recall yang tinggi, kecenderungan <i>under/over-report</i> , serta kesalahan estimasi takaran porsi secara visual.	Tingkat kesalahan (<i>error</i>) energi hanya 10–15%, korelasi $>0,77$ terhadap metode standar emas, serta reduksi signifikan pada bias <i>recall</i> .
Beban Tenaga & Waktu	Sangat padat karya dan membutuhkan tenaga ahli/dietisien untuk melakukan <i>coding</i> data pangan.	Berjalan secara otomatis, sangat <i>scalable</i> , serta menghemat waktu klinisi dan dietisien di fasilitas kesehatan.
Dinamika & Real-Time	Bersifat statis dan sulit untuk menangkap variasi asupan harian maupun perubahan musiman.	Pemantauan berlangsung secara real-time, dinamis, serta adaptif terhadap perubahan diet dan kondisi klinis pasien.
Ruang Lingkup Data	Terbatas pada data diet primer dan terkadang data aktivitas fisik makro.	Mampu mengintegrasikan data diet dengan <i>Continuous Glucose Monitoring</i> (CGM), <i>Electronic Health Records</i> (EHR), multi-omics, mikrobioma, hingga pola gaya hidup mikro.

(Mundt *et al.*, 2025; Phalle & Gokhale, 2025; Quan *et al.*, 2025)

Beberapa instrumen AI yang telah divalidasi meliputi:

- a. *FRANI Mobile App*: Food Recognition Assistance and Nudging Insights (FRANI) diujikan pada remaja putri di Vietnam dan Ghana, aplikasi ini menggunakan AI untuk mengidentifikasi jenis makanan dari foto yang diambil pengguna, kemudian memberikan statistik nutrisi yang detail. Aplikasi dirancang untuk memantau konsumsi kelompok makanan dan membantu mencapai tujuan diet tertentu dengan memberikan "lencana" atau penghargaan sebagai motivasi bagi pengguna untuk mempertahankan kebiasaan makan yang sehat. (Braga *et al.*, 2024; Nguyen *et al.*, 2022)
- b. *Keenoa AI Image-Assisted Diary*: Pada populasi dewasa, aplikasi berbasis citra ini menunjukkan hasil estimasi energi, makronutrien, dan mikronutrien yang serupa dengan sistem berbasis web *ASA24*, tanpa bias sistemik.(Moyen *et al.*, 2022)
- c. *EgoDiet Wearable Camera*: Digunakan dalam studi di Ghana, pengguna mengenakan Automatic Ingestion Monitor (AIM) sejenis kamera yang terpasang di dada atau dijepit pada kacamata yang akan merekam gambar makanan mereka dari sudut pandang orang, setinggi mata. Model AI akan menganalisis gambar setelah makan, memperkirakan ukuran porsi, rincian makronutrien, dan asupan kalori keseluruhan. Kamera ini menghasilkan tingkat kesalahan yang lebih rendah dalam mengestimasi ukuran porsi (*portion size*) dibandingkan metode *recall* konvensional maupun taksiran visual dietisien.(Lo *et al.*, 2024)



Gambar 11. UI/X Aplikasi dan AI Wearable devices untuk analisis gizi (A) FRANI App <https://cdn.nutrition.org/>, (B) Keenoa AI Diary <https://keenoa.com/>, (C) Kacamata AIM
Sumber: methreesixty.com

Lompatan terbesarnya adalah pemanfaatan AI untuk membangun *Nutrition Digital Twin*— replika digital dari objek fisik, orang, sistem, atau proses yang terhubung dengan lingkungannya dalam versi digital. Melalui model ini, intervensi gizi untuk obesitas atau diabetes dapat disimulasikan terlebih dahulu dan diperbarui terus-menerus secara proaktif.

Paradoks terbesar dalam riset AI nutrisi saat ini adalah keterwakilan yang minim dari wilayah *Low- and Middle-Income Countries* (LMICs), padahal wilayah ini memikul Double Burden of Malnutrition (Beban Ganda Malnutrisi)—di mana stunting dan defisiensi zat gizi berdampingan dengan tren obesitas serta penyakit kardiometabolik. AI memiliki potensi masif untuk melakukan stratifikasi risiko populasi dan deteksi dini malnutrisi, namun penerapannya di LMICs membentur hambatan sistemik (Windus *et al.*, 2025):

- a. Keterbatasan Akses Teknis: Kesenjangan kepemilikan *smartphone*, ketidakstabilan konektivitas di area rural, serta kerentanan privasi data dapat memperlebar jurang ketidaksetaraan kesehatan (*health disparity*) jika alat ini hanya menysar masyarakat urban berpenghasilan tinggi.
- b. Kompleksitas Kuliner Lokal: Akurasi algoritma *computer vision* menurun saat dihadapkan pada hidangan campuran yang kompleks (*complex mixed dishes*) atau menu tradisional yang bervariasi. Basis data pelatih AI yang masih didominasi ragam pangan barat memerlukan adaptasi budaya dan kulturalisasi data pangan lokal yang masif.

- c. Kurangnya Bukti Makro: Riset AI masih terbatas pada tahap prediksi risiko atau uji kelayakan jangka pendek, dan belum ada bukti empiris kuat yang menunjukkan keberhasilan teknologi ini dalam menurunkan prevalensi stunting atau obesitas di tingkat populasi.

Menyikapi keterbatasan tersebut, AI harus diposisikan sebagai Sistem Pendukung Keputusan (*Decision Support System*), bukan penentu mutlak keputusan klinis. Rekomendasi otomatis wajib melewati supervisi dan validasi akhir oleh tenaga gizi atau klinisi sebelum diterapkan. Pengawasan dari ahli gizi dan dokter tetap nomor satu. Merekalah yang mendeteksi jika ada kesalahan sistem, mencegah menu yang berbahaya bagi pasien komplikasi, dan memastikan kandungan gizinya sudah pas. Lewat kerja sama antara teknologi dan para ahli ini, AI bisa menjadi alat yang aman untuk menangani masalah gizi buruk hingga kegemukan di seluruh dunia.

10.2 AI dalam Penilaian Gizi

Penilaian status gizi (*nutritional assessment*) kini tengah mengalami pergeseran fundamental, dari metode pencatatan manual-subjektif menuju ekosistem otomatis berbasis data objektif. Transformasi ini ditopang oleh tiga pilar teknologi utama: *computer vision* untuk analisis asupan secara visual, pemindaian 3D/smartphone untuk antropometri digital, dan *Natural Language Processing* (NLP) untuk mengekstrak data gizi tersembunyi dari rekam medis elektronik.

10.2.1 *Computer Vision* untuk Analisis Asupan Makanan

Pendekatan berbasis *computer vision* mengotomatisasi penilaian konsumsi pangan melalui alur kerja digital yang presisi: foto makanan diekstraksi melalui tahap segmentasi

objek, dilanjutkan dengan klasifikasi jenis hidangan, estimasi volume atau berat, hingga konversi otomatis ke basis data zat gizi untuk menghitung total energi, makronutrien, dan mikronutrien.

Algoritma *deep learning* modern mampu mencapai akurasi deteksi makanan berkisar antara 74% hingga 99,9%, dengan tingkat kesalahan (*error rate*) estimasi energi dan zat gizi yang konsisten rendah di angka 10% hingga 15%. Di ranah klinis, teknologi ini telah diaplikasikan secara spesifik, seperti pada sistem *GoCARB* untuk menghitung karbohidrat secara presisi pada pasien diabetes tipe 1 (tingkat kesalahan $\pm 10\%$), serta penggunaan pencitraan kedalaman gambar (*RGB-D images*) untuk memantau sisa makanan pasien rawat inap guna mencegah malnutrisi rumah sakit. (Shonkoff *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2023)

Aplikasi seluler seperti *FRANI* dan *Keeno* terbukti memberikan validitas pengukuran asupan zat gizi yang setara dengan metode standar (*weighed food record*) maupun *24-hour recall* multiposisi.

10.2.2 Otomasi Antropometri dengan Smartphone

Penilaian komposisi tubuh saat ini mulai beralih dari metode antropometri manual yang rentan terhadap kesalahan operator serta alat laboratorium mahal seperti DXA, menuju teknologi pemindaian 3D berbasis *smartphone*. Melalui rekonstruksi avatar digital, teknologi ini mampu memprediksi persentase lemak tubuh secara akurat dengan tingkat kesalahan rata-rata hanya 2% hingga 3,5% dibandingkan dengan DXA. Presisi ukuran lingkar tubuh—seperti pinggang, panggul, lengan, dan paha—melalui aplikasi seperti *MeThreeSixty* juga terbukti sangat kuat dengan nilai R mencapai 0,72 hingga 0,95 jika disandingkan dengan pita ukur manual ataupun perangkat



Gambar 12. Aplikasi MeThreeSixty

Sumber: penulis (2026) dibuat menggunakan canva dan adobe illustrator

pemindai 3D profesional.(Tinsley, Rodriguez, Florez, *et al.*, 2024; Tinsley, Rodriguez, Siedler, *et al.*, 2024)

Selain parameter fisik luar, teknologi pencitraan 3D gawai ini mampu menganalisis status cairan tubuh (termasuk *total body water*, cairan ekstraseluler/ECF, cairan intraseluler/ICF, hingga kondisi kelebihan cairan/*fluid overload*) menggunakan model regresi yang menawarkan reliabilitas tinggi dengan nilai *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC) > 0,9 dan tingkat kesalahan yang konsisten rendah di kisaran 2,5 hingga 5,2 untuk seluruh parameter utama komposisi tubuh pasien.(Graybeal *et al.*, 2025)

10.2.3 *Natural Language Processing* untuk Integrasi Data Gizi

Tantangan utama pemanfaatan data klinis di rumah sakit terletak pada banyaknya informasi krusial rekam medis elektronik (EMR/EHR) yang tersimpan dalam format teks bebas tidak terstruktur, seperti catatan perkembangan klinis dokter atau asesmen awal dietisien. Karakteristik data yang bersifat naratif ini membuat sistem komputer konvensional tidak mampu membaca, menyaring, dan menganalisis informasi secara otomatis untuk mendeteksi kebutuhan gizi pasien.

Sebagai solusinya, teknologi NLP (*Natural Language Processing*) berbasis *deep learning* hadir untuk mengekstrak dan mengonversi teks bebas tersebut menjadi data terstruktur yang siap pakai secara instan. AI mampu memindai ribuan rekam medis sekaligus untuk menarik data riwayat penurunan berat badan, intoleransi makanan, hingga malnutrisi laten, yang kemudian diintegrasikan ke dalam model klasifikasi risiko untuk

membantu klinisi menetapkan intervensi gizi agresif sejak hari pertama pasien rawat inap.(Hossain *et al.*, 2023)

Kombinasi *computer vision*, automasi antropometri 3D, dan NLP berhasil mentransformasi penilaian gizi menjadi proses yang otomatis, objektif, dan kaya data (*rich data*). Tantangan implementasi saat ini beralih pada upaya memastikan konsistensi akurasi algoritma di berbagai variasi menu lokal, memitigasi bias data pelatih, serta mengintegrasikan ketiga sumber data objektif ini ke dalam alur kerja (*clinical workflow*) rumah sakit secara aman, patuh hukum, dan beretika.

10.3 Peran Machine Learning dalam Prediksi Risiko Gizi dan Penyakit Metabolik

Model berbasis *Machine Learning* (ML) atau sistem pembelajaran komputer kini dimanfaatkan sebagai Sistem Peringatan Dini (*Early Warning System*) untuk mendeteksi risiko gizi buruk (malnutrisi), kegemukan (obesitas), dan gangguan metabolisme tubuh sejak awal. Teknologi ini bekerja layaknya "radar" yang mengabungkan data kesehatan, hasil laboratorium, dan kebiasaan hidup pasien untuk menghasilkan ramalan risiko sebelum penyakitnya berkembang menjadi parah.

10.3.1 *Early Warning System* Malnutrisi di Rumah Sakit

Deteksi malnutrisi konvensional pada pasien rawat inap sering kali terlambat karena prosedur pemeriksaan manual yang memakan waktu. AI mentransformasi proses ini melalui otomatisasi penapisan risiko:

- **Prediksi kritis di Ruang ICU:** Menggunakan model kecerdasan buatan bernama *XGBoost*, sistem mampu membaca kondisi pasien kritis di ruang ICU dan memprediksi risiko gizi buruk dalam 24 jam pertama dengan nilai akurasi diagnosis (AUC-ROC) mencapai 0,88 hingga 0,98(Liu *et al.*, 2025).

- Skrining Otomatis Rekam Medis : Integrasi *gradient-boosted trees* dan *Large Language Models* (LLM) mampu memindai teks bebas pada rekam medis untuk menyaring risiko gizi buruk dengan akurasi 0,92–0,95. Metode ini terbukti jauh lebih cepat dan akurat dibandingkan instrumen manual seperti *Malnutrition Screening Tool* (MST) (Bernstein *et al.*, 2025).

10.3.2 Pemodelan Prediktif Obesitas Multifaktorial

Obesitas tidak hanya dipicu oleh faktor asupan, melainkan kombinasi kompleks dari faktor *non-dietary*. Dengan memanfaatkan algoritma *Artificial Neural Network-Particle Swarm Optimization* (ANN-PSO) dan *Random Forest*, AI mampu mengintegrasikan variabel riwayat genetik, durasi tidur, indikator sosio-ekonomi, dan aktivitas fisik untuk mengelompokkan risiko obesitas individu secara visual dengan tingkat ketepatan 92% hingga 97% sebelum berkembang menjadi obesitas klinis (Dutta *et al.*, 2024; Ferdowsy *et al.*, 2021; Helforoush & Sayyad, 2024).

Aplikasi dengan tingkat akurasi seperti itu dapat memberikan gambaran visual kepada masyarakat mengenai faktor apa yang paling berbahaya dalam hidup mereka (misalnya kurang tidur atau kurang bergerak) sebelum tubuh mereka benar-benar mengalami obesitas klinis.

10.3.3 Skoring Risiko dan Deteksi Dini Sindrom Metabolik

Sindrom metabolik (seperti kombinasi gula darah tinggi, kolesterol tinggi, dan obesitas) dapat dideteksi lebih awal melalui kartu skor digital berbasis AI tanpa harus menunggu gejala penyakitnya muncul. Beberapa contoh aplikasinya yaitu

- Model *Logistic Regression* yang menguji data kesehatan 179.620 personel militer menghasilkan akurasi 0,89, serta mengidentifikasi Indeks Massa Tubuh (BMI), usia, fungsi hati (ALT), kolesterol, dan asam urat sebagai prediktor utama (W.-Y. Wang *et al.*, 2025).

- Kartu Skor Praktis untuk Fasilitas Pelayanan Kesehatan Primer melalui pendekatan pintar *super learner ensemble* yang berhasil menciptakan kartu skor sederhana berbasis 10 tanda kesehatan. Kartu skor digital ini membagi risiko pasien ke dalam 5 tingkatan praktis untuk memudahkan petugas kesehatan mengambil tindakan pencegahan. (Li *et al.*, 2025)
- Skrining Non-Invasif Remaja melalui model AI daring yang dirancang khusus untuk deteksi massal pada remaja hanya menggunakan parameter lingkaran pinggang dan tekanan darah tanpa sampel darah, dengan tingkat akurasi mencapai 0,971 (Shin *et al.*, 2023)

10.3.4 Prediksi Malnutrisi Populasi

Pada skala makro, model ML mengombinasikan data antropometri anak berfrekuensi tinggi dengan fitur penginderaan jauh satelit (*remote sensing*). Sistem ini mampu memprediksi tren malnutrisi akut dan risiko krisis pangan di wilayah sentinel secara *real-time*, sehingga membantu lembaga kemanusiaan mengalokasikan bantuan logistik gizi secara tepat sasaran sebelum bencana kelaparan terjadi (Constenla-Villoslada *et al.*, 2025).

10.4 AI dalam Perencanaan Diet Klinis Otomatis: Bukti, Potensi, dan Tantangan

Perencanaan diet klinis otomatis berbasis AI (*Decision Support System/DSS*) kini menjadi pilar penting dalam manajemen penyakit kronis seperti diabetes melitus, hipertensi, penyakit kardiovaskular, dan penyakit ginjal kronis (CKD). AI digunakan untuk memprediksi respon glikemik pascaprandial, mengoptimalkan asupan natrium/mikronutrien (misal diet DASH), membatasi protein/fosfor/kalium pada CKD, serta menyusun menu rumah sakit yang efisien dan sesuai preferensi pasien. Selain itu, AI mulai diterapkan untuk mengelola interaksi obat-nutrisi secara otomatis..

10.4.1 Diabetes Melitus: Prediksi Respons Glikemik dan Intervensi Individual

Manajemen Diabetes Melitus Tipe 2 (DMT2) mendapatkan dampak revolusioner terbesar dari penerapan *Machine Learning* (ML). Algoritma prediktif mampu meramalkan respons glukosa postprandial individu dengan mengintegrasikan variabel dari *Continuous Glucose Monitoring* (CGM), kebiasaan makan, aktivitas fisik, biomarker biokimia, hingga profil mikrobioma usus.

- **Efikasi Klinis:** Uji acak terkontrol (RCT) dan studi berbasis *metabolic digital twin* membuktikan bahwa intervensi nutrisi presisi berbasis AI menghasilkan penurunan kadar HbA1c secara signifikan serta memicu tingkat remisi DMT2 yang lebih tinggi dibanding konseling konvensional (Shamanna *et al.*, 2024; X. Wang *et al.*, 2025).
- **Arsitektur Algoritma:** Sistem rekomendasi makanan memanfaatkan model *Long Short-Term Memory* (LSTM) dan *Graph Neural Networks* (GNN) mampu mencapai tingkat akurasi hingga **97%** dalam mengklasifikasikan jenis pangan yang aman sekaligus mereduksi variabilitas glukosa darah harian (Ahmed *et al.*, 2025).
- **Aplikasi Berbasis LLM:** Penggunaan *Large Language Models* (LLM) seperti ChatGPT sebagai asisten diet mandiri menunjukkan potensi interaksi yang tinggi. Namun, tanpa supervisi klinis, output LLM sering kali kurang presisi dalam kalkulasi detail zat gizi makro/mikro serta rentan mengabaikan kontraindikasi makanan tertentu (Onay *et al.*, 2025).

10. 4.2 Hipertensi dan Penyakit Kardiovaskular: Otomatisasi Diet DASH

Penggunaan kecerdasan buatan dalam otomatisasi diet DASH untuk mengendalikan hipertensi dan risiko jantung kini telah didukung oleh berbagai bukti penelitian kontemporer yang kuat. Uji klinis membuktikan bahwa teknologi kecerdasan buatan seperti ChatGPT sudah mampu menyusun menu harian yang relevan bagi pasien jantung dan kolesterol tinggi, meskipun

perintah (*prompt*) dari pengguna awam harus dibuat sangat spesifik agar menu yang dihasilkan benar-benar patuh pada standar ketat diet DASH(Kenger & Karahan, 2025).

Untuk memaksimalkan manfaat ini, para peneliti sukses merancang cetak biru sistem pintar (*Decision Support System*) menggunakan kombinasi algoritma *Voting Ensembles Classifier* (VEC). Dari hasil evaluasi terhadap 61 artikel ilmiah, kombinasi model ini terbukti menghasilkan prediksi risiko yang paling akurat (mencapai rata-rata 58,3%) dan stabil karena mampu saling mengoreksi kesalahan prediksi antar-algoritma tunggal. Ketika diimplementasikan secara penuh, sistem berbasis *Machine Learning* ini dapat berfungsi sebagai alat bantu digital bagi para kardilog untuk mendeteksi risiko komplikasi kardiovaskular. Sistem tersebut secara otomatis akan menerjemahkan kondisi klinis serta rekam data pasien menjadi rekomendasi terapi diet DASH yang personal, aman, dan tepat sasaran sesuai dengan takaran kalori harian yang dibutuhkan(Ekle *et al.*, 2024).

Riset dari (Oikonomou & Khera, 2023)memperkuat kebutuhan tersebut dengan menegaskan bahwa kecerdasan buatan dan *machine learning* mampu mengintegrasikan data klinis kompleks serta riwayat diabetes pasien untuk memprediksi risiko penyakit jantung secara personal. Melalui model ini, diagnosis dini dan ketepatan intervensi gizi dapat diakselerasi guna meningkatkan keberhasilan penanganan klinis.

10.4.3 Penyakit Ginjal Kronis (CKD) dan Interaksi Obat-Nutrisi : Komputasi untuk Keamanan Terapi Pasien

Perencanaan menu untuk pasien Penyakit Ginjal Kronis (CKD) merupakan salah satu tantangan paling rumit dalam gizi klinis karena risiko fatal penumpukan kalium (*hiperkalemia*) atau fosfor (*hiperfosfatemia*).

Tinjauan sistematis terhadap 7 studi klinis (2.053 catatan medis) membuktikan bahwa pemanfaatan *Clinical Decision Support System* (CDSS) berbasis AI yang disinkronkan dengan hasil laboratorium riil pasien mampu mengurangi komplikasi gizi

buruk secara signifikan serta meningkatkan kepatuhan diet ginjal(Palomares *et al.*, 2025).

- Akurasi Penyaringan Elektrolit oleh LLM: Riset terbaru menunjukkan variasi performa yang mencolok di antara empat model AI populer dalam mengklasifikasikan 240 jenis bahan makanan. Untuk penyaringan Kalium, ChatGPT 4 tampil sebagai model terbaik dengan ketepatan mengenali makanan tinggi kalium mencapai 99% (akurasi total 81%), setara dengan Bing Chat (81%) dan mengungguli Bard AI (79%) serta ChatGPT 3.5 (66%). Sebaliknya, untuk penyaringan Fosfor, Bard AI mencatatkan performa sempurna (100%), diikuti oleh Bing Chat (89%), ChatGPT 3.5 (85%), dan ChatGPT 4 (77%). Kesenjangan ini menegaskan pentingnya pendampingan ahli karena kemampuan model AI di internet belum merata (Qarajeh *et al.*, 2023)
- Tata Laksana Komorbiditas Kompleks: Untuk mengatasi kompleksitas pasien CKD dengan banyak penyakit penyerta, telah dikembangkan sistem pintar berbasis pemrograman matematika *Mamdani fuzzy logic* yang menanamkan 1.144 aturan kombinasi gizi medis. Saat diuji pada 100 rekam gizi klinis, menu diet hasil komputasi ini mencatatkan akurasi total sebesar 97% dan tidak memiliki perbedaan kualitas dengan racikan manual para ahli gizi(Marashi-Hosseini *et al.*, 2023). Efisiensi ini diperkuat oleh model AI berbasis *symptom analysis* yang mampu memprediksi risiko perburukan fungsi organ secara *real-time* sekaligus memberikan peringatan dini terkait komplikasi fisik akibat ketidakseimbangan gizi(Kumar *et al.*, 2025)
- Mitigasi Interaksi Obat-Nutrisi (DNI): Guna meminimalkan risiko interaksi obat-makanan pada kondisi polifarmasi, teknologi *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) yang diintegrasikan dengan LLM melalui sistem *Diet-ODIN* mampu memindai *evidence-based guidelines* secara instan. Arsitektur RAG ini secara proaktif mencegah halusinasi komputer, memastikan rekomendasi

menu (seperti DASH atau diet ginjal) tetap aman, tidak menetralkan efek obat utama, serta memitigasi risiko efek samping metabolik yang fatal(Gavai & Van Hillegersberg, 2025).

Untuk memetakan sejauh mana teknologi ini dapat diadopsi dengan aman, berikut adalah tabel pembuktian klaim beserta pemetaan kesenjangan riset (*research gaps*) saat ini:

Tabel 4. Matriks Bukti Ilmiah dan Validitas Perencanaan Diet AI

Klaim Intervensi AI	Kekuatan Bukti	Landasan Empiris & Akurasi	Kesenjangan Riset (Research Gaps)
Perbaikan Kontrol Glikemik	Kuat (<i>Strong</i>)	Studi digital twin dan RCT membuktikan penurunan HbA1c riil serta peningkatan angka remisi.	Evaluasi efektivitas kepatuhan perilaku jangka panjang di luar ekosistem uji coba digital.
Adherence & Mitigasi Komplikasi CKD	Kuat (<i>Strong</i>)	Tinjauan sistematis menunjukkan <i>ontology-based</i> DSS mencapai akurasi 100% dalam pembatasan elektrolit serum.	Minimnya intervensi pada kondisi multi-morbiditas kompleks (misal: pasien CKD dengan Diabetes sekaligus Gagal Jantung).
Akurasi Menu Otomatis vs Dietisien	Sedang (<i>Moderate</i>)	Algoritma <i>fuzzy logic</i> mencapai kecocokan ~97% dengan pakar gizi, namun model LLM umum masih kurang presisi pada mikronutrien.	Integrasi langsung yang aman ke dalam sistem Rekam Medis Elektronik (EHR/EMR) rumah sakit secara universal.
Manajemen Interaksi Obat-Nutrisi	Rendah (<i>Low</i>)	Baru sebatas integrasi database statis pada prototipe sistem dan	Pemodelan interaksi dinamis untuk pasien

Klaim Intervensi AI	Kekuatan Bukti	Landasan Empiris & Akurasi	Kesenjangan Riset (Research Gaps)
		belum diuji secara klinis berskala besar.	polifarmasi dengan status gizi buruk.

Pengembangan DSS gizi klinis di masa depan wajib diarahkan untuk menjawab tiga tantangan utama: efektivitas jangka panjang model prediksi glikemik terhadap perubahan perilaku (*behavioral change*) pasien dalam hitungan tahun , otomatisasi pembaruan basis data interaksi obat-makanan secara dinamis untuk pasien geriatri polifarmasi , serta validasi model lintas etnis dan sosio-ekonomi agar rekomendasi menu tetap relevan secara kultural dan tidak memperlebar kesenjangan kesehatan digital. Demi menjamin keselamatan pasien (*patient safety*), implementasi teknologi ini tidak boleh dilepaskan sebagai sistem otonom mutlak; kehadiran profesional kesehatan sebagai validator akhir tetap menjadi prasyarat mutlak untuk memastikan rekomendasi yang dikeluarkan akurat, aman, dan beretika.

10.5 Integrasi *Wearables Devices* dan Big Data: Dari Monitoring *Real-Time* Individu hingga Surveilans Kesehatan Masyarakat

Penggabungan antara *Internet of Medical Things* (IoMT), perangkat sandang (*wearables device*), dan analitik *big data* kini membawa perubahan besar dalam tata laksana gizi modern. Melalui pengumpulan data yang kontinu, dinamis, dan proaktif, teknologi ini sukses menghubungkan intervensi klinis di tingkat individu (mikro) dengan perumusan kebijakan kesehatan masyarakat di tingkat populasi (makro).

10.5.1 Pemantauan Skala Mikro (*Micro-Monitoring*)

Di tingkat individu, platform IoMT mengintegrasikan data dari *smartwatch*, alat pemantauan gula darah kontinu (*Continuous Glucose Monitoring/CGM*), dan sensor kebugaran secara langsung (*real-time*) berbasis *deep learning*. Sinergi penggabungan data ini mendasari pembentukan Metabolic Digital Twin—sebuah model virtual presisi yang mensimulasikan respons metabolik unik pasien terhadap makanan dan aktivitas fisik secara proaktif. Sistem ini tidak lagi sekadar merekam data secara pasif, melainkan mampu meramal naik-turunnya kadar gula darah untuk mencegah deviasi ekstrem. Sistem pintar ini mampu mengenali pola kebiasaan pengguna saat makan atau bergerak secara instan, sekaligus memproses enkripsi data di node terdekat untuk menjamin keamanan data medis pasien.

Aplikasi gizi berbasis AI juga bertindak sebagai agen perubahan perilaku melalui interaksi adaptif tepat waktu. Perangkat lunak ini secara cerdas mengonversi data metabolik menjadi dorongan perilaku untuk membantu pengguna mengendalikan dorongan makan impulsif.

Evaluasi terhadap sebuah aplikasi berbasis AI-CGM *January V2* pada 944 pengguna menunjukkan peningkatan metrik *Time-in-Range/TIR*, yakni jumlah waktu yang dihabiskan pasien diabetes dalam rentang glukosa target. Pengguna sehat mencatat kenaikan TIR dari 74,7% ke 85,5%, sementara pasien diabetes melitus tipe 2 (DMT2) mengalami perbaikan TIR dari 49,7% menjadi 57,4% (Veluvali *et al.*, 2025).

Bagi penderita DMT2 dan pradiabetes, fluktuasi gula darah ekstrem akibat gaya hidup *sedentary* dan karbohidrat tinggi dapat dikendalikan menggunakan sistem AI berbasis data *time-series* sensor CGM. Sistem dengan algoritma *forecasting* seperti *XGBoost*, SARIMA, dan *Prophet*, akan mendeteksi pola ireguler, mencocokkannya dengan nutrisi via *food recognition*, dan mengarahkan HbA1c ke rentang normal dalam 3 bulan (Anjum *et al.*, 2024). Visualisasi *real-time* berbasis CGM ini

terbukti krusial dalam meningkatkan stabilitas metabolik dan mengedukasi pasien obesitas-pradiabetes secara mandiri .

Model perilaku makan AI masa kini juga mengintegrasikan metrik psikofisiologis seperti stres dan kualitas tidur yang direkam secara pasif oleh perangkat sandang. Berdasarkan analisis jalur (*path analysis*), stres psikologis terbukti memicu kerusakan metabolisme melalui rantai sebab-akibat yang kompleks. Stres memiliki efek langsung dalam menurunkan kualitas tidur dan memicu sindrom makan malam (*Night Eating Syndrome/NES*). Kualitas tidur yang buruk memperparah gejala makan malam tidak terkontrol, yang langsung mengganggu metabolisme glukosa darah. Sejalan dengan itu, penurunan kualitas tidur menekan indeks kualitas diet dan menurunkan konsentrasi ghrelin serum. Kekacauan hormonal ini mendorong perluasan lingkaran pinggang yang berakibat pada penurunan kolesterol HDL-C serta memicu lonjakan tekanan darah sistolik(Chew *et al.*, 2023). Maka, algoritma AI wajib membaca data tidur dan HRV perangkat sandang untuk memitigasi risiko sindrom metabolik secara holistik.

10.5.2 Makro-Surveilans untuk Ketahanan Gizi Masyarakat

Akselerasi *big data* telah merevolusi sistem surveilans gizi dari survei manual yang lambat menjadi pemantauan populasi yang prediktif dan preventif. Di tingkat makro, sebuah penelitian AI dari (Westerveld *et al.*, 2021) mengintegrasikan citra satelit *Vegetation Health* (VIIRS) dan data kelembapan tanah autoregresif (SMART) untuk mendeteksi risiko kekeringan serta kerusakan panen dengan *lead time* 3 hingga 6 bulan sebelum krisis pangan terjadi. Melalui algoritma pembelajaran mesin global dan arsitektur *Self-Supervised Learning*, sistem AI mampu memetakan kerawanan pangan digital secara *real-time* dengan menjelaskan hingga 81% variasi konsumsi makanan yang tidak memadai di 78 negara, serta memprediksi level konsumsi gizi 60 hari ke depan di wilayah konflik sebagai basis sistem peringatan dini global (Molenaar *et al.*, 2023). Selain itu, penerapan *Natural Language Processing* (NLP) pada artikel berita mampu mendeteksi indikator krisis di area terpencil hingga 12 bulan

sebelumnya (Balashankar *et al.*, 2023). Data harga komoditas lokal dan pemodelan teks ini diadopsi oleh lembaga internasional sebagai *interim updates* untuk melacak peristiwa darurat, memotong birokrasi, serta mengarahkan alokasi bantuan logistik nutrisi dan program intervensi gizi nasional secara proaktif ke wilayah episentrum yang paling membutuhkan.

Secara paralel, pangkalan data makro ini disempurnakan oleh analitik media sosial (*Social Media Analytics*) dan pola mesin pencari seperti Google atau Naver Trends sebagai instrumen *inforeillance* pola makan masyarakat. Melalui analisis jutaan kiriman teks global dan pemetaan lokasi, AI mampu menyusun indikator konsumsi di tingkat pemerintah daerah yang tervalidasi terhadap data sensus resmi. Sebagai contoh, model regresi AI mampu memprediksi prevalensi angka obesitas berbasis jenis kelamin dengan nilai korelasi mencapai 0,79–0,83, di mana wilayah dengan frekuensi diskusi makanan sehat yang rendah secara linear memiliki angka obesitas yang lebih tinggi (Cesare *et al.*, 2019). Analisis musiman data pencarian ini sangat krusial bagi otoritas kesehatan dalam merancang penargetan kampanye gizi masyarakat secara presisi, menentukan waktu intervensi obesitas global, serta melakukan triangulasi data bersama survei kesehatan tradisional.

10.6 Implementasi Praktis di Indonesia

Penelitian dan implementasi *Artificial Intelligence* (AI) di Indonesia kini mulai bergeser dari sekadar wacana teoritis menuju aplikasi praktis di lapangan. Meskipun sebagian besar sistem masih berada pada tahap prototipe dengan skala implementasi terbatas, teknologi *Machine Learning* (ML) telah diujicoba secara aktif untuk menjawab tantangan gizi nasional, khususnya intervensi stunting, pemantauan gizi ibu-anak, hingga pemetaan kebijakan makro menuju visi Indonesia Emas 2045.

10.6.1 Skrining Stunting dan Gizi Balita di Fasilitas Primer

Penanganan stunting di tingkat akar rumput menjadi fokus utama pemanfaatan AI di Indonesia. Di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), integrasi platform pemantauan gizi anak berbasis ML yang melibatkan puskesmas, posyandu, dan PAUD terbukti sukses meningkatkan kepatuhan orang tua dalam pencegahan stunting. Aplikasi ini mengintegrasikan fitur pengenalan pola makan, kalkulator gizi AI, dan layanan *virtual nutritionist*, dengan tingkat penerimaan pengguna yang sangat tinggi melalui skor *System Usability Scale* (SUS) sebesar 82,5% (Ma'ruf *et al.*, 2024).

Sejalan dengan inovasi tersebut, pengembangan aplikasi oleh (Saepulloh *et al.*, 2025) berbasis *Application Programming Interface* (API) menggunakan algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN), *Random Forest*, dan *XGBoost* juga mulai diterapkan di berbagai layanan kesehatan primer seperti Puskesmas Winong dan Puskesmas Sawah Besar. Sistem ini mampu mengalkulasi *Z-score* TB/U dan BB/U standar WHO secara instan dengan nilai validitas sistem 0,83 dan efektivitas 0,82. Dalam pengujian data klinis skala besar di puskesmas urban (melibatkan 261 anak dan 1.019 ibu), model *XGBoost* bahkan berhasil mencetak akurasi deteksi dini risiko maternal dan gizi buruk anak sebesar 96% hingga 98% dengan *recall* mencapai 100%. Akurasi tinggi ini sangat krusial bagi petugas kesehatan di faskes primer untuk mempercepat pengambilan keputusan klinis tanpa prosedur birokrasi manual yang lambat.

10.6.2 Eksplorasi *Precision Nutrition* dan Agen Konseling Lokal

Pada ranah pemenuhan gizi masyarakat mandiri, AI mulai masuk ke sektor komersial melalui implementasi *Precision Nutrition* di restoran lokal Indonesia. Menggunakan algoritma genetika (*Genetic Algorithm*), sistem rekomendasi menu pintar berhasil diujicoba di Restoran Karimata dengan mengonversi profil antropometri konsumen (usia, jenis kelamin, BB/TB) dan

riwayat Penyakit Tidak Menular (PTM) langsung menjadi opsi menu makan siang yang pas secara kalori (Seminar *et al.*, 2025).

Di sisi lain, keterbatasan jumlah tenaga nutrisisionis di faskes primer mendorong peluang pemanfaatan *AI-powered chatbot* sebagai agen edukasi mandiri. Survei nasional menunjukkan bahwa sekitar 80% masyarakat Indonesia sudah familiar dengan penggunaan *chatbot* dan terbuka terhadap konseling gizi digital (Aulia *et al.*, 2024). Kendati demikian, agar *chatbot* ini efektif menurunkan angka stunting, desain sistem wajib berbasis bukti klinis dan peka terhadap konteks kultural atau budaya kuliner lokal masyarakat setempat.

10.6.3 Big Data dan Konstruksi Kebijakan Gizi Makro

Pada skala makro nasional, pemodelan ML menggunakan basis data global (WHO, UNICEF, dan *Global Nutrition Report*) terhadap 100.000 sampel anak Indonesia berhasil memetakan bahwa berat badan menurut umur (BB/U), tingkat pendidikan orang tua, pendapatan rumah tangga, dan akses air bersih merupakan prediktor utama penentu stunting (prevalensi 25,3%) dan obesitas (8,6%). Temuan prediktif ini sangat esensial bagi penajaman target program nasional seperti *Bangga Kencana* (Firmansyah *et al.*, 2025).

Secara konseptual, integrasi AI ke dalam sistem intervensi strategis di bawah Badan Gizi Nasional berpotensi besar memotong rantai pemborosan makanan (*food waste*) serta mengoptimalkan distribusi logistik pangan skala nasional, seperti pada program makan siang gratis, terutama di daerah terpencil.

Meskipun potensi akurasi dan efisiensi klinisnya tinggi, implementasi AI gizi di Indonesia masih membentur tiga hambatan sistemik utama—yaitu ketidakmerataan infrastruktur digital rural, rendahnya literasi digital tenaga kesehatan dan pasien, serta kekosongan regulasi tata kelola data medis—sehingga pemerintah harus memprioritaskan penguatan ketiga aspek tersebut agar teknologi ini dapat menjadi instrumen

kesehatan yang aman, inklusif, dan berkelanjutan menuju Indonesia Emas 2045.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, E., Oumer, M., & Hassan, M. (2025). Diabetes-focused food recommender system (DFRS) to enabling digital health. *PLOS Digital Health*, 4. <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000530>
- Anjum, M., Saher, R., & Saeed, M. N. (2024). Optimizing type 2 diabetes management: AI-enhanced time series analysis of continuous glucose monitoring data for personalized dietary intervention. *PeerJ Computer Science*, 10. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1971>
- Aulia, E. S. N., Jati, G., Wibowo, I., Muhammad, H., & Saepudin, E. (2024). Chatbots Be Nutritionists: Exploring the Potential of AI-Powered to Improve Nutritional Counseling in Indonesia. *Jurnal Sosioteknologi*. <https://doi.org/10.5614/sostek.itbj.2024.23.3.2>
- Balashankar, A., Subramanian, L., & Fraiberger, S. (2023). Predicting food crises using news streams. *Science Advances*, 9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm3449>
- Bernstein, A., Janeke, P., Riggs, R., Burke, E., Meyer, J., Moyer, M., Murofushi, K., Botha, R., & Meyer, J. E. M. (2025). Artificial Intelligence-Based Hospital Malnutrition Screening: Validation of a Novel Machine Learning Model. *Applied Clinical Informatics*, 16, 1646–1657. <https://doi.org/10.1055/a-2635-3158>
- Braga, B. C., Nguyen, P. H., Tran, L. M., Hoang, N. T., Bannerman, B., Doyle, F., Folsom, G., Gangupantulu, R., Karachiwalla, N., Kolt, B., McCloskey, P., Palloni, G., Thi Tran, T. H., Thuy Thi Truong, D., Hughes, D., & Gelli, A. (2024). Feasibility of Using an Artificial Intelligence-based Telephone Application for Dietary Assessment and Nudging to Improve the Quality of Food Choices of Female Adolescents in Vietnam: Evidence

from a Randomized Pilot Study. *Current Developments in Nutrition*, 8(6).
<https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2023.102063>

Cesare, N., Dwivedi, P., Nguyen, Q., & Nsoesie, E. (2019). Use of social media, search queries, and demographic data to assess obesity prevalence in the United States. *Palgrave Communications*, 5. <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0314-x>

Chew, H., Chew, N., Loong, S., Lim, S. L., Tam, W., Chin, Y., Chao, A., Dimitriadish, G., Gao, Y., So, J., Shabbir, A., & Ngiam, K. (2023). Effectiveness of an Artificial Intelligence-Assisted App for Improving Eating Behaviors: Mixed Methods Evaluation. *Journal of Medical Internet Research*, 26. <https://doi.org/10.2196/46036>

Constenla-Villoslada, S., Liu, Y., McBride, L., Ouma, C., Mutanda, N., & Barrett, C. (2025). High-frequency monitoring enables machine learning-based forecasting of acute child malnutrition for early warning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2416161122>

Dutta, R., Mukherjee, I., & Chakraborty, C. (2024). Obesity disease risk prediction using machine learning. *International Journal of Data Science and Analytics*, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s41060-023-00491-9>

Ekle, F., Shidali, V., Ochogwu, R. E., & Igoche, I. B. (2024). Machine Learning models for heart disease prediction and dietary lifestyle change therapy recommendation: a systematic review. *Discover Artificial Intelligence*, 4. <https://doi.org/10.1007/s44163-024-00181-w>

Ferdowsy, F., Rahi, K., Jabiullah, Md. I., & Habib, Md. T. (2021). A machine learning approach for obesity risk prediction. 2, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.crbeha.2021.100053>

- Firmansyah, M., Prasetya, L. K. B., & Prawira, N. A. (2025). Machine Learning for Child Malnutrition Prediction in Indonesia. *Jurnal Keluarga Berencana*. <https://doi.org/10.37306/9v7sth43>
- Gavai, A., & Van Hillegersberg, J. (2025). AI-driven personalized nutrition: RAG-based digital health solution for obesity and type 2 diabetes. *PLOS Digital Health*, 4. <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000758>
- Graybeal, A., Compton, A., Swafford, S., Brandner, C., Johnson, M., Kaylor, M., Haynes, H., & Stavres, J. (2025). A predictive model for body water and fluid balance using 3D smartphone anthropometry. *Frontiers in Physiology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1577049>
- Hassan, M. A., & Sazonov, E. (2020). Selective content removal for egocentric wearable camera in nutritional studies. *IEEE Access*, 8, 198615–198623. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030723>
- Helforoush, Z., & Sayyad, H. (2024). Prediction and classification of obesity risk based on a hybrid metaheuristic machine learning approach. *Frontiers in Big Data*, 7. <https://doi.org/10.3389/fdata.2024.1469981>
- Hossain, E., Rana, R., Higgins, N., Soar, J., Barua, P., Pisani, A., & Turner, K. (2023). Natural Language Processing in Electronic Health Records in relation to healthcare decision-making: A systematic review. *Computers in Biology and Medicine*, 155, 106649. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.106649>
- Kenger, E., & Karahan, T. O. (2025). Artificial Intelligence-Generated Diet Plans for Hypertension and Dyslipidemia: Adherence and Nutritional Insights. *Iranian Journal of Public Health*, 54, 1243–1251. <https://doi.org/10.18502/ijph.v54i6.18902>

- Kumar, M., Sonam, K., & Kar, K. K. (2025). AI-Powered Disease Prediction and Personalized Nutrition System Based on Symptom Analysis. *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*. <https://doi.org/10.55041/ijssrem44068>
- Li, S., Zhang, Y., Fu, K., Fang, K., Zheng, L., Lin, Y., & Wu, J. (2025). Machine learning ensemble meets clinical practice: developing a real-world risk prediction model for metabolic syndrome using super learner and scorecard approaches. *Journal of Advanced Research*, 82, 701–711. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2025.06.072>
- Liu, Y., Xu, Y., Guo, L., Chen, Z., Xia, X., Chen, F., Tang, L., Jiang, H., & Xie, C. (2025). Development and external validation of machine learning models for the early prediction of malnutrition in critically ill patients: a prospective observational study. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 25. <https://doi.org/10.1186/s12911-025-03082-9>
- Lo, F. P. -w., Qiu, J., Jobarteh, M., Sun, Y., Wang, Z., Jiang, S., Baranowski, T., Anderson, A., McCrory, M., Sazonov, E., Jia, W., Sun, M., Steiner-Asiedu, M., Frost, G., & Lo, B. (2024). AI-enabled wearable cameras for assisting dietary assessment in African populations. *NPJ Digital Medicine*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01346-8>
- Marashi-Hosseini, L., Jafarirad, S., & Hadianfard, A. (2023). A fuzzy based dietary clinical decision support system for patients with multiple chronic conditions (MCCs). *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39371-4>
- Ma'ruf, K., Setiawan, R., Saputra, A. A., Belani, A. Q., Tsani, L. M., & Azizah, N. (2024). Development of Integrated Nutritional Monitoring Application Utilizing Machine Learning and Artificial Intelligence for Child Growth Assessment. *2024 International Conference on Decision Aid Sciences and*

Applications (DASA), 1–5.
<https://doi.org/10.1109/dasa63652.2024.10836308>

- Molenaar, A., Jenkins, E., Brennan, L., Lukose, D., & McCaffrey, T. (2023). The use of sentiment and emotion analysis and data science to assess the language of nutrition, food and cooking related content on social media: A systematic scoping review. *Nutrition Research Reviews*, 1–59. <https://doi.org/10.1017/s0954422423000069>
- Moyen, A., Rappaport, A., Fleurent-Grégoire, C., Tessier, A.-J., Brazeau, A., & Chevalier, S. (2022). Relative Validation of an Artificial Intelligence-Enhanced, Image-Assisted Mobile App for Dietary Assessment in Adults: Randomized Crossover Study. *Journal of Medical Internet Research*, 24. <https://doi.org/10.2196/40449>
- Mundt, C., Yusufoglu, B., Kudenko, D., Mertoglu, K., & Esatbeyoglu, T. (2025). AI-Driven Personalized Nutrition: Integrating Omics, Ethics, and Digital Health. *Molecular Nutrition & Food Research*, 69. <https://doi.org/10.1002/mnfr.70293>
- Nguyen, P., Tran, L., Hoang, N. T., Truong, D., Tran, T., Huynh, P., Koch, B., McCloskey, P., Gangupantulu, R., Folson, G., Bannerman, B., Arrieta, A., Braga, B., Arsenault, J., Kehs, A., Doyle, F., Hughes, D., & Gelli, A. (2022). Relative validity of a mobile AI-technology-assisted dietary assessment in adolescent females in Vietnam. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 116, 992–1001. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac216>
- Nourazarain, A., & Vaziri, Y. (2025). Nutrigenomics meets multi-omics: integrating genetic, metabolic, and microbiome data for personalized nutrition strategies. *Genes & Nutrition*, 20. <https://doi.org/10.1186/s12263-025-00790-9>
- Oikonomou, E., & Khera, R. (2023). Machine learning in precision diabetes care and cardiovascular risk prediction.

- Onay, T., Bekar, D., Çoban, E., Doğan, N., & Günşen, U. (2025). Artificial Intelligence in Clinical Nutrition: A Descriptive Comparison of ChatGPT- and Dietitian-Planned Diets for Chronic Disease Scenarios. *Journal of Human Nutrition and Dietetics: The Official Journal of the British Dietetic Association*, 38 5. <https://doi.org/10.1111/jhn.70135>
- Palomares, S. M., Ferrara, G., Sguanci, M., Gazineo, D., Godino, L., Palmisano, A., Paderno, A., Vrenna, G., Faraglia, E., Petrelli, F., Cangelosi, G., Gravante, F., & Mancin, S. (2025). The Impact of Artificial Intelligence Technologies on Nutritional Care in Patients with Chronic Kidney Disease: A Systematic Review. *Journal of Renal Nutrition: The Official Journal of the Council on Renal Nutrition of the National Kidney Foundation*. <https://doi.org/10.1053/j.jrn.2025.06.002>
- Phalle, A., & Gokhale, D. (2025). Navigating next-gen nutrition care using artificial intelligence-assisted dietary assessment tools—a scoping review of potential applications. *Frontiers in Nutrition*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1518466>
- Qarajeh, A., Tangpanithandee, S., Thongprayoon, C., Suppadungsuk, S., Krisanapan, P., Aiumtrakul, N., Valencia, O. G., Miao, J., Qureshi, F., & Cheungpasitporn, W. (2023). AI-Powered Renal Diet Support: Performance of ChatGPT, Bard AI, and Bing Chat. *Clinics and Practice*, 13, 1160–1172. <https://doi.org/10.3390/clinpract13050104>
- Quan, W., Zhou, J., Wang, J., Huang, J., & Du, L. (2025). Machine Learning-Driven Precision Nutrition: A Paradigm Evolution in Dietary Assessment and Intervention. *Nutrients*, 18. <https://doi.org/10.3390/nu18010045>

- Saepulloh, Khomarudin, A. N., Aulia, R., Novita, R., & Putri, E. E. (2025). Pengembangan Aplikasi Berbasis AI Untuk Penilaian Status Gizi Dan Intervensi Nutrisi Balita Mengacu Pada Data WHO. *Jurnal Teknologi Informasi (JUTECH)*. <https://doi.org/10.32546/jutech.v6i1.3062>
- Seminar, K., Damayanthi, E., Priandana, K., Imantho, H., Ligar, B. W., Seminar, A., Krishnajaya, A. D., Aditya, M., Suherman, M. I. H., & Fillah, I. F. (2025). AI-based system for food and beverage selection towards precision nutrition in Indonesian restaurants. *Frontiers in Nutrition*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1590523>
- Shamanna, P., Joshi, S., Thajudeen, M., Shah, L., Poon, T., Mohamed, M., & Mohammed, J. (2024). Personalized nutrition in type 2 diabetes remission: application of digital twin technology for predictive glycemic control. *Frontiers in Endocrinology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1485464>
- Shin, H., Shim, S., & Oh, S. (2023). Machine learning-based predictive model for prevention of metabolic syndrome. *PLOS ONE*, 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286635>
- Shonkoff, E., Cara, K., Pei, X., Chung, M., Kamath, S., Panetta, K., & Hennessy, E. (2023). AI-based digital image dietary assessment methods compared to humans and ground truth: a systematic review. *Annals of Medicine*, 55. <https://doi.org/10.1080/07853890.2023.2273497>
- Tinsley, G., Rodriguez, C., Florez, C., Siedler, M., Tinoco, E., McCarthy, C., & Heymsfield, S. (2024). Smartphone three-dimensional imaging for body composition assessment using non-rigid avatar reconstruction. *Frontiers in Medicine*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1485450>
- Tinsley, G., Rodriguez, C., Siedler, M., Tinoco, E., White, S., LaValle, C., Brojanac, A., DeHaven, B., Rasco, J., Florez, C., & Graybeal,

- A. (2024). Mobile phone applications for 3-dimensional scanning and digital anthropometry: a precision comparison with traditional scanners. *European Journal of Clinical Nutrition*, 78, 509–514. <https://doi.org/10.1038/s41430-024-01424-w>
- Veluvali, A., Zahedani, A. D., Hosseinian, A., Aghaeepour, N., McLaughlin, T., Woodward, M., Ditullio, A., Hashemi, N., & Snyder, M. (2025). Impact of digital health interventions on glycemic control and weight management. *NPJ Digital Medicine*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41746-025-01430-7>
- Wang, W.-Y., Wu, Y.-S., Huang, Y.-T., & Tzeng, W.-C. (2025). Early risk detection of metabolic syndrome using sex-specific machine learning models in military personnel. *Frontiers in Public Health*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1625461>
- Wang, X., Sun, Z., Xue, H., & An, R. (2025). Artificial Intelligence Applications to Personalized Dietary Recommendations: A Systematic Review. *Healthcare*, 13. <https://doi.org/10.3390/healthcare13121417>
- Westerveld, J., Van Den Homberg, M., Nobre, G., Van Den Berg, D., Teklesadik, A., & Stuit, S. (2021). Forecasting transitions in the state of food security with machine learning using transferable features. *The Science of the Total Environment*, 786, 147366. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147366>
- Windus, J., Stewart, S., Adam, M., Dodd, C., Burrows, T., Collins, C., & Rollo, M. (2025). Exploring Dietary Assessment Methods Used to Measure Individual Dietary Intakes in Low- and Middle-Income Countries and Under-Served Populations in High-Income Countries. *Nutrients*, 17. <https://doi.org/10.3390/nu17020360>

Zheng, J., Wang, J., Shen, J., & An, R. (2023). Artificial Intelligence Applications to Measure Food and Nutrient Intakes: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, 26. <https://doi.org/10.2196/54557>

BAB 11

MASA DEPAN *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* DALAM PELAYANAN KESEHATAN

11.1 Pendahuluan

Perkembangan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dalam pelayanan kesehatan sedang bergerak dari fungsi sebagai alat bantu operasional menuju peran yang lebih strategis dalam membentuk ekosistem kesehatan masa depan. Pada tahap awal, AI banyak digunakan untuk membantu analisis data, dokumentasi, dan dukungan keputusan klinis. Dalam dekade mendatang, perannya diperkirakan semakin luas, terutama dalam mendorong layanan kesehatan yang lebih prediktif, preventif, presisi, personal, dan berkelanjutan. Perubahan ini tidak hanya ditentukan oleh kemajuan algoritma, tetapi juga oleh kemampuan sistem kesehatan mengintegrasikan data klinis, biologis, lingkungan, sosial, dan ekonomi secara bertanggung jawab (Rajpurkar *et al.*, 2022).

Bab-bab sebelumnya telah membahas dasar AI, digitalisasi layanan, diagnosis, kesehatan masyarakat, keperawatan, *telemedicine*, etika, tantangan implementasi, serta gizi. Oleh karena itu, BAB 10 tidak diarahkan untuk mengulang pembahasan tersebut, melainkan untuk melihat arah perkembangan AI kesehatan secara prospektif. Pertanyaan utamanya adalah: ke mana AI dalam pelayanan kesehatan akan berkembang pada dekade mendatang? Pertanyaan ini penting

karena masa depan AI kesehatan tidak hanya bergantung pada akurasi prediksi, tetapi juga pada validasi ilmiah, keselamatan pasien, keadilan akses, dan tata kelola yang memadai.

Organisasi Kesehatan Dunia menegaskan bahwa AI berpotensi mendukung pelayanan klinis, riset kesehatan, pengembangan obat, administrasi layanan, dan kesehatan masyarakat. Namun, pemanfaatannya perlu disertai prinsip etika, transparansi, keselamatan, serta perlindungan hak manusia (WHO, 2021; WHO, 2025). Dengan landasan tersebut, AI masa depan sebaiknya dipahami bukan sebagai pengganti tenaga kesehatan, melainkan sebagai penguat kapasitas manusia dalam mengambil keputusan dan mengelola sistem kesehatan yang semakin kompleks. Prinsip *human-in-the-loop* menjadi penting agar kendali akhir tetap berada pada manusia, terutama dalam keputusan yang berkaitan dengan keselamatan pasien dan tanggung jawab profesional. Pada akhirnya, pengembangan AI diarahkan untuk membangun sistem kesehatan yang cerdas, adil, aman, berkelanjutan, dan manusiawi.



Gambar 13. Ilustrasi peran AI dalam membangun pelayanan kesehatan masa depan yang prediktif, presisi, berkelanjutan, dan berpusat pada manusia
Sumber: penulis (2026) dibuat menggunakan canva dan adobe illustrator

11.2 Tren Teknologi Kesehatan Masa Depan

Perkembangan AI kesehatan masa depan tidak hanya berkaitan dengan peningkatan efisiensi layanan, tetapi juga dengan munculnya berbagai teknologi *deep-tech* yang berpotensi mengubah cara sistem kesehatan memahami tubuh manusia, penyakit, terapi, dan organisasi layanan. Beberapa teknologi yang mulai banyak dibahas adalah *Quantum Artificial Intelligence*, *Brain-Computer Interface*, *digital twins*, dan *Generative AI* untuk desain biologis.

Keempat teknologi tersebut belum seluruhnya siap digunakan secara luas dalam praktik klinis. Sebagian masih berada pada tahap riset, pembuktian konsep, atau pengembangan awal. Meski demikian, arah perkembangannya penting untuk dipahami karena dapat memperluas kemampuan manusia dalam melakukan simulasi biologis, membaca sinyal saraf, memodelkan respons pasien, serta merancang molekul atau protein baru. Oleh sebab itu, AI masa depan perlu dipandang secara proporsional. Teknologi ini bukan solusi tunggal bagi seluruh persoalan kesehatan, melainkan bagian dari ekosistem ilmiah yang membutuhkan data berkualitas, validasi klinis, regulasi, infrastruktur, dan keterlibatan tenaga kesehatan dalam kerangka *human-in-the-loop*.

11.2.1 *Quantum Artificial Intelligence* dalam Medis

Quantum Artificial Intelligence atau *Quantum AI* merujuk pada integrasi komputasi kuantum dan AI untuk membantu menyelesaikan persoalan komputasi yang sangat kompleks. Dalam bidang medis, pendekatan ini berpotensi mendukung simulasi biologis, analisis molekuler, integrasi data *multi-omics*, dan tahap awal penemuan obat. Komputasi kuantum memanfaatkan prinsip seperti superposisi dan keterkaitan kuantum. Dalam jangka panjang, kemampuan tersebut

diperkirakan dapat membantu pemodelan proses biologis yang sulit dianalisis secara efisien dengan komputasi klasik. Nassir *et al.* (2025) menempatkan komputasi kuantum sebagai pendekatan yang berpotensi mempercepat simulasi molekuler, penemuan biomarker, integrasi *multi-omics*, dan pengembangan terapi presisi.

Salah satu peluang penting *Quantum AI* adalah simulasi interaksi antara molekul obat dan target biologis secara lebih rinci. Kemampuan ini dapat membuat tahap awal riset obat lebih terarah sekaligus membantu peneliti memahami mekanisme penyakit yang kompleks. Meski potensinya besar, teknologi ini belum menjadi praktik klinis umum. Penerapannya masih membutuhkan perangkat keras yang stabil, algoritma yang skalabel, tenaga ahli lintas bidang, pembuktian ilmiah, serta tata kelola yang memadai. Dengan demikian, *Quantum AI* sebaiknya dipahami sebagai potensi riset masa depan, bukan sebagai teknologi klinis yang telah matang.

11.2.2 Brain-Computer Interfaces Berbasis AI

Brain-Computer Interface (BCI) merupakan teknologi antarmuka otak-komputer yang memungkinkan sinyal saraf diterjemahkan menjadi perintah tertentu dengan bantuan sistem komputasi. Pada BCI berbasis AI, algoritma digunakan untuk mengenali pola sinyal otak, menerjemahkan niat motorik atau komunikasi, lalu mengubahnya menjadi keluaran seperti teks, suara sintetis, atau kendali perangkat bantu. Teknologi ini membuka peluang bagi pasien dengan stroke, paralisis, cedera medula spinalis, atau gangguan neurologis berat.

Salah satu arah riset yang berkembang adalah *speech neuroprosthesis*, yaitu sistem yang menerjemahkan sinyal saraf terkait upaya berbicara menjadi teks atau keluaran komunikasi. Studi Willett *et al.* (2023) menunjukkan bahwa *decoding* berbasis

AI dapat mendukung komunikasi pada pasien dengan gangguan bicara berat. Walaupun hasilnya menjanjikan, teknologi ini masih berada pada tahap pembuktian konsep dan membutuhkan penelitian pada jumlah peserta yang lebih besar.

Dalam rehabilitasi, BCI juga berpotensi mendukung latihan fungsi motorik melalui umpan balik saraf, stimulasi listrik fungsional, atau kendali perangkat eksternal. Tantangan penerapannya tetap besar karena sinyal otak bersifat kompleks, bervariasi antarindividu, dan dapat berubah dari waktu ke waktu. Pada BCI invasif, isu keselamatan, privasi mental, etika, dan validasi klinis menjadi semakin penting karena teknologi ini berhubungan langsung dengan aktivitas saraf manusia.

11.2.3 *Digital Twins* Klinis

Digital twins klinis adalah representasi virtual dari organ, pasien, penyakit, atau sistem pelayanan kesehatan yang digunakan untuk simulasi, prediksi, dan dukungan pengambilan keputusan. Dalam praktik klinis, *digital twin* bukan sekadar salinan data pasien, melainkan model dinamis yang menggabungkan data biologis, klinis, fisiologis, citra medis, sensor, dan riwayat kesehatan. Tujuan utamanya adalah memperkirakan respons terhadap terapi atau perubahan kondisi sebelum intervensi dilakukan secara langsung.

Katsoulakis *et al.* (2024) menjelaskan bahwa *digital twins for health* merupakan bidang interdisipliner yang menggabungkan kedokteran, rekayasa, *data science*, AI, dan sistem kesehatan. Pada tingkat pasien, teknologi ini berpotensi mendukung *precision medicine*, misalnya melalui simulasi respons organ terhadap terapi atau prediksi risiko perburukan penyakit. Drummond dan Gonsard (2024) menggambarkan *patient digital twin* sebagai replika digital yang memuat informasi

multidimensional spesifik pasien untuk mendukung keputusan klinis.

Klaim penerapan *digital twin* pasien tetap perlu dibaca secara hati-hati. Sebagian besar pengembangannya masih berada pada fase riset atau praklinis, sehingga belum dapat dianggap sebagai teknologi yang siap digunakan secara luas. Selain untuk pasien individual, *digital twins* juga dapat dimanfaatkan pada tingkat sistem. Rumah sakit atau otoritas kesehatan dapat menggunakannya untuk mensimulasikan kapasitas layanan, kebutuhan tenaga, alur pasien, serta kesiapan menghadapi krisis. Dengan cara ini, *digital twins* dapat mendukung perencanaan layanan yang lebih adaptif dan berbasis data.

11.2.4 Generative AI untuk Penemuan Material Biologis

Generative AI dalam kesehatan masa depan tidak hanya berkaitan dengan *chatbot* atau pembuatan teks. Dalam riset biomedis, teknologi ini juga digunakan untuk desain biologis, seperti menghasilkan kandidat molekul obat, merancang protein baru, memprediksi struktur biomolekul, dan mengeksplorasi ruang kimia yang sangat luas. Arah ini penting karena penemuan obat dan material biologis biasanya membutuhkan waktu panjang, biaya besar, serta banyak tahap percobaan.

Salah satu perkembangan penting adalah penggunaan model difusi untuk desain protein. RFdiffusion, misalnya, digunakan untuk merancang struktur dan fungsi protein secara *de novo*, meskipun hasil komputasi tetap membutuhkan validasi eksperimental (Watson *et al.*, 2023). AlphaFold 3 juga menunjukkan arah baru dalam pemodelan interaksi biomolekuler. Teknologi ini memperluas prediksi dari struktur protein menuju kompleks biomolekuler yang mencakup protein, asam nukleat, molekul kecil, ion, dan residu termodifikasi (Abramson *et al.*, 2024). Survei Tang *et al.* (2024) menunjukkan

bahwa AI generatif dalam desain obat berkembang pada generasi molekul kecil dan protein, dengan tantangan seperti validitas kimia, kemampuan sintesis, keamanan, efektivitas, dan keterterapan biologis.

Manfaat utama *Generative AI* bukanlah menciptakan obat siap pakai secara instan, melainkan memperluas ruang eksplorasi ilmiah dan mempercepat tahap awal penemuan kandidat terapi. Setiap protein, molekul, atau terapi yang dirancang AI tetap harus melewati validasi laboratorium, uji keamanan, uji efektivitas, dan penilaian regulatori sebelum digunakan pada pasien.

11.3 Precision Medicine Berbasis AI

Precision medicine atau kedokteran presisi merupakan pendekatan pelayanan kesehatan yang menyesuaikan pencegahan, diagnosis, dan terapi dengan karakteristik biologis serta klinis setiap pasien. Pada masa depan, AI berpotensi memperkuat pendekatan ini karena mampu mengolah data besar dan beragam, seperti data klinis, genomik, proteomik, metabolomik, citra medis, dan respons terapi. Melalui integrasi data tersebut, tenaga kesehatan dapat memperoleh gambaran yang lebih utuh mengenai kondisi pasien, risiko penyakit, dan kemungkinan respons terhadap intervensi tertentu.

Meski demikian, AI dalam kedokteran presisi tidak boleh dipahami sebagai pengganti penilaian klinis. Perannya lebih tepat ditempatkan sebagai sistem pendukung yang membantu tenaga kesehatan menemukan pola, memperkirakan risiko, dan menyusun pilihan terapi yang lebih sesuai dengan kondisi pasien. Arah ini sejalan dengan perkembangan AI kesehatan yang menekankan integrasi data multidimensi dan keputusan klinis

yang tetap memerlukan validasi manusia (Rajpurkar *et al.*, 2022; Subbiah, 2023).

11.3.1 Evidence-Based Medicine yang Diperkuat AI

Kedokteran presisi tidak berarti meninggalkan *evidence-based medicine* atau kedokteran berbasis bukti. Sebaliknya, AI dapat memperkuat prinsip tersebut dengan membantu menghubungkan bukti ilmiah dari populasi besar dengan karakteristik individual pasien. Pedoman klinis tetap menjadi dasar penting dalam pelayanan kesehatan, tetapi tidak selalu mampu menangkap seluruh keragaman biologis, genetik, sosial, dan lingkungan yang memengaruhi respons seseorang terhadap terapi.

Melalui analisis data laboratorium, riwayat penyakit, variasi genetik, hasil pencitraan, komorbiditas, dan respons terapi sebelumnya, AI dapat membantu memperkirakan pasien mana yang lebih mungkin merespons terapi tertentu, mengalami efek samping, atau membutuhkan pemantauan lebih intensif. Subbiah (2023) menjelaskan bahwa generasi berikutnya dari *evidence-based medicine* akan semakin dipengaruhi oleh *data science*, *machine learning*, desain uji klinis adaptif, dan sistem bukti yang lebih berpusat pada pasien.

Rekomendasi berbasis AI tetap perlu ditempatkan dalam kerangka pengambilan keputusan klinis yang hati-hati. Hasil AI sebaiknya dibaca bersama kondisi pasien, preferensi pasien, bukti ilmiah, dan pertimbangan profesional tenaga kesehatan. Prinsip *human-in-the-loop* menjadi penting agar keputusan terapi tidak hanya bergantung pada algoritma, tetapi juga mempertimbangkan penilaian klinis, komunikasi, empati, dan tanggung jawab profesional.

11.3.2 *Multi-Omics* dan Pemetaan Genomik

Salah satu fondasi utama kedokteran presisi masa depan adalah kemampuan memahami tubuh manusia melalui berbagai lapisan data biologis atau *multi-omics*. Istilah ini mencakup genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik, epigenomik, mikrobiom, dan data biologis lain yang menggambarkan proses penyakit secara lebih menyeluruh. Genomik membantu membaca variasi genetik, sedangkan proteomik dan metabolomik memberi gambaran mengenai aktivitas protein dan metabolit yang lebih dekat dengan kondisi fisiologis pasien.

Peran AI menjadi penting karena data *multi-omics* memiliki dimensi besar, hubungan kompleks, dan pola yang sulit dianalisis dengan pendekatan konvensional. Model AI dapat membantu mengintegrasikan berbagai lapisan data tersebut, mendeteksi biomarker, memetakan sub tipe penyakit, dan memperkirakan respons terapi. Dalam farmakogenomik, misalnya, respons pasien terhadap obat tidak hanya ditentukan oleh satu gen, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh jaringan variasi genetik, epigenetik, metabolik, serta faktor lingkungan. Zack *et al.* (2025) menjelaskan bahwa integrasi *multi-omics* dan AI berpotensi memperluas pemahaman tentang respons terapi, meskipun masih menghadapi tantangan harmonisasi data, interpretabilitas, pengawasan regulatori, dan kebutuhan dataset yang inklusif.

Pada tingkat sistem, integrasi AI dan *multi-omics* dapat membantu menggeser pelayanan kesehatan dari pendekatan berbasis biomarker tunggal menuju pemahaman penyakit sebagai sistem biologis yang saling terhubung. Perubahan ini membuka peluang untuk diagnosis yang lebih rinci, stratifikasi pasien yang lebih tepat, dan pemilihan terapi yang lebih sesuai. Akan tetapi, penerjemahan hasil *multi-omics* ke praktik klinis tetap membutuhkan validasi yang kuat. Welzel *et al.* (2026)

menekankan bahwa *AI-enabled multi-omics* dapat mendukung diagnosis berbasis data, prediksi respons terapi, dan stratifikasi pasien, tetapi regulasi dan bukti dunia nyata perlu mengikuti kompleksitas teknologi tersebut.

11.3.3 Revolusi Drug Discovery In-Silico

AI juga diperkirakan akan memperkuat proses *drug discovery in-silico*, yaitu penemuan obat dengan bantuan simulasi komputasi. Dalam proses ini, AI dapat digunakan untuk mengidentifikasi target obat baru, melakukan *virtual screening*, memprediksi interaksi obat-target, merancang molekul kandidat, memperkirakan toksisitas, serta mendukung *drug repurposing* atau penggunaan ulang obat lama untuk indikasi baru. Peran utamanya bukan menggantikan seluruh proses pengembangan obat, melainkan mempercepat tahap awal riset sebelum kandidat terapi masuk ke uji praklinis dan klinis.

Ferreira dan Carneiro (2025) menyebutkan bahwa kemajuan AI dan *machine learning* telah digunakan di berbagai bagian rantai penemuan obat, mulai dari identifikasi target hingga pengembangan klinis. Dalam praktik riset, AI membantu peneliti menyaring banyak senyawa secara lebih efisien, memprioritaskan kandidat yang menjanjikan, dan mengurangi ketergantungan pada proses coba-coba yang mahal. Teknologi ini juga dapat mendukung prediksi ADMET, yaitu absorpsi, distribusi, metabolisme, ekskresi, dan toksisitas, yang penting untuk menilai kelayakan kandidat obat.

Istilah “revolusi” tetap perlu dipahami secara proporsional. AI dapat mempercepat riset tahap awal, tetapi tidak membuat obat baru langsung siap digunakan pada pasien. Setiap kandidat obat masih harus melewati validasi laboratorium, uji pada hewan bila diperlukan, uji klinis bertahap, evaluasi keamanan, penilaian efektivitas, dan persetujuan regulator.

Dengan demikian, *drug discovery in-silico* sebaiknya diposisikan sebagai akselerator ilmiah, bukan jalan pintas yang menghilangkan standar pembuktian klinis.

11.3.4 Terapi Bertarget pada Onkologi dan Penyakit Langka

Onkologi merupakan salah satu bidang yang paling menonjol dalam perkembangan kedokteran presisi. Kanker tidak lagi hanya dipahami berdasarkan lokasi organ, tetapi juga melalui profil molekuler, mutasi genetik, ekspresi protein, biomarker, dan karakteristik mikro-lingkungan tumor. AI dapat membantu mengintegrasikan data tersebut untuk mendukung stratifikasi pasien, prediksi respons terapi, dan pemilihan terapi bertarget. Dengan pendekatan ini, tenaga kesehatan berpotensi menentukan pasien yang lebih mungkin merespons imunoterapi, terapi target molekuler, atau kombinasi terapi tertentu.

Selain data genomik, AI juga dapat mendukung pengembangan biomarker berbasis citra, patologi digital, rekam medis elektronik, dan data multimodal lain. Ligerio *et al.* (2025) menjelaskan bahwa biomarker berbasis AI berpotensi mendukung keputusan terapi kanker melalui integrasi patologi, radiologi, dan data klinis. Penerapannya, bagaimanapun, memerlukan validasi berskala besar, uji prospektif, serta evaluasi mediko-ekonomi sebelum dapat digunakan secara rutin. Catatan ini penting karena *precision oncology* bukan hanya persoalan kecanggihan prediksi, tetapi juga berkaitan dengan akses, biaya, keadilan, dan bukti manfaat klinis.

Peluang serupa juga muncul pada penyakit langka. Kelompok penyakit ini sering sulit didiagnosis karena jumlah kasus sedikit, gejala bervariasi, dan pengetahuan klinis tersebar. Hong *et al.* (2024) menjelaskan bahwa genomik, *big data*, AI, dan *machine learning* semakin berperan dalam riset penyakit langka, termasuk identifikasi varian penyebab penyakit dan implikasi

terapi presisi. AI dapat membantu mencocokkan pola genetik dan klinis pasien dengan basis data penyakit langka, mempercepat pencarian diagnosis, serta mendukung pengembangan terapi yang lebih spesifik.

Walaupun potensinya besar, terapi bertarget masih menghadapi berbagai hambatan. Biaya pemeriksaan molekuler, akses laboratorium genomik, ketersediaan obat, representasi populasi dalam dataset, dan validasi lintas kelompok pasien tetap menjadi tantangan penting. Oleh karena itu, masa depan *precision medicine* berbasis AI perlu diarahkan bukan hanya pada kemampuan teknis untuk memprediksi terapi, tetapi juga pada pembangunan sistem yang memastikan manfaatnya dapat diakses secara adil, aman, dan bertanggung jawab.

11.4 AI dan *Sustainability* Sistem Kesehatan

Keberlanjutan sistem kesehatan masa depan tidak hanya ditentukan oleh kemampuan layanan menjadi lebih cepat dan canggih, tetapi juga oleh kemampuannya bertahan secara lingkungan, ekonomi, dan logistik. Sistem kesehatan menghadapi tekanan jangka panjang berupa peningkatan beban penyakit kronis, populasi menua, kenaikan biaya layanan, krisis iklim, serta gangguan rantai pasok obat dan alat kesehatan. Di tengah tekanan tersebut, AI dapat berperan sebagai teknologi pendukung untuk merancang sistem kesehatan yang lebih adaptif, hemat sumber daya, dan tangguh.

Namun, kontribusi AI terhadap keberlanjutan perlu dilihat secara seimbang. Di satu sisi, AI dapat membantu fasilitas dan sistem kesehatan mengelola sumber daya secara lebih efisien. Di sisi lain, pengembangan AI juga membutuhkan energi, infrastruktur komputasi, perangkat keras, dan tata kelola data

yang tidak selalu murah atau ramah lingkungan. Karena itu, hubungan antara AI dan *sustainability* bersifat timbal balik: AI dapat mendukung keberlanjutan sistem kesehatan, tetapi AI itu sendiri juga harus dikembangkan secara berkelanjutan.

11.4.1 *Green AI* dan Keberlanjutan Lingkungan Kesehatan

Green AI dalam pelayanan kesehatan merujuk pada pengembangan dan penggunaan sistem AI yang memperhatikan efisiensi energi, jejak karbon, kebutuhan perangkat keras, serta dampak lingkungan dari infrastruktur digital. Isu ini menjadi penting karena sektor kesehatan juga memiliki kontribusi terhadap emisi karbon. Keil *et al.* (2024) menunjukkan bahwa sistem kesehatan berkontribusi secara bermakna terhadap emisi karbon nasional, sementara OECD (2025) memperkirakan bahwa sektor kesehatan menyumbang sekitar 4,4% emisi gas rumah kaca di negara-negara OECD pada 2018.

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, pengembangan AI kesehatan masa depan tidak cukup hanya mengejar akurasi. Efisiensi komputasi juga perlu menjadi bagian dari desain teknologi. Model AI yang terlalu besar, boros energi, dan bergantung pada pusat data berkapasitas tinggi dapat menambah beban lingkungan apabila tidak dirancang dengan prinsip keberlanjutan. Upaya menuju *green and efficient AI* dapat dilakukan melalui arsitektur model yang lebih ringan, kompresi model, perangkat keras hemat energi, serta pemanfaatan energi terbarukan pada infrastruktur komputasi.

Pada tingkat fasilitas, AI juga dapat membantu mengurangi pemborosan sumber daya. Contohnya meliputi prediksi kebutuhan energi rumah sakit, pengaturan penggunaan listrik, optimasi penggunaan alat medis, serta pengurangan limbah akibat stok yang tidak terpakai. WHO (2020) menekankan bahwa fasilitas kesehatan berkelanjutan perlu mengoptimalkan

konsumsi air, energi, dan makanan; mengurangi emisi; mengelola limbah; serta menerapkan pengadaan yang ramah lingkungan. Dengan arah tersebut, AI dapat mendukung pengelolaan fasilitas kesehatan yang lebih hemat energi dan rendah limbah, selama penerapannya tetap mempertimbangkan biaya, keamanan, dan kesiapan infrastruktur.

11.4.2 Keberlanjutan Makro-Ekonomi Kesehatan

Selain tantangan lingkungan, sistem kesehatan juga menghadapi tekanan pembiayaan yang semakin kompleks. Kenaikan biaya layanan, peningkatan penyakit kronis, kebutuhan teknologi baru, dan perubahan demografi dapat memberi beban besar pada anggaran kesehatan. OECD (2024) mencatat bahwa sebelum pandemi COVID-19, belanja kesehatan per kapita di negara-negara OECD tumbuh rata-rata 2,6% per tahun, kemudian meningkat menjadi 3,3% per tahun pada periode 2019 sampai 2022. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberlanjutan pembiayaan menjadi isu strategis ketika sistem kesehatan harus tetap menyediakan layanan bermutu di tengah keterbatasan sumber daya.

Dalam ranah makro-ekonomi, AI berpotensi mendukung perencanaan kesehatan berbasis data. Analisis terhadap tren penyakit, pola penggunaan layanan, kebutuhan obat, distribusi tenaga kesehatan, dan risiko rawat inap dapat membantu pembuat kebijakan memperkirakan kebutuhan sumber daya jangka panjang. AI juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi *low-value care*, yaitu tindakan yang menggunakan sumber daya tetapi memberikan manfaat klinis terbatas. OECD (2025) menekankan bahwa pengurangan perawatan yang tidak tepat dapat meningkatkan kinerja sistem kesehatan sekaligus mengurangi emisi dan pemborosan sumber daya.

Walaupun demikian, pemanfaatan AI untuk efisiensi ekonomi tidak boleh diarahkan semata-mata pada penghematan biaya. Prediksi biaya, risiko, atau penggunaan layanan perlu dikombinasikan dengan prinsip keadilan, keselamatan, dan akses. Efisiensi yang dihasilkan AI seharusnya memperkuat mutu layanan, bukan mengurangi hak pasien untuk memperoleh pelayanan yang diperlukan. Dengan demikian, AI dapat membantu sistem kesehatan menjadi lebih hemat dan terencana, tetapi tetap harus berorientasi pada keselamatan pasien dan nilai klinis.

11.4.3 Ketahanan Rantai Pasok Medis

Ketahanan rantai pasok medis menjadi pelajaran penting dari berbagai krisis kesehatan global. Kelangkaan obat, vaksin, alat pelindung diri, reagen laboratorium, dan alat kesehatan dapat mengganggu pelayanan bahkan ketika tenaga kesehatan dan fasilitas tersedia. Pada masa depan, AI dapat digunakan untuk memperkirakan kebutuhan, mendeteksi potensi kelangkaan, memantau pola distribusi, dan mengoptimalkan logistik kesehatan. Sistem prediktif semacam ini dapat membantu rumah sakit, pemerintah, dan produsen memperkirakan kebutuhan stok berdasarkan pola pemakaian, kapasitas fasilitas, serta potensi gangguan distribusi.

Peran AI dalam rantai pasok juga mencakup analisis risiko. Sistem berbasis data dapat membantu mengidentifikasi ketergantungan pada satu pemasok, memetakan titik rawan distribusi, serta memperkirakan dampak bencana, krisis geopolitik, atau lonjakan permintaan. OECD (2024) menegaskan bahwa penguatan rantai pasok medis membutuhkan informasi yang lebih baik untuk mengantisipasi dan mencegah kekurangan pasokan obat maupun alat kesehatan. Dalam hal ini, AI dapat

membantu membaca sinyal risiko lebih cepat dan mendukung keputusan logistik yang lebih responsif.

Akan tetapi, bukti penggunaan AI dalam rantai pasok kesehatan masih perlu diperkuat. Espinosa *et al.* (2026) menemukan bahwa penerapan AI dalam *healthcare supply chain management* masih relatif terbatas, dan banyak studi masih bersifat teoritis atau berbasis simulasi. Oleh karena itu, potensi AI untuk memperkuat ketahanan rantai pasok medis perlu diikuti dengan validasi operasional, integrasi data antarlembaga, standar interoperabilitas, dan tata kelola yang jelas.

Secara keseluruhan, AI dan *sustainability* sistem kesehatan perlu dipahami sebagai hubungan yang saling memengaruhi. AI dapat membantu sistem kesehatan menjadi lebih hemat sumber daya, tangguh secara ekonomi, dan responsif terhadap gangguan logistik. Namun, pengembangan AI itu sendiri harus tetap efisien, transparan, dan bertanggung jawab agar tidak menambah beban lingkungan maupun memperbesar ketimpangan akses.

11.5 Peluang Riset dan Pengembangan AI Kesehatan

Masa depan AI dalam pelayanan kesehatan tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan model, tetapi juga oleh arah riset yang mampu menjawab kebutuhan klinis, sosial, dan sistemik. Setelah AI digunakan untuk mendukung diagnosis, prediksi risiko, dokumentasi, dan manajemen layanan, agenda berikutnya adalah membangun sistem yang lebih dapat dijelaskan, aman, hemat sumber daya, kolaboratif, dan sesuai dengan konteks lokal.

Riset AI kesehatan tidak cukup hanya mengejar akurasi. Kepercayaan klinis, validasi lintas populasi, interoperabilitas, tata kelola data, dan kesiapan penerapan di dunia nyata juga perlu menjadi perhatian utama. Bürger *et al.* (2024) menekankan

bahwa kesenjangan translasi AI kesehatan sering terjadi karena konsep AI yang “dapat dipercaya” belum selalu diterjemahkan menjadi proses implementasi yang konkret. Dengan demikian, peluang riset ke depan perlu diarahkan pada pengembangan AI yang tidak hanya cerdas secara teknis, tetapi juga aman, dapat diawasi, dan relevan dengan kebutuhan pelayanan.

11.5.1 *Explainable AI* untuk Kepercayaan Klinis

Explainable Artificial Intelligence (XAI) merupakan pendekatan untuk membuat proses atau keluaran AI lebih dapat dipahami oleh manusia. Dalam pelayanan kesehatan, XAI menjadi penting karena keputusan klinis tidak cukup hanya menghasilkan prediksi. Tenaga kesehatan juga memerlukan alasan yang dapat ditelaah, terutama ketika hasil AI digunakan untuk mendukung diagnosis, terapi, atau penilaian risiko.

Sistem AI idealnya dapat menunjukkan faktor klinis yang berkontribusi terhadap suatu prediksi, batas ketidakpastian, serta kondisi yang membuat rekomendasi perlu ditinjau ulang. Rosenbacke *et al.* (2024) menemukan bahwa XAI dapat meningkatkan atau menurunkan kepercayaan klinisi, bergantung pada kualitas penjelasan yang diberikan. Penjelasan yang jelas dan relevan dapat mendukung kepercayaan, sedangkan penjelasan yang rumit atau tidak sesuai kebutuhan klinis justru dapat menimbulkan kebingungan.

Tujuan XAI bukan membuat klinisi percaya secara buta pada AI, melainkan membangun kepercayaan yang proporsional. Dalam kerangka *human-in-the-loop*, XAI membantu tenaga kesehatan mengawasi, mengaudit, dan mempertanggungjawabkan keputusan yang dibantu oleh sistem AI. Dengan cara ini, penjelasan tidak hanya menjadi fitur teknis, tetapi juga bagian dari keselamatan pasien dan akuntabilitas profesional.

11.5.2 Medical Foundation Models dan Prospek Generalist Medical AI

Salah satu arah besar riset AI kesehatan adalah pengembangan *medical foundation models*, yaitu model AI berskala besar yang dilatih pada data kesehatan beragam dan dapat digunakan untuk berbagai tugas medis. Berbeda dari *narrow AI* yang dirancang untuk satu tugas tertentu, model ini berpotensi memahami teks klinis, citra medis, data laboratorium, genomik, sinyal biologis, dan rekam medis elektronik dalam satu kerangka analisis.

Moor *et al.* (2023) menjelaskan bahwa *Generalist Medical AI* berpotensi menginterpretasikan berbagai modalitas data medis dan menghasilkan keluaran seperti penjelasan teks, anotasi gambar, atau rekomendasi berbasis penalaran medis. Potensi ini membuka peluang bagi sistem AI yang lebih fleksibel dan mampu membantu berbagai kebutuhan klinis, mulai dari dokumentasi, triase, interpretasi data, hingga dukungan pengambilan keputusan.

Walaupun menjanjikan, *medical foundation models* belum dapat dianggap sebagai solusi siap pakai untuk seluruh layanan kesehatan. WHO (2025) menekankan bahwa *large multi-modal models* berpotensi digunakan dalam layanan kesehatan dan riset, tetapi belum sepenuhnya terbukti aman dan dapat diandalkan untuk berbagai tujuan. Oleh karena itu, model ini dapat menjadi infrastruktur penting bagi AI kesehatan masa depan, tetapi tetap memerlukan validasi klinis, evaluasi bias, tata kelola data, dan pengawasan manusia.

11.5.3 Federated Learning Lintas Negara

Federated learning merupakan pendekatan pelatihan AI yang memungkinkan beberapa institusi membangun model bersama tanpa memindahkan data mentah pasien ke satu pusat

data. Cara kerja ini penting karena data kesehatan bersifat sensitif, terlindungi oleh regulasi, dan sering tersebar di banyak rumah sakit, laboratorium, atau negara. Melalui *federated learning*, model dilatih secara lokal di masing-masing institusi, kemudian pembaruan model digabungkan untuk membentuk model bersama.

Peluang riset lintas negara cukup besar karena metode ini memungkinkan model belajar dari keragaman populasi tanpa membuka data mentah pasien. Dengan demikian, rumah sakit atau lembaga kesehatan dari berbagai wilayah dapat berkolaborasi dalam pengembangan AI, sekaligus menjaga privasi data. Kumar *et al.* (2025) menunjukkan bahwa *federated learning* menjanjikan perlindungan privasi, tetapi masih menghadapi tantangan berupa heterogenitas data, keamanan, kepatuhan regulasi, biaya komputasi, dan skalabilitas.

Agar dapat diterapkan secara luas, *federated learning* membutuhkan lebih dari sekadar kesiapan teknis. Standar data, interoperabilitas, tata kelola kolaborasi, mekanisme audit, dan validasi model lintas populasi perlu dibangun sejak awal. Tanpa fondasi tersebut, model bersama yang dihasilkan tetap berisiko bias, sulit dievaluasi, atau tidak sesuai dengan kebutuhan klinis di berbagai wilayah.

11.5.4 Edge AI dan Model Ringan untuk Layanan Terbatas Sumber Daya

Edge AI memungkinkan pemrosesan AI dilakukan dekat dengan sumber data, misalnya pada *smartphone*, perangkat portabel, alat diagnostik sederhana, atau perangkat *Internet of Medical Things* (IoMT). Rocha *et al.* (2024) menjelaskan bahwa *Edge AI* membawa komputasi lebih dekat ke perangkat IoMT dan pengguna, sehingga mendukung aplikasi yang membutuhkan respons cepat, perlindungan data, dan efisiensi jaringan.

Dalam layanan terbatas sumber daya, teknologi ini dapat membantu fasilitas kesehatan di daerah terpencil, kepulauan, atau wilayah dengan koneksi internet yang tidak stabil. Model AI yang ringan, hemat daya, dan dapat berjalan secara *offline* atau dengan koneksi *low-bandwidth* berpotensi mendukung skrining awal, triase, dan pengolahan data dasar. Pemrosesan di perangkat lokal juga dapat mengurangi ketergantungan pada pusat data dan mempercepat respons pada situasi klinis tertentu.

Model ringan, bagaimanapun, tidak boleh dipahami sebagai model yang boleh kurang tervalidasi. *Edge AI* tetap membutuhkan standar keselamatan, pembaruan model, keamanan perangkat, batas penggunaan, dan mekanisme rujukan manusia. Dengan kata lain, keterbatasan infrastruktur tidak boleh menjadi alasan untuk menurunkan standar mutu dan keselamatan pasien.

11.5.5 Dataset Lokal dan AI yang Kontekstual

AI kesehatan memerlukan data yang representatif. Jika model hanya dilatih pada populasi tertentu, kinerjanya dapat menurun ketika diterapkan pada populasi lain yang berbeda secara klinis, genetik, sosial, bahasa, atau lingkungan. Marko *et al.* (2025) menunjukkan bahwa AI pada populasi beragam dapat menghasilkan disparitas apabila kelompok tertentu kurang terwakili dalam data pelatihan.

Dataset lokal menjadi agenda penting, terutama bagi negara berkembang. Data yang digunakan untuk membangun AI kesehatan perlu mencakup variasi usia, jenis kelamin, wilayah geografis, etnis, kondisi sosial ekonomi, bahasa, jenis fasilitas kesehatan, serta pola penyakit lokal. Dengan cakupan yang lebih luas, model AI dapat lebih sesuai dengan karakteristik populasi tempat teknologi tersebut akan digunakan.

Dalam konteks Indonesia, kebutuhan ini mencakup pengembangan data bahasa Indonesia, citra medis lokal, data genomik yang representatif, serta dokumentasi klinis dari berbagai tingkat fasilitas kesehatan. Pengembangan dataset tersebut perlu disertai tata kelola yang kuat, termasuk keamanan data, anonimisasi, kualitas metadata, izin penggunaan, serta mekanisme audit. Dengan fondasi data yang lebih kontekstual, AI kesehatan dapat berkembang tidak hanya sebagai teknologi impor, tetapi juga sebagai inovasi yang relevan dengan kebutuhan lokal.

11.5.6 Kolaborasi Riset Interdisipliner

Pengembangan AI kesehatan tidak dapat dilakukan oleh satu disiplin ilmu saja. Teknologi ini membutuhkan kolaborasi antara klinisi, ilmuwan komputer, ahli biostatistik, bioinformatikawan, ahli kesehatan masyarakat, ahli etik, regulator, industri, pasien, dan pembuat kebijakan. Kolaborasi tersebut penting sejak tahap perumusan masalah agar AI yang dikembangkan benar-benar menjawab kebutuhan pelayanan, bukan sekadar menunjukkan kecanggihan teknis.

Stogiannos *et al.* (2024) menekankan bahwa implementasi AI kesehatan memerlukan pendekatan multidisipliner karena berkaitan dengan alur kerja, keselamatan, regulasi, pendidikan tenaga kesehatan, teknologi, dan penerimaan pasien. Artinya, keberhasilan AI tidak hanya ditentukan oleh performa algoritma, tetapi juga oleh kesesuaiannya dengan alur pelayanan, kesiapan tenaga kesehatan, dan kepercayaan pengguna.

Dengan kolaborasi yang kuat, AI kesehatan masa depan dapat berkembang sebagai bagian dari sistem pelayanan yang aman, inklusif, dan manusiawi. Riset interdisipliner juga membantu memastikan bahwa inovasi AI tidak berhenti pada publikasi atau prototipe, tetapi dapat diterjemahkan menjadi

solusi yang bermanfaat, dapat diterapkan, dan bertanggung jawab.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, J., Adler, J., Dunger, J., Evans, R., Green, T., Pritzel, A., Ronneberger, O., Willmore, L., Ballard, A. J., Bambrick, J., Bodenstein, S. W., Evans, D. A., Hung, C.-C., O'Neill, M., Reiman, D., Tunyasuvunakool, K., Wu, Z., Žídek, A., Bapst, V., ... Jumper, J. M. (2024). Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3. *Nature*, 630, 493–500. doi:10.1038/s41586-024-07487-w
- Bürger, V. K., Amann, J., Bui, C. K. T., Fehr, J., & Madai, V. I. (2024). The unmet promise of trustworthy AI in healthcare: Why we fail at clinical translation. *Frontiers in Digital Health*, 6, 1279629. doi:10.3389/fdgth.2024.1279629
- Drummond, D., & Gonsard, A. (2024). Definitions and characteristics of patient digital twins being developed for clinical use: Scoping review. *Journal of Medical Internet Research*, 26, e58504. doi:10.2196/58504
- Espinosa, O., Basto, S., Ordóñez, A., Arias, M.-L., Sepúlveda, D., & Bhutta, M. F. (2026). A review of artificial intelligence in healthcare supply chains: Untapped potential? *BMC Health Services Research*. doi:10.1186/s12913-026-14559-2
- Ferreira, F. J. N., & Carneiro, A. S. (2025). AI-driven drug discovery: A comprehensive review. *ACS Omega*, 10(23), 23889–23903. doi:10.1021/acsomega.5c00549
- Haripriya, R., Khare, N., & Pandey, M. (2025). Privacy-preserving federated learning for collaborative medical data mining in multi-institutional settings. *Scientific Reports*, 15, 12482. doi:10.1038/s41598-025-97565-4
- Hong, J., Lee, D., Hwang, A., Kim, T., Ryu, H.-Y., & Choi, J. (2024). Rare disease genomics and precision medicine. *Genomics & Informatics*, 22, 28. doi:10.1186/s44342-024-00032-1
- Katsoulakis, E., Wang, Q., Wu, H., Shahriyari, L., Fletcher, R., Liu, J., Achenie, L., Liu, H., Jackson, P., Xiao, Y., Syeda-Mahmood, T., Tuli, R., & Deng, J. (2024). Digital twins for health: A scoping

- review. *npj Digital Medicine*, 7, 77. doi:10.1038/s41746-024-01073-0
- Keil, M., Frehse, L., Hagemeister, M., Knieß, M., Lange, O., Kronenberg, T., & Rogowski, W. (2024). Carbon footprint of healthcare systems: A systematic review of evidence and methods. *BMJ Open*, 14(4), e078464. doi:10.1136/bmjopen-2023-078464
- Kumar, K. A. S., Nelson, L., & Jibinsingh, B. R. (2025). Systematic review of privacy-preserving federated learning in decentralized healthcare systems. *Franklin Open*, 13, 100440. doi:10.1016/j.fraope.2025.100440
- Ligero, M., El Nahhas, O. S. M., Aldea, M., & Kather, J. N. (2025). Artificial intelligence-based biomarkers for treatment decisions in oncology. *Trends in Cancer*, 11(3), 232–244. doi:10.1016/j.trecan.2024.12.001
- Marko, J. G. O., Neagu, C. D., & Anand, P. B. (2025). Examining inclusivity: The use of AI and diverse populations in health and social care: A systematic review. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 25, 57. doi:10.1186/s12911-025-02884-1
- Matheny, M., Israni, S. T., Ahmed, M., & Whicher, D. (Eds.). (2022). Artificial intelligence in health care: The hope, the hype, the promise, the peril. National Academy of Medicine. doi:10.17226/27111
- Moor, M., Banerjee, O., Abad, Z. S. H., Krumholz, H. M., Leskovec, J., Topol, E. J., & Rajpurkar, P. (2023). Foundation models for generalist medical artificial intelligence. *Nature*, 616, 259–265. doi:10.1038/s41586-023-05881-4
- Nassir, N., Hashmi, M. A., Raji, K. G., Jamalalail, B., Maksymowsky, A., Scherer, S. W., Alsheikh-Ali, A., & Uddin, M. (2025). Quantum computing and the implementation of precision medicine. *npj Genomic Medicine*, 10, 80. doi:10.1038/s41525-025-00537-w

- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). Securing medical supply chains in a post-pandemic world. OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). Society at a glance 2024: OECD social indicators. OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2025). Decarbonising health systems across OECD countries. OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2026). Scaling artificial intelligence in health. OECD Publishing.
- Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O., & Topol, E. J. (2022). AI in health and medicine. *Nature Medicine*, 28, 31–38. doi:10.1038/s41591-021-01614-0
- Rocha, A., Monteiro, M., Mattos, C., Dias, M., Soares, J., Magalhães, R., & Macedo, J. (2024). Edge AI for Internet of Medical Things: A literature review. *Computers and Electrical Engineering*, 116, 109202. doi:10.1016/j.compeleceng.2024.109202
- Rosenbacke, R., Melhus, Å., McKee, M., & Stuckler, D. (2024). How explainable artificial intelligence can increase or decrease clinicians' trust in AI applications in health care: Systematic review. *JMIR AI*, 3, e53207. doi:10.2196/53207
- Stogiannos, N., Gillan, C., Precht, H., dos Reis, C. S., Kumar, A., O'Regan, T., Ellis, V., Barnes, A., Meades, R., Pogose, M., Greggio, J., Scurr, E., Kumar, S., King, G., Rosewarne, D., Jones, C., van Leeuwen, K. G., Hyde, E., Beardmore, C., Allende, J. G., *et al.* (2024). A multidisciplinary team and multiagency approach for AI implementation: A commentary for medical imaging and radiotherapy key stakeholders. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 55(4), 101717. doi:10.1016/j.jmir.2024.101717

- Subbiah, V. (2023). The next generation of evidence-based medicine. *Nature Medicine*, 29, 49–58. doi:10.1038/s41591-022-02160-z
- Tang, X., Dai, H., Knight, R., & Gerstein, M. (2024). A survey of generative AI for de novo drug design: New frontiers in molecule and protein generation. *Briefings in Bioinformatics*, 25(4), bbae338. doi:10.1093/bib/bbae338
- Watson, J. L., Juergens, D., Bennett, N. R., Trippe, B. L., Yim, J., Eisenach, H. E., Ahern, W., Borst, A. J., Ragotte, R. J., Milles, L. F., Wicky, B. I. M., Hanikel, N., Pellock, S. J., Courbet, A., Sheffler, W., Wang, J., Venkatesh, P., Sappington, I., Torres, S. V., ... Baker, D. (2023). De novo design of protein structure and function with RFdiffusion. *Nature*, 620, 1089–1100. doi:10.1038/s41586-023-06415-8
- Welzel, C., Ertaylan, G., Babina, I. S., & Gilbert, S. (2026). Regulating complexity in AI-enabled omics and multi-omics technologies for precision medicine. *npj Digital Medicine*, 9, 247. doi:10.1038/s41746-026-02553-1
- Willett, F. R., Kunz, E. M., Fan, C., Avansino, D. T., Wilson, G. H., Choi, E. Y., Kamdar, F., Glasser, M. F., Hochberg, L. R., Druckmann, S., Shenoy, K. V., & Henderson, J. M. (2023). A high-performance speech neuroprosthesis. *Nature*, 620, 1031–1036. doi:10.1038/s41586-023-06377-x
- World Health Organization. (2020). WHO guidance for climate-resilient and environmentally sustainable health care facilities. World Health Organization.
- World Health Organization. (2021). Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance. World Health Organization.
- World Health Organization. (2025). Ethics and governance of artificial intelligence for health: Guidance on large multi-modal models. World Health Organization.

Zack, M., Stupichev, D. N., Moore, A. J., Slobodchikov, I. D., Sokolov, D. G., Trifonov, I. F., & Gobbs, A. (2025). Artificial intelligence and multi-omics in pharmacogenomics: A new era of precision medicine. *Mayo Clinic Proceedings: Digital Health*, 3(3), 100246. doi:10.1016/

BIODATA PENULIS



Melda Emilya, SKM.,MKM.

Lahir di Ulak Pandan, 20 Juli 1988. Penulis menyelesaikan pendidikan S2 dengan Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat di Universitas Sriwijaya Palembang tahun 2022. Penulis mengawali karirnya pada tahun 2014 sebagai Praktisi di RS. Bunda Palembang sampai dengan tahun 2022. Kemudian, mengabdikan diri di dunia pendidikan dengan bergabung di Akademi Kebidanan Budi Mulia Jambi pada tahun 2025. Penulis aktif dalam berbagai kegiatan Tridharma Perguruan Tinggi yaitu mengajar, penelitian, dan pengabdian Masyarakat. Sebagai pengembangan diri, penulis juga sering melakukan publikasi, conference nasional dan internasional, serta menulis buku. Salah satu bookchapter karya penulis berjudul **“ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM INOVASI PELAYANAN KESEHATAN”** sebagai penulis BAB 1 yang berjudul **“KONSEP DASAR ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM KESEHATAN”** berkolaborasi dengan 10 penulis lainnya.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: meldaemilya.me88@gmail.com.



Dewi Junita Lamtumiari, SKM, S.Keb, M.Kes

Lahir di Jambi, 22 Juni 1986. Pendidikan tinggi yang telah ditempuh oleh penulis yaitu jenjang S1 pada Program Studi Kesehatan Masyarakat, Universitas Prima Indonesia Medan tahun 2010, kemudian melanjutkan pendidikan S2 pada Universitas Kader Bangsa Palembang dan lulus pada tahun 2014.

Riwayat pekerjaan diawali pada tahun 2010 bekerja di STIKes Prima Jambi sampai dengan Agustus 2014, kemudian September 2014 sampai dengan Agustus 2016 bekerja di Akademi Kebidanan Cipto Medan. Saat ini penulis bekerja di Akademi Kebidanan Budi Mulia Jambi mengampu mata kuliah Kesehatan Masyarakat. Penulis aktif dalam berbagai kegiatan Tridharma Perguruan Tinggi yaitu sebagai penulis buku, publikasi, seminar.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:
dewijunita86@gmail.com

Motto: “Semakin Tinggi Ilmuku Maka Semakin Cepat Aku Mengukur Kebodohanku.”



**Zanedta Novenathania Putri Nugraha,
S.Ked.**

Penulis lahir di Pemalang, 3 November 2003. Komitmen penulis dalam bidang medis dan kesehatan dibuktikan dengan menempuh pendidikan tinggi S1 di Fakultas Kedokteran, Kesehatan Masyarakat, dan Keperawatan Universitas Gadjah Mada hingga menyelesaikan studinya pada tahun 2026. Selama masa studi, penulis aktif dalam kegiatan akademik, organisasi, serta memperoleh kesempatan sebagai mahasiswi terpilih dari Universitas Gadjah Mada untuk menerima program beasiswa prestasi. Saat ini penulis melanjutkan Pendidikan profesi (kepaniteraan klinik) di rumah sakit jejaring Universitas Gadjah Mada. Penulis memiliki ketertarikan pada bidang bedah dan penelitian klinis.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:
nedtanovena@gmail.com



Anindya Salsabila Dwinanda, S.Tr.Kes, lahir di Bandung pada 30 Juni 2003. Ia merupakan lulusan Sarjana Terapan Teknologi Laboratorium Medis dengan ketertarikan pada bioinformatika yang berkembang sejak masa perkuliahan. Minat tersebut semakin mendalam melalui

penelitian *in silico* mengenai analisis aktivitas senyawa antibakteri terhadap resistensi *Salmonella typhi*.

Saat ini, Anindya memulai kariernya sebagai Junior Researcher di Institute of Bioinformatics Indonesia (INBIO), dengan fokus pada analisis RNA-seq sampel penderita tuberkulosis dari berbagai etnis di dunia. Selain itu, ia juga aktif sebagai Scientific Writer di platform Generasi Peneliti.

Keterlibatannya dalam dunia kepenulisan dimulai saat ia menjadi awardee beasiswa Rubin.id yang disponsori Bio Farma. Di sana ia mulai menulis artikel populer mengenai isu kesehatan, pengembangan diri, dan sosial. Pengalaman menulisnya terus berlanjut hingga berkontribusi dalam penulisan book chapter pertamanya. Kontribusinya dalam penulisan bab berjudul "**Peran Artificial Intelligence dalam Laboratorium Diagnostik**" merupakan bagian dari dedikasinya untuk mendukung perkembangan teknologi kesehatan dan inovasi pelayanan laboratorium di Indonesia.

Email: anindyasalsabilad@gmail.com



Ida Mahfiroh, S.K.M

Penulis lahir di Semarang pada 5 Desember 1993. Bernama lengkap Ida Mahfiroh, ia merupakan anak pertama dari tiga bersaudara yang kini menetap di Surabaya. Penulis berprofesi sebagai Aparatur Sipil Negara (ASN) di Dinas Kesehatan Provinsi Jawa Timur, dengan fokus di bidang kesehatan masyarakat.

Dunia yang ia geluti tak lepas dari kepedulian terhadap sesama — Ida berkecimpung di bidang kesehatan masyarakat dan pemberdayaan masyarakat, sebuah ladang pengabdian yang selaras dengan nilai-nilai yang ia pegang. Di luar tugasnya sebagai abdi negara, Ida adalah sosok yang hangat dan penuh semangat. Ia mengisi waktu luangnya dengan membaca dan menjelajahi berbagai destinasi wisata (*travelling*). Penulis memiliki ketertarikan pada bidang Kesehatan, promosi Kesehatan dan pemberdayaan Masyarakat. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: iddamahfiroh@gmail.com



Deni Candra Ramadhan, S.Kep., Ners., M.Kep Akademisi dan Praktisi Keperawatan

Penulis merupakan akademisi dan praktisi keperawatan yang lahir di Tasikmalaya pada 6 Desember 1999. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Keperawatan pada tahun 2022 dan Pendidikan Profesi Ners pada tahun 2023. Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan Magister Keperawatan dengan peminatan Keperawatan Medikal Bedah dan menyelesaikannya pada tahun 2026.

Saat ini, penulis aktif dalam bidang kepenulisan buku dan artikel ilmiah, khususnya pada kajian penyakit ginjal kronik dan keperawatan medikal bedah. Melalui latar belakang pendidikan, pengalaman akademik, dan aktivitas kepenulisan yang dimiliki, penulis berharap dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan pendidikan keperawatan di Indonesia. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: denicandraramadhan123@gmail.com



dr. Azmi Aziz Nur Arraga

Penulis lahir di Kediri, 18 Oktober 1997. Lulusan profesi dan S1 di Fakultas Kedokteran, Universitas Brawijaya tahun 2022. Saat ini aktif sebagai klinisi dokter umum di IGD RSUD Simpang Lima Gumul Kabupaten Kediri. Selain berpraktik, penulis juga aktif dalam kegiatan volunteer, salah satunya adalah menjadi relawan Bakti Deteksi Dini Penyakit Katastropik Kepulauan Rumah Sakit Terapung Ksatria Airlangga di Pulau Mandangin, Kabupaten Sampang, Madura. Penulis juga aktif menjadi pemateri kegawatan, petugas medis tim sepak bola PERSIK Kediri, dan acara bakti sosial lainnya. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya dan mengikuti berbagai kepanitiaan internal fakultas, penulis juga pernah menjuarai lomba poster publik di FK USU Medan. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: azmiazizna@student.ub.ac.id / arragaazmi@gmail.com

apt. Salsabiela Milenia Putri



Penulis lahir di Pontianak, 29 Januari 2001. Lulusan profesi dan S1 di Fakultas Farmasi, Universitas Gadjah Mada tahun 2024. Saat ini aktif sebagai Apoteker bagian Departemen Pemastian Mutu di PT Mulia Farma Suci Kabupaten Serang, di mana saat ini penulis memiliki pengalaman bekerja selama 1 tahun 2 bulan. Selain bekerja, penulis juga aktif dalam pekerjaan sampingan sebagai pengajar privat dalam mata pelajaran Matematika, Fisika, Kimia, dan Biologi dari jenjang SD hingga SMA, baik secara *offline* di wilayah Jabodetabek maupun *online*. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam organisasi Keluarga Mahasiswa Muslim Farmasi Universitas Gadjah Mada dan Lembaga Pers Mahasiswa Farsigama Farmasi UGM serta mengikuti berbagai kepanitiaan internal fakultas. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: salsabielamilenia@gmail.com

Nur Aliya Arsyad, S.ST., M.Keb.



merupakan seorang bidan, akademisi, dan peneliti yang lahir di Enrekang pada tahun 1989. Saat ini penulis sedang melanjutkan pendidikan Program Doktor (S3) Kedokteran di Universitas Hasanuddin. Penulis juga aktif bekerja sebagai Wakil Kepala Klinik Bagian Internal di Klinik Pratama Unhas Baraya.

Penulis memiliki minat riset pada kesehatan ibu dan anak, inflamasi, biomolekuler, herbal medicine, pelayanan kesehatan berbasis teknologi, serta pendekatan *in silico*. Aktivitas akademik

meliputi penelitian, publikasi ilmiah, pengabdian masyarakat, dan edukasi kesehatan berbasis digital.

Beberapa karya ilmiah penulis telah dipublikasikan pada jurnal nasional maupun internasional bereputasi, dengan topik yang berfokus pada kebidanan, kesehatan ibu dan anak, laktasi, anemia kehamilan, stunting, dan inovasi pelayanan kesehatan. Penulis juga aktif sebagai reviewer jurnal ilmiah di bidang kesehatan dan kebidanan.

Selain aktivitas akademik, penulis turut mengembangkan edukasi dan layanan akademik melalui Safral Institute, dengan fokus pada pendampingan penelitian, publikasi ilmiah, dan penguatan literasi akademik mahasiswa maupun tenaga kesehatan. Bagi penulis, perkembangan teknologi kesehatan harus tetap berorientasi pada nilai kemanusiaan, keselamatan pasien, dan keadilan layanan kesehatan bagi seluruh masyarakat Indonesia.

Korespondensi:

Email : aliya.research09@gmail.com

Google Scholar :

<https://scholar.google.com/citations?user=9pYYmDoAAAAJ&hl=en>

Instagram/LinkedIn : aliya_arsyad/ Nur Aliya Arsyad



Permana Juliansyah, S.Farm, Apt

Apoteker Dinas Kesehatan Kabupaten Pangkep

Penulis lahir di Bandung tanggal 4 Juli 1991, lulus Sarjana Farmasi Klinik dan Komunitas ITB tahun 2014 dan Profesi Apoteker ITB tahun 2017. Sejak Maret 2019, ia menjadi Pegawai Negeri Sipil (PNS) di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan bertugas sebagai

apoteker di Puskesmas, sebuah peran yang memberikan sudut pandang mendalam mengenai tantangan riil pelayanan obat dan edukasi kesehatan langsung di akar rumput masyarakat. Dedikasi dan kontribusi nyatanya dalam meningkatkan mutu pelayanan kesehatan primer berbuah apresiasi tertinggi, di mana ia dianugerahi penghargaan sebagai Tenaga Kesehatan (Nakes) Teladan Tingkat Nasional pada tahun 2023 oleh Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Sebagai penulis, ia aktif menyusun berbagai artikel, buku, esai akademis, hingga naskah komprehensif yang membedah disrupti teknologi di dunia medis. Fokus penulisan dan kontribusi literturnya banyak menyoroti implementasi *Health Technology Assessment* (HTA). Didorong oleh semangat digitalisasi, ia mengembangkan sebuah platform layanan telefarmasi inovatif berbasis kecerdasan buatan, menjembatani jarak pelayanan informasi obat, mengoptimalkan kepatuhan terapi pasien kronis, serta mengonversi rekam data klinis harian menjadi intervensi kesehatan yang lebih presisi, aman, dan terjangkau bagi seluruh lapisan Masyarakat.

Email Penulis: permanajuliansyah@gmail.com



Mohamad Rusdiansyah, S.Kep., Ns., M.N.Sc. lahir di Blitar pada 11 Agustus 1999. Ketertarikannya yang mendalam terhadap inovasi teknologi kesehatan dan peningkatan mutu layanan medis mendorong penulis untuk menyelesaikan studi Magister Keperawatan, dengan peminatan Keperawatan Medikal Bedah, di Universitas Gadjah Mada (UGM).

Fokus kepakaran dan minat riset (*research interest*) penulis berpusat pada persimpangan antara teknologi medis, informatika kesehatan, dan tata kelola inovasi pelayanan publik. Penulis

menaruh perhatian khusus pada isu-isu mutakhir seperti pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam transformasi klinis, *precision medicine*, etika teknologi kesehatan, serta keberlanjutan ekosistem layanan medis di era digital.

Selain aktif memublikasikan artikel ilmiah di tingkat nasional dan internasional, penulis juga memiliki rekam jejak inovasi yang solid. Salah satunya dibuktikan melalui pengembangan prototipe intervensi keperawatan berbasis AI, yang berhasil mengantarkan penulis menjadi finalis dalam ajang kompetisi nasional antarmahasiswa magister keperawatan. Penulisan Bab 10 yang berjudul "Masa Depan *Artificial Intelligence* dalam Pelayanan Kesehatan" ini merupakan wujud dedikasi penulis dalam mendorong literasi teknologi di kalangan akademisi dan praktisi kesehatan Indonesia.

Untuk diskusi lebih lanjut, kolaborasi riset, maupun jejaring profesional, penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail: mohamadrusdiansyah@gmail.com atau melalui profil LinkedIn di <https://www.linkedin.com/in/mdrusdiansyah/>.