

Teknologi Informasi Bidang Kedokteran

PENULIS:
Ilham Kurniawan



PT GHANI PRESS GROUP

Teknologi Informasi Bidang Kedokteran

Penulis:

Ilham Kurniawan

Desain Cover:

Umar Khasan

Layouter:

Tyas Dzawil Istiqomah

Editor Naskah:

dr. Prasetyaning Estu Pratiwi, Sp.PD. FINASIM

14 x 21 cm, v-149

ISBN: 978-634-04-9992-6 (Lengkap)

ISBN jilid 1: 978-634-04-9993-3

IKAPI: No. 468/JTI/2026

Diterbitkan oleh: PT GHANI PRESS GROUP

Alamat:

Bumi Permata Raya Blok 8 No. 28 Tanjung, Lamongan

HP. 0896-5710-0105

Email: ptghanipress@gmail.com

Website: <https://ghanipress.com/>

© Hak Cipta 2026 pada penulis

Sanksi Pelanggaran Pasal 113 Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- a. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- b. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- c. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- d. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga buku berjudul “Teknologi Informasi Bidang Kedokteran” ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini hadir sebagai respons terhadap transformasi digital yang pesat di sektor kesehatan, sekaligus menjawab tantangan integrasi teknologi informasi dalam praktik kedokteran modern di Indonesia.

Buku ini mengusung pendekatan integratif yang menghubungkan tiga pilar utama transformasi kesehatan digital: Big Data sebagai fondasi pengumpulan dan analisis informasi kesehatan berskala besar, Kecerdasan Buatan (AI) sebagai motor penggerak dalam diagnosis presisi dan prediksi penyakit, serta Bioinformatika sebagai jembatan antara data molekuler dan aplikasi klinis. Ketiga pilar ini disinergikan dalam kerangka praktikum kedokteran modern yang adaptif terhadap kebutuhan dan konteks ke-Indonesiaan.

Penulisan buku ini didasarkan pada kajian literatur terkini, sintesis hasil-hasil penelitian mutakhir di bidang kesehatan digital, serta refleksi penulis dari pengalaman dalam kegiatan akademik, riset, dan kolaborasi dengan berbagai pemangku kepentingan di sektor kesehatan. Buku ini disusun secara sistematis dengan harapan dapat menjadi jembatan antara teori dan praktik, serta memberikan panduan komprehensif bagi para akademisi, praktisi, dan mahasiswa dalam memahami dan mengimplementasikan teknologi informasi di bidang kedokteran.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat, mencerahkan pikiran, dan menginspirasi tindakan nyata untuk membangun sistem kesehatan Indonesia yang lebih modern, inklusif, dan berkeadilan melalui pemanfaatan teknologi informasi yang bijaksana dan beretika.

Surabaya, 24 April 2026

Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
BAB I	
Pengantar Revolusi Digital dalam Kedokteran	1
BAB II	
Transformasi Digital Kesehatan di Indonesia: Lanskap, Kebijakan, dan Tantangan	25
BAB III	
Perkembangan Digitalisasi Serta Terapannya di Berbagai Lini Pelayanan	49
BAB IV	
<i>Big Data</i> dalam Kesehatan	63
BAB V	
Bioinformatika Klinis: Memahami Bahasa Molekuler dalam Praktik Sehari-hari	81
BAB VI	
Penemuan Obat Berbasis Komputer (Computer-Aided Drug Design/CADD)	95
BAB VII	
Penerapan <i>Internet of Medical Things</i> (IOMT) dan <i>Wearable Devices</i>	109
DAFTAR PUSTAKA	131
Biodata Penulis	149



PT GHANI PRESS GROUP
Email: ptghanipress@gmail.com
Website: <https://ghanipress.com/>

BAB I

Pengantar Revolusi Digital dalam Kedokteran

Kita hidup di era di mana batas antara fiksi ilmiah dan kenyataan semakin hari semakin kabur. Sebuah pesawat tanpa pilot mampu terbang melintasi benua, mobil dapat mengemudi sendiri di tengah hiruk-pikuk kota, dan asisten virtual di genggaman tangan kita mampu menjawab pertanyaan rumit dalam sekejap. Di tengah laju inovasi ini, sektor yang paling fundamental bagi kehidupan manusia yaitu kesehatan dan kedokteran sedang mengalami transformasi yang tak kalah dramatisnya. Bayangkan seorang ahli radiologi di Jakarta yang mampu menganalisis pindaian otak pasien di Papua hanya dalam hitungan menit berkat koneksi data berkecepatan tinggi. Atau, seorang pasien diabetes yang gula darahnya terus dipantau 24 jam oleh sensor kecil di lengannya, dengan data yang langsung dikirimkan ke telepon pintarnya dan catatan dokternya. Lebih jauh lagi, bayangkan para peneliti yang mampu merancang molekul obat baru untuk penyakit langka di depan komputer, sebuah proses yang dulu memakan waktu bertahun-tahun dan miliaran dolar (Fong dkk., 2020).

Perubahan terbesar dalam kedokteran modern tidak selalu datang dari satu obat baru atau satu alat baru, melainkan dari cara kita “melihat/diagnosis” pasien: dari catatan kertas dan intuisi klinis menuju data berskala besar yang dapat dibaca mesin, dianalisis algoritma, dan dipantau hampir real-time melalui perangkat digital. Literatur kesehatan digital menunjukkan bahwa data klinis kini semakin beragam mulai dari rekam medis elektronik, pencitraan, laboratorium, hingga sinyal fisiologis dari perangkat wearable dan kebutuhan untuk memprosesnya mendorong adopsi AI/ML untuk membantu skrining, klasifikasi penyakit, dan pengambilan keputusan klinis (Gaonkar dkk., 2025; Hassan & Omenogor, 2025; Nyavor, 2025). Secara praktis, arah pergeseran ini beririsan dengan tujuan besar kedokteran kontemporer: deteksi lebih dini, terapi lebih tepat, dan pencegahan lebih proaktif, sebagaimana tercermin pada berbagai aplikasi AI di diagnostik kanker, kardiovaskular, neurologi, dan diabetes (Mehta, 2023; Nazir, 2025).

Bab ini menggambarkan transformasi tersebut seperti peralihan dari peta kertas ke GPS: peta kertas tetap benar, tetapi GPS mengubah pengalaman memadukan peta, lokasi *real-time*, prediksi kemacetan, dan rekomendasi rute. Dalam kedokteran, “GPS klinis” muncul ketika data pasien yang besar dan heterogen dapat dipetakan oleh komputasi, sehingga klinisi tidak hanya “mengobati saat sakit”, tetapi mengantisipasi risiko sebelum gejala muncul (Hassan & Omenogor, 2025; Nazir, 2025; Nyavor, 2025). Namun, beberapa literatur juga menekankan tantangan yang menyertai: privasi data, bias algoritmik, integrasi ke alur kerja klinis, dan kesenjangan akses teknologi.

Inilah gambaran dari revolusi digital dalam kedokteran. Bukan lagi sekadar tentang mesin yang membantu dokter, tetapi tentang sebuah ekosistem baru di mana data, kecerdasan buatan (AI), dan konektivitas tanpa batas berpadu untuk menciptakan layanan kesehatan yang lebih prediktif, preventif, personal, dan partisipatif. Buku ini, akan membahas “Revolusi Digital dalam Kedokteran: Dari *Big data*, AI, hingga Penemuan Obat Berbasis Komputasi”, akan mengajak Kita menyelami transformasi ini. Dengan latar belakang penulis di bidang kedokteran dan teknologi informasi, buku ini dirancang sebagai jembatan bagi para mahasiswa kedokteran, praktisi kesehatan, peneliti, hingga profesional teknologi yang ingin memahami bagaimana perubahan ini membentuk masa depan kita semua. Sebagai fondasi pemahaman kita, mari kita buka wawasan dengan menelusuri perjalanan evolusi praktik kedokteran dari era analog menuju era digital yang cerdas ini.

Dari Buku Teks ke Algoritma: Evolusi Praktik Kedokteran dari Era Analog ke Era Digital

Kedokteran Analog: Kuat, tetapi Terbatas oleh Skala dan Kecepatan

Selama berabad-abad, praktik kedokteran klasik bertumpu pada tiga pilar utama: anamnesis, pemeriksaan fisik, dan pemeriksaan penunjang. Pengetahuan klinis disimpan dalam buku teks tebal, jurnal penelitian, pedoman, dan pengalaman praktik yang diwariskan dari generasi ke generasi. Bahkan sejak ribuan tahun lalu, praktik pengobatan tradisional seperti penggunaan tanaman herbal telah menjadi fondasi penyembuhan. Fong *dkk.* (2020) mencatat bahwa Kaisar Shen Nong telah menggunakan mekanisme pertukaran informasi untuk pengobatan sindrom pernapasan sejak tahun 2735

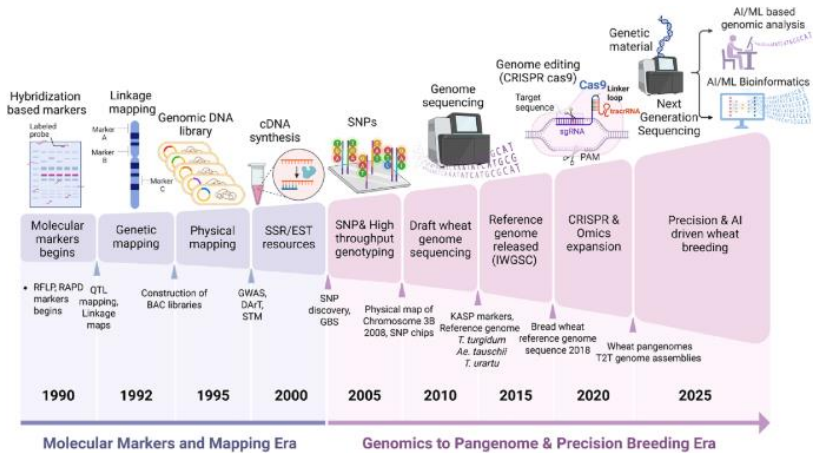
SM, membuktikan bahwa pengobatan dan komunikasi telah terjalin erat selama lebih dari 4000 tahun.

Seorang dokter muda belajar dari dokter senior, menghafal gejala dan obat, dan perlahan-lahan membangun “*database*” internal di dalam kepalanya. Proses ini, meskipun sangat berharga, memiliki keterbatasan inheren: subjektivitas interpretasi, kecepatan akses informasi yang lambat, dan kapasitas memori manusia yang terbatas. Masalahnya bukan karena pendekatan ini keliru, melainkan karena dunia klinis modern menghasilkan data dalam volume dan kompleksitas yang terus meningkat rekam medis elektronik, citra radiologi, data genomik, hingga sinyal kontinu dari perangkat pemantau (Gaonkar dkk., 2025; Hassan & Omenogor, 2025; Nyavor, 2025). Dalam konteks penyakit kronis seperti diabetes, literatur menyoroti bahwa beban global yang meningkat, kompleksitas heterogenitas penyakit (misalnya variasi fenotipe T2DM), serta kebutuhan keputusan terapi yang dinamis membuat pendekatan manual murni semakin “*kewalahan skala*” (Samajdar dkk., 2025; Valdespino-Saldaña, 2026).

Analogi sederhananya: dokter analog bekerja seperti “pustakawan” yang sangat ahli mampu mencari pengetahuan di rak-rak buku dan menghubungkannya dengan kasus pasien. Tetapi ketika “perpustakaan” berubah menjadi miliaran baris data (EHR, lab, citra, sensor), kita memerlukan “mesin pencari” yang bukan hanya menemukan, tetapi juga memprediksi dan mengusulkan tindakan berdasarkan pola yang tak mudah ditangkap mata manusia (Gaonkar dkk., 2025; Hassan & Omenogor, 2025; Nyavor, 2025).

Memasuki Abad ke-20: Awal Mula Teknologi dalam Kedokteran

Memasuki abad ke-20, teknologi mulai merambah dunia kedokteran. Telepon memungkinkan konsultasi jarak jauh, yang menjadi cikal bakal telemedisin modern. Fong dkk. (2020) mencatat bahwa sejarah telemedisin modern dapat ditelusuri kembali ke penggunaan telepon tradisional sekitar satu abad lalu, ketika nasihat medis diberikan oleh dokter melalui sambungan telepon. Istilah “*telemedicine*” sendiri secara sederhana berarti penyediaan layanan medis melalui telekomunikasi. “The Radio Doctor,” yang pertama kali muncul di majalah Radio News sekitar tahun 1924, mungkin merupakan kasus terdokumentasi paling awal dari pemanfaatan teknologi telekomunikasi untuk aplikasi medis (Fong dkk., 2020).



Gambar 1. Sejarah teknologi informasi di bidang Kesehatan (Waqas dkk. 2025)

Kemudian, komputer mulai digunakan untuk menyimpan data pasien secara elektronik. Era 1960-an dan 1970-an menyaksikan lahirnya sistem Rekam Medis Elektronik (RME) pertama, yang pada dasarnya adalah digitalisasi dari catatan kertas. Fong dkk., (2020) menjelaskan bahwa International Medical Informatics Association (IMIA) dibentuk pada tahun 1967 dengan tujuan utama mengoordinasikan pengembangan informatika kesehatan. Tidak lama setelah pembentukannya, muncullah bahasa pemrograman MUMPS (*Massachusetts General Hospital Utility Multi-Programming System*) untuk membangun aplikasi kesehatan, yang hingga kini masih digunakan dalam sistem rekam kesehatan elektronik. Ini adalah langkah awal yang penting: data mulai berpindah dari rak arsip ke server komputer. Namun, pada tahap ini, komputer hanyalah pengganti lemari arsip yang lebih efisien. Ia belum mampu menganalisis data, menemukan pola tersembunyi, atau membantu dokter dalam pengambilan keputusan secara cerdas.

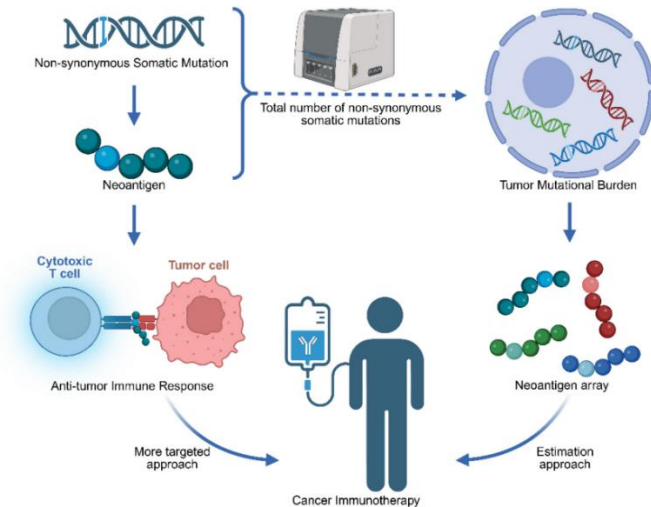
Digitalisasi: Saat Praktik Klinis Mulai “Berbicara dengan Data”

Perubahan paradigma dimulai ketika teknologi informasi dan komunikasi (TIK) berkembang pesat. Internet, yang awalnya merupakan proyek riset militer, tumbuh menjadi jaringan global yang menghubungkan informasi dan orang-orang di seluruh dunia. Fong

dkk., (2020) menelusuri asal-usul internet kemungkinan besar dari *Galactic Network* yang didokumentasikan oleh Licklider dan Clark pada tahun 1962. Dampak pertumbuhan internet terhadap kemajuan telemedisin sangatlah signifikan. Dengan kemampuan jaringan untuk membawa berbagai jenis data melalui satu media transmisi, komunikasi kini dapat mendukung telemedisin di banyak area, termasuk berbagi informasi, audio untuk telekonsultasi, gambar diam untuk X-ray dan pindaian, gambar video untuk telekonferensi dan pendidikan kedokteran, *database* untuk rekam elektronik pasien, hingga tanda-tanda vital untuk analisis EKG dan EEG (Fong dkk., 2020).

Digitalisasi kesehatan muncul ketika informasi klinis dapat direkam, ditransmisikan, dan dianalisis secara sistematis. Dalam ranah *digital health care*, teknologi seperti *wearable devices*, aplikasi *mobile*, dan *telemedicine* semakin menjadi bagian dari sistem layanan kesehatan, khususnya untuk kondisi yang menuntut modifikasi gaya hidup dan pemantauan berkelanjutan, seperti sindrom metabolik (Lee dkk., 2024). Pada diabetes, literatur menggambarkan AI yang bekerja pada beragam sumber: EHR, diagnostik pencitraan, dan data laboratorium untuk dukungan keputusan klinis (Gaonkar dkk., 2025). Bahkan pen-dekatan *telemedicine* berbasis AI untuk komplikasi seperti kaki diabetik diposisikan sebagai sarana edukasi, konsultasi, dan arahan perawatan yang dapat berjalan berkelanjutan (Hidayat dkk., 2022).

Di titik ini, "*kedokteran modern*" bukan sekadar me-mindahkan catatan kertas menjadi PDF. Intinya adalah membuat data dapat dihitung (*computable*): dapat diproses algoritma untuk menemukan pola, melakukan klasifikasi, atau membuat prediksi risiko (Gaonkar dkk., 2025; Hassan & Omenogor, 2025; Nyavor, 2025). Studi tentang metode *boosting* untuk diagnosis diabetes, misalnya, mencontohkan bagaimana dataset dapat dianalisis dengan berbagai algoritma (Gradient Boosting, AdaBoost, CatBoost, LightGBM, XGBoost) dan dievaluasi dengan metrik kinerja seperti ROC dan akurasi sebuah pola kerja yang merepresentasikan kultur baru: klinik yang "bertemu" sains data (Koçak & Çetin, 2023).



Gambar 2. Interpretasi data pasien secara digitalisasi (Sun dkk. 2025)

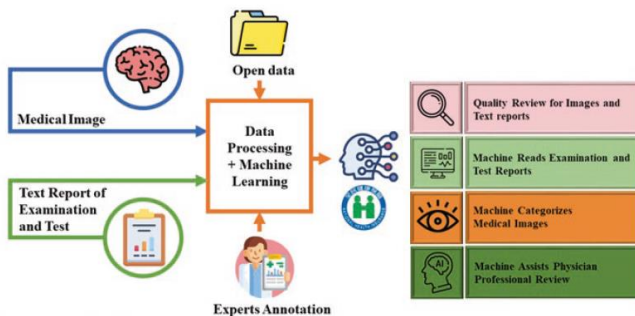
Loncatan Konektivitas: Dari Konsultasi Sederhana menuju Pemantauan *Real-time*

Loncatan berikutnya adalah ketika perangkat bergerak, seperti ponsel pintar dan tablet, menjadi komputasi jinjing yang sangat kuat. Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel memungkinkan penerapan telemedisin yang lebih fleksibel untuk mendukung aplikasi di luar lokasi tetap (Fong dkk., 2020). Telemedisin yang tadinya hanya mengkitalkan sambungan telepon atau video konferensi sederhana, kini mampu mentransfer data kompleks seperti EKG atau gambar *X-ray* resolusi tinggi dari lokasi terpencil ke pusat rujukan. Fong dkk. (2020) menggambarkan bagaimana para paramedis di lokasi kecelakaan dapat mengirimkan data vital pasien ke rumah sakit jauh sebelum ambulans tiba. Sebuah jaringan area lokal nirkabel (WLAN) melayani area sekitar ambulans, menghubungkan perangkat yang dikenakan beberapa paramedis sehingga data dapat dikirim ke rumah sakit. Kamera yang dapat dikenakan menangkap gambar resolusi tinggi yang menunjukkan detail cedera pasien, algoritma pemrosesan gambar memperkirakan jumlah kehilangan darah, berbagai sensor mengakuisisi tkita-tkita vital seperti detak jantung, laju pernapasan, dan kadar oksigen darah (SpO₂) (Fong dkk., 2020). Inilah awal dari konektivitas yang sesungguhnya.

Titik Balik: Dari Data Mentah Menuju Data Bermakna dengan AI

Titik balik terbesar terjadi ketika kita tidak hanya mampu mendigitalkan dan mentransmisikan data, tetapi juga mulai membuatnya bermakna. Ledakan volume data kesehatan dari RME, hasil pencitraan medis (MRI, CT scan, X-ray), data genomik, hingga data dari perangkat yang dapat dikenakan (*wearable device*) telah melampaui kemampuan manusia untuk memprosesnya secara manual. Fong dkk. (2020) menjelaskan bahwa sensor biologis dan fisiologis yang terhubung ke perangkat cerdas kesehatan konsumen dan perangkat medis melalui IoT membuka peluang besar bagi peningkatan layanan kesehatan. Perawatan preventif dapat didukung melalui deteksi anomali ketika parameter yang diukur mencapai ambang batas tertentu yang telah ditentukan.

Di sinilah peran algoritma dan Kecerdasan Buatan (AI) menjadi krusial. AI, terutama melalui cabangnya seperti *machine learning* (pembelajaran mesin) dan *deep learning* (pembelajaran mendalam), mampu menyaring gunung data tersebut untuk menemukan pola-pola halus yang tidak kasat mata. Fong dkk. (2020) menjelaskan bahwa AI memungkinkan mesin belajar dari manusia sehingga berbagai tugas seperti manusia dapat diotomatisasi. *Machine learning* adalah salah satu metodologi paling menonjol untuk perawatan personal, karena dirancang untuk menganalisis kebutuhan pasien secara individual. *Deep learning*, yang merupakan proses melatih komputer untuk melakukan tugas-tugas seperti manusia, seperti memahami gambar medis, melibatkan pelatihan melalui penetapan parameter dasar tentang tipe data yang diminati dan mengajarkan mesin untuk belajar sendiri melalui pengenalan pola menggunakan beberapa lapisan pemrosesan (Fong dkk., 2020).



Gambar 3. Tinjauan presisi yang dibantu kecerdasan buatan (Lee dkk. 2022)

Dari Keputusan Berbasis Rata-rata Menuju Keputusan Berbasis Variasi Individu

Salah satu konsekuensi paling penting dari digitalisasi adalah bergesernya kedokteran dari “satu ukuran untuk semua” menuju *personalized/precision medicine*. Literatur tentang masa depan kedokteran personal menekankan fondasi *multi-omics* /genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik, hingga mikro-bioma sebagai lapisan data yang memperkaya pemahaman mekanisme penyakit dan membuka peluang intervensi yang lebih tertarget (Shuja, 2024). Pada diabetes dan obesitas (*diabetesity*), pembahasan strategi presisi menyoroti kebutuhan stratifikasi risiko yang lebih dini dan individual melalui kombinasi biomarker, *imaging*, serta pemantauan digital (misalnya CGM, *wearables*, dan analitik AI) (Samajdar dkk., 2025). Pada komplikasi diabetes seperti nefropati diabetik, literatur menekankan integrasi biomarker (misalnya UACR, eGFR, serta biomarker *emerging*) dan pen-dekatan *precision medicine* dalam diagnosis dan pencegahan (Gumber dkk., 2025).

Dengan kata lain, algoritma bukan “pengganti dokter”, melainkan alat pendukung/asisten khusus dokter. Jika mikroskop (alat membantu) memperbesar hal kecil seperti sel, maka AI memperbesar dunia pola: pola risiko, pola respons terapi, dan pola progresi penyakit yang tersembunyi di balik data klinis (Gaonkar dkk., 2025; Hassan dan Omenogor, 2025; Nyavor, 2025). Dunia kesehatan telah berevolusi: dari sebuah seni yang bertumpu pada buku teks dan intuisi, menjadi sebuah disiplin ilmu yang semakin diperkuat oleh wawasan data dan kecerdasan buatan.

Pilar Revolusi Digital Kesehatan: Data, Komputasi, dan Konektivitas

Transformasi ini tidak terjadi dalam ruang hampa. Ia dibangun di atas tiga pilar utama yang saling terkait dan memperkuat satu sama lain: Data (*Big data*), Komputasi (*Cloud & AI*), dan Konektivitas (IoMT & 5G). Memahami ketiganya adalah kunci untuk mengerti arah masa depan kesehatan.

Pilar Data (*Big data*)

Revolusi digital dimulai dari bahan bakarnya: data. Dalam dunia kesehatan, *Big data* merujuk pada kumpulan data dalam volume sangat besar, beragam, dan cepat berubah yang sulit diproses dengan metode tradisional. Literatur AI di diagnostik menegaskan bahwa transformasi utama terjadi karena kemampuan AI memproses

dataset medis kompleks: *imaging*, informasi genetik, dan EHR (Gaonkar dkk., 2025). Di ranah *predictive healthcare*, sumber data yang dianalisis mencakup EHR, pencitraan medis, dan *genomic sequencing*, yang memungkinkan identifikasi pola untuk deteksi dini dan strategi terapi personal (Hassan & Omenogor, 2025). Studi lain tentang prediksi risiko untuk perawatan proaktif menekankan data heterogen EHR, data genetik, pola gaya hidup, dan paparan lingkungan untuk memetakan trajektori risiko secara lebih presisi (Nyavor, 2025). Pada diabetes, kebutuhan alat komputasi lanjutan didorong oleh peningkatan volume data yang harus dianalisis untuk dukungan keputusan terapi.

Sumber-sumber data ini dapat dirinci sebagai berikut:

- a. **Data Klinis:** Rekam medis elektronik (RME) yang berisi riwayat penyakit, diagnosis, hasil laboratorium, dan resep obat. Fong dkk. (2020) membahas secara mendalam tentang rekam pasien dan aplikasi *data mining*. Mereka menjelaskan bahwa sebuah klinik pedesaan mungkin memiliki ratusan pasien, sementara rumah sakit besar di metropolis dapat melayani lebih dari 100.000 pasien. Setiap pasien mungkin memiliki data yang banyak terkait riwayat medis, dan mereka dengan riwayat panjang bahkan dapat mencapai jutaan data. Ini memberikan gambaran betapa besarnya bank data medis yang dimiliki satu rumah sakit (Fong dkk., 2020).
- b. **Data Pencitraan Medis:** Gambaran digital dari X-ray, MRI, CT scan, dan USG. Satu pindaian saja bisa terdiri dari ribuan gambar dengan detail yang sangat tinggi. Fong dkk. (2020) mengilustrasikan besarnya data ini dengan contoh sederhana: gambar bitmap 6 megapiksel dengan 256 skala abu-abu memiliki ukuran file tidak terkompresi sekitar 5,72 MB. Mereka juga menekankan bahwa ada kompromi antara kualitas gambar dan ukuran file, yang merupakan pertimbangan penting dalam hal kebutuhan penyimpanan dan waktu transfer gambar, terutama ketika ada sejumlah besar gambar yang harus ditangani (Fong dkk., 2020).
- c. **Data Genomik dan Omik Lainnya:** Urutan DNA, RNA, protein, dan biomarker lainnya yang memberikan *blueprint* biologis unik setiap individu (Alum dkk., 2025; Shuja, 2024)
- d. **Data dari Perangkat dan Sensor:** Data kontinu dari perangkat yang dapat dikenakan (*wearables*), seperti detak jantung, kadar oksigen darah, langkah kaki, pola tidur, hingga data dari sensor pintar di rumah pasien yang memonitor aktivitas harian. Fong dkk. (2020) menjelaskan bahwa perangkat pintar yang dapat dikenakan juga dapat dihubungkan ke jaringan IoT untuk mendapatkan

informasi yang lebih komprehensif tentang kesejahteraan pasien. Mereka juga mencatat bahwa IoT mendukung layanan kesehatan yang komprehensif melalui berbagai tautan komunikasi mulai dari konektivitas melalui internet via jaringan seluler, serta jarak pendek melalui protokol *Bluetooth*/NFC (Fong dkk., 2020).

- e. **Data Administratif dan Klaim Asuransi:** Data tentang utilisasi layanan kesehatan, biaya, dan demografi pasien.

Dalam konteks klinis, “*Big data*” tidak selalu berarti data berukuran raksasa secara teknis, melainkan data yang bervariasi (*variety*), mengalir (*velocity*), dan memerlukan pengolahan sistematis agar menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti (Gaonkar dkk., 2025; Hassan & Omenogor, 2025; Nyavor, 2025). Contoh konkretnya adalah diabetes: data glukosa, obat, pola makan, aktivitas, komplikasi (retinopati, neuropati, kaki diabetik), dan faktor komorbid dapat hadir dalam format yang berbeda angka laboratorium, citra retina, catatan teks, sinyal sensor yang secara manual sulit “disatukan” secara konsisten (Gaonkar dkk., 2025; Hidayat dkk., 2022).

Volume data ini begitu besar dan kompleks sehingga mustahil bagi manusia untuk menganalisisnya secara manual. Namun, di balik kerumitan itu tersimpan potensi luar biasa. Fong dkk., (2020) menjelaskan bahwa *data mining* mengkitalkan model statistik untuk pengambilan informasi cepat dari basis data yang luas. *Data mining* mengekstrak item berdasarkan empat jenis hubungan: asosiasi (mengidentifikasi hubungan atau tautan), kelas (mengelompokkan data menurut kelas yang ditetapkan), kluster (mengelompokkan data menurut hubungan logis), dan pola berurutan (mengeksktrak data untuk memprediksi pola dan tren perilaku) (Fong dkk., 2020). Dengan menganalisis data dalam skala besar, kita dapat mengidentifikasi faktor risiko penyakit yang sebelumnya tidak diketahui, menemukan korelasi baru antara gejala dan diagnosis, serta memahami efektivitas suatu pengobatan pada populasi yang beragam.

Nuansa penting yang perlu digarisbawahi: beberapa literatur menekankan peluang besar data digital untuk prediksi dan pencegahan, tetapi juga menggarisbawahi masalah privasi dan tata kelola data sebagai hambatan utama (Hassan & Omenogor, 2025; Nyavor, 2025). Artinya, *Big data* tidak otomatis berarti “lebih baik”; ia menjadi bernilai jika kualitas, keamanan, dan konteks klinisnya terjaga (Nyavor, 2025).

Pilar Komputasi (Cloud & AI)

Di sinilah peran pilar kedua, komputasi, menjadi sangat vital. Untuk menyusun potongan teka-teki raksasa bernama *Big data*, kita membutuhkan dua hal: *kekuatan komputasi* dan *kecerdasan*. *Cloud Computing* menyediakan infrastruktur yang diperlukan. Alih-alih membangun pusat data raksasa sendiri, penyedia layanan kesehatan kini dapat menyewa kekuatan komputasi elastis/fleksibel dari berbagai platform. Fong dkk. (2020) menjelaskan bahwa “*cloud*” dalam istilah teknologi mengacu pada jaringan global server jarak jauh. Meskipun server-server ini saling terhubung, masing-masing mampu berfungsi secara mandiri. *Cloud* publik memungkinkan informasi dibagikan oleh entitas yang berbeda, seperti dalam hal berbagi saran kesehatan umum, informasi kesehatan masyarakat, dll. Sebaliknya, *cloud* pribadi membatasi akses informasi dalam jaringan internal. *Cloud* juga dapat menjadi hibrida sehingga dikonfigurasi untuk melayani baik sebagai penyedia layanan publik maupun pribadi (Fong dkk., 2020). *Cloud* memungkinkan penyimpanan data dalam jumlah tak terbatas secara aman dan relatif murah. Lebih penting lagi, cloud menyediakan kekuatan pemrosesan yang sangat besar sesuai permintaan. Ketika sebuah rumah sakit perlu menjalankan algoritma AI untuk menganalisis ribuan CT scan, mereka dapat mengakses ribuan server di *cloud* dalam sekejap, menyelesaikan tugas dalam hitungan jam yang dulu memakan waktu berminggu-minggu. *Cloud* adalah mesin yang memutar roda inovasi.

Di atas infrastruktur cloud inilah Kecerdasan Buatan (AI) beroperasi sebagai otaknya. AI dan ML digambarkan sebagai teknologi yang memungkinkan pemrosesan cepat dan akurat atas dataset medis kompleks, termasuk *deep learning* (DL), *Natural Language Processing* (NLP), dan *advanced analytics* (Gaonkar dkk., 2025). Dalam kerangka *predictive healthcare*, *deep learning* digunakan untuk mengenali pola dari data pasien dan membantu diagnosis dini, personalisasi terapi, dan pencegahan penyakit (Hassan & Omenogor, 2025). Di sisi lain, literatur tentang prediksi risiko proaktif menekankan penggunaan berbagai model *supervised* dan *unsupervised decision trees*, *random forests*, *support vector machine* (SVM), dan *deep neural networks* serta pentingnya evaluasi metrik (*accuracy*, *precision*, *recall*, AUC-ROC) dan isu interpretabilitas/*fairness* saat integrasi ke alur kerja klinis (Nyavor, 2025).

Fong dkk. (2020) menjelaskan bahwa AI dapat dipersepsikan sebagai suatu kecerdasan yang dibuat secara artifisial untuk berpikir. Jaringan saraf dalam AI hanyalah di organisasi secara artifisial berdasarkan arsitektur tertentu yang pada dasarnya menyerupai grafik yang sering terkait dengan jenis model statistik. AI memungkinkan mesin belajar dari manusia sehingga berbagai tugas seperti manusia dapat diotomatisasi (Fong dkk., 2020).

Pada diabetes, AI dibahas bukan hanya untuk “menentukan ada/tidaknya penyakit”, tetapi juga untuk skrining risiko dini, klasifikasi, manajemen terapi, dan prediksi komplikasi (misalnya hipoglikemia, ulkus, serta komplikasi organ) (Gaonkar dkk., 2025). Studi komparatif algoritma *boosting* untuk diagnosis diabetes menunjukkan pendekatan praktis: berbagai model diuji pada dataset dan dibandingkan performanya; ini mencerminkan bagaimana komputasi dapat menjadi “*laboratorium kedua*” selain laboratorium klinik (Koçak & Çetin, 2023). Bahkan ada pendekatan yang menggabungkan praktik kesehatan tradisional (Siddha) dengan *machine learning/deep learning* untuk prediksi diabetes, memperlihatkan bahwa komputasi dapat dipasangkan dengan berbagai sumber fitur diagnostik, meskipun validasi dan generalisasi tetap menjadi isu penting (Jeevarathinam dkk., 2025). Dalam kesehatan, AI memiliki berbagai peran transformasional:

- a. **Diagnosis Berbantuan AI:** Seperti disebut sebelumnya, AI unggul dalam menganalisis gambar medis. Fong dkk. (2020) memberikan contoh AI yang dapat diterapkan pada diagnosis kanker kulit melalui pelatihan mesin tentang cara mengenali fitur area yang terkena. Mereka juga menyebutkan bahwa selain pencitraan, AI juga banyak digunakan dalam menganalisis berbagai jenis data pembelajaran. Algoritma dapat dilatih untuk mendeteksi nodul kecil di paru-paru yang mungkin terlewatkan oleh mata manusia, atau mengidentifikasi pola tumor ganas pada pindaian MRI otak dengan akurasi tinggi.
- b. **Penemuan dan Pengembangan Obat:** AI mampu mempercepat proses penemuan obat yang biasanya memakan waktu lebih dari satu dekade. Dengan mensimulasikan interaksi jutaan molekul terhadap target penyakit, AI dapat mengidentifikasi kandidat obat yang paling menjanjikan untuk kemudian diuji di laboratorium (Kurniawan & Winarno, 2025; Mahendra dkk., 2025).

- c. Pengobatan yang Dipersonalisasi:** Fong dkk. (2020) menekankan bahwa *deep learning* memiliki kemampuan untuk menyediakan layanan kesehatan yang sangat personal dengan mempelajari kebutuhan individu pasien. Kemampuan untuk menganalisis gambar juga dapat diperluas untuk integrasi dengan olahraga dan latihan dalam meningkatkan kinerja dan merekomendasikan diet yang lebih sehat. *Machine learning* tidak hanya memfasilitasi pembelajaran kebutuhan spesifik pasien, tetapi juga membantu dalam meningkatkan pemantauan kesehatan melalui pembelajaran berkelanjutan tentang penggunaan dan lingkungan operasional (Fong dkk., 2020). Dengan menganalisis data genomik dan klinis seorang pasien, AI dapat membantu dokter memilih terapi yang paling efektif dan meminimalkan efek samping, sebuah pendekatan yang dikenal sebagai Kedokteran Presisi.
- d. Otomatisasi Tugas Administratif:** AI juga dapat meringankan beban administrasi dokter. *Large Language Model* (LLM) dapat digunakan untuk menulis ringkasan catatan klinis, menjadwalkan janji temu, atau menjawab pertanyaan pasien melalui asisten virtual, sehingga dokter dapat lebih fokus pada interaksi dengan pasien.

Nuansa penting: bukti manfaat AI pada luaran klinis dapat bervariasi menurut populasi, jenis intervensi, dan desain studi. Meta-analisis penggunaan AI pada pasien diabetes melaporkan hasil yang “mengarah” pada keuntungan AI pada deteksi/manajemen gejala, tetapi juga menunjukkan ukuran efek yang kecil dan interval kepercayaan yang melintasi nol (misalnya RR ~0,98 dengan CI 95% 0,88–1,08), yang menkitakan bahwa efektivitas dapat tidak selalu dramatis atau konsisten di semua studi (Alhalafi dkk., 2024). Sebaliknya, tinjauan sistematik pada diabetes pediatrik melaporkan asosiasi yang lebih konsisten dengan perbaikan metrik seperti HbA1c dan *time in range* pada intervensi AI yang terintegrasi dengan CGM/*closed-loop*/telemedicine, sambil tetap menegaskan keterbatasan validasi jangka panjang dan isu ketimpangan akses (Valdespino-Saldaña, 2026)

Pilar Konektivitas (IoMT & 5G)

Jika data adalah “*bahan bakar*” dan AI adalah “*mesin*”, maka konektivitas adalah “*jalan raya*” yang membuat keduanya bergerak. Pilar ketiga adalah konektivitas, yang diwujudkan oleh *Internet of Medical Things* (IoMT) dan jaringan generasi kelima (5G).

IoMT adalah jaringan perangkat medis dan sensor yang terhubung ke internet, yang saling berkomunikasi dan bertukar data. Fong dkk. (2020) menjelaskan konsep *Internet of Things* (IoT) yang menghubungkan “benda-benda” melalui internet dengan tingkat mobilitas tinggi. “Benda” mencakup pada dasarnya segala sesuatu yang terhubung bersama seperti sensor, perangkat, sistem, konsumer, pasien, profesional medis dan teknologi, dll.

IoT adalah tentang konektivitas dan pemrosesan yang menyediakan platform bagi sistem telemedisin untuk meng-hubungkan pasien dengan lingkungan sekitarnya dan catatan kesehatan digital, semua tersedia bagi pengasuh mereka (Fong dkk., 2020). Dalam konteks medis, ini mencakup segala sesuatu, mulai dari sensor yang dapat ditelan (*smart pill*) yang mengirimkan gambar dari dalam usus, hingga pompa insulin pintar yang secara otomatis menyesuaikan dosis berdasarkan data *Continuous Glucose Monitor* (CGM), hingga perangkat yang dapat dikenakan seperti jam tangan pintar yang memonitor detak jantung dan deteksi jatuh pada lansia.

Fong dkk. (2020) menambahkan bahwa perangkat pintar yang dapat dikenakan juga dapat dihubungkan ke jaringan IoT untuk mendapatkan informasi yang lebih komprehensif tentang kesejahteraan pasien. IoMT mengubah rumah sakit yang tersentralisasi menjadi sistem perawatan terdistribusi yang menjangkau hingga ke rumah pasien.

Dalam *digital health care* untuk sindrom metabolik, perangkat *wearable*, aplikasi *mobile*, dan *telemedicine* disebut sebagai teknologi yang semakin integral dalam sistem kesehatan, terutama untuk mendukung perubahan gaya hidup dan intervensi berkelanjutan (Lee dkk., 2024). Pada kaki diabetik, telemedicine berbasis AI diposisikan sebagai solusi yang menyediakan edukasi dan konsultasi serta dukungan perawatan yang dapat berjalan terus-menerus (Hidayat dkk., 2022).

Pengembangan *chatbot* menunjukkan bentuk konektivitas lain: sistem digital yang membantu pemantauan, edukasi, dan pengingat jadwal perawatan, dengan pengujian fungsional/kinerja dan penerimaan pengguna (Muhammad, 2025). Di kardiovaskular, tinjauan tentang *wearable technology* menekankan nilai pemantauan fisiologis kontinu dan *real-time* untuk deteksi dini dan manajemen jangka panjang, serta integrasinya dengan ekosistem digital (Nazir, 2025). Pada diabetes, kemajuan *optical glucose sensing* ditinjau sebagai pendekatan non-invasif yang didorong oleh nanoteknologi, material fotonik, dan *machine learning* untuk meningkatkan akurasi pe-

mantauan glukosa *real-time*, meskipun masih ada tantangan seperti kalibrasi dan interferensi biologis (Wassan dkk., 2025).

Di sinilah peran 5G menjadi krusial. Fong dkk. (2020) menjelaskan bahwa 5G, yang dikembangkan berdasarkan spesifikasi IMT-2020 dari ITU, dirancang untuk meningkatkan *bandwidth* sambil mengurangi latensi. 5G dibagi menjadi tiga kategori layanan yang berbeda, yaitu *enhanced mobile broadband (eMBB)*, *ultra-reliable low-latency communications (URLLC)*, dan *massive machine type communications (MMTC)* (Fong dkk., 2020). eMBB adalah untuk perangkat elektronik konsumen seperti ponsel pintar dan tablet komputer; URLLC untuk aplikasi industri seperti ambulans pintar dan pemulihan pasca-bencana, sedangkan MMTC terutama untuk sensor, misalnya pil pintar, monitor kesehatan di jam tangan pintar, dan pakaian pintar (Fong dkk., 2020).

Dengan kecepatan data yang jauh lebih tinggi dan latensi (jeda waktu) yang sangat rendah dibandingkan pendahulunya, 5G menjadi tulang punggung yang memungkinkan IoMT bekerja secara optimal. Latensi rendah sangat penting untuk aplikasi waktu nyata seperti:

- a. **Telemedisin Lanjutan:** Konsultasi video dengan kualitas *ultra-high-definition* (UHD) 4K atau bahkan 360 derajat untuk pemeriksaan jarak jauh yang imersif.
- b. **Pemantauan Pasien Jarak Jauh *Real-time*:** Data dari sensor pasien dapat dikirim dan dianalisis secara instan, memungkinkan deteksi dini kondisi kritis seperti aritmia jantung.
- c. **Operasi Jarak Jauh (Telesurgery):** Seorang ahli bedah dapat mengendalikan lengan robot di rumah sakit lain melalui jaringan 5G, dengan umpan balik haptik (sentuhan) yang terasa hampir seperti operasi langsung. Keterlambatan sepersekian detik pun tidak dapat ditoleransi dalam skenario ini.
- d. **Ambulans Pintar:** Fong dkk. (2020) menjelaskan secara rinci tentang konsep ambulans pintar. Tantangan utama dalam desain ambulans pintar adalah memasang teknologi sambil memenuhi tuntutan ergonomi, kompatibilitas elektromagnetik (EMC), dan kemudahan pembersihan (Fong dkk., 2020). Dalam bentuknya yang paling primitif, ambulans pintar tetap terhubung ke pusat respons dan informasi seperti konsultasi dan *electronic patient record (EPR)* dapat dengan mudah diambil oleh paramedis di lokasi kejadian. Selain itu, jaringan IoT lokal menyediakan koneksi antara instrumen ambulans dan paramedis (Fong dkk., 2020). Data vital pasien, video dari lokasi kejadian, dan citra medis dapat

dikirimkan dengan lancar dari ambulans yang melaju kencang ke rumah sakit rujukan.

Ketiga pilar ini *Big data* sebagai bahan bakar, *Cloud & AI* sebagai mesin dan otak, serta *IoMT & 5G* sebagai sistem saraf bekerja dalam satu kesatuan yang sinergis. Data mengalir dari *IoMT*, diproses dan dianalisis oleh *AI* di *cloud*, dan hasilnya dikirimkan kembali ke dokter atau perangkat untuk tindakan yang lebih cepat dan tepat.

Dampak pada Paradigma Kedokteran: Dari Reaktif Menjadi Prediktif, Preventif, dan Personal (Kedokteran 4.0/5.0)

Mengapa Paradigma Lama Cenderung Reaktif?

Konvergensi ketiga pilar di atas tidak hanya membuat proses yang ada menjadi lebih efisien, tetapi secara fundamental mengubah paradigma kedokteran itu sendiri. Model reaktif muncul ketika sistem baru bertindak setelah gejala tampak atau komplikasi terjadi. Kita bergerak dari model kedokteran tradisional yang reaktif (menunggu pasien sakit baru bertindak) menuju model yang lebih prediktif, preventif, dan personal. Evolusi ini sering disebut sebagai transisi menuju Kedokteran 4.0 dan Kedokteran 5.0.

Pada penyakit kronis, literatur menekankan bahwa beban penyakit yang meningkat (misalnya diabetes) membutuhkan inovasi karena keterbatasan sumber daya dan kompleksitas pengelolaan jangka panjang. Penyakit kardiovaskular juga digambarkan sebagai penyebab kematian global utama, mendorong kebutuhan strategi pencegahan dan diagnostik yang skalabel ruang yang kemudian diisi oleh *wearable* dan pemantauan kontinu (Nazir, 2025).

Sindrom metabolik yang prevalensinya besar secara global dan bergantung pada modifikasi gaya hidup juga mendorong intervensi digital berkelanjutan (Lee dkk., 2024). Dalam bahasa sederhana: penyakit kronis adalah “maraton”, sedangkan sistem kesehatan sering dipaksa bekerja seperti “pemadam kebakaran” sibuk memadamkan komplikasi, bukan mencegah percikan (Nazir, 2025; Lee dkk., 2024).

Jika kita melihat sejarah, Kedokteran 1.0 adalah era di mana dokter mengkitalkan pengamatan langsung dan pengalaman pribadi. Kedokteran 2.0 ditkai dengan penggunaan alat diagnostik seperti stetoskop dan sinar-X. Kedokteran 3.0 adalah era informasi, di mana komputer dan RME mulai digunakan untuk manajemen data pasien. Fong dkk. (2020) memberikan gambaran tentang perkembangan informatika kesehatan selama beberapa dekade terakhir, yang sejalan dengan era-era ini. Mereka mencatat bahwa

informatika kesehatan baru dimungkinkan ketika komputer dihubungkan bersama untuk membentuk jaringan, sehingga muncullah jaringan komputer. Gagasan informatika kesehatan dimulai setelah Perang Dunia II seiring teknologi menjadi lebih mudah diakses. Jaringan-jaringan ini menyediakan kerangka kerja untuk menghubungkan rumah sakit di dunia maya (Fong dkk., 2020).

Kedokteran 4.0 membawa digitalisasi lebih jauh dengan mengintegrasikan sistem siber-fisik, IoT, dan komputasi awan ke dalam proses perawatan kesehatan, menciptakan rumah sakit dan sistem yang lebih pintar dan terhubung. Fong dkk. (2020) membahas secara ekstensif tentang konsep “rumah sakit pintar” (*smart hospital*). Mereka menggambarkan bagaimana teknologi informasi telah meningkatkan otomatisasi dan keselamatan di rumah sakit selama beberapa dekade. Sebuah rumah sakit yang menyediakan layanan komprehensif dapat terdiri dari banyak departemen dengan administrasi pusat, semuanya terhubung bersama oleh jaringan untuk berbagi informasi dan koordinasi (Fong dkk., 2020).

Mereka memberikan contoh bagaimana teknologi komunikasi dapat membantu menghemat biaya dan menyelamatkan nyawa di rumah sakit, seperti dalam radiologi dan kontrol presisi robot untuk operasi (Fong dkk., 2020).

Kini, kita sedang memasuki era Kedokteran 5.0. Jika Kedokteran 4.0 berfokus pada teknologi dan efisiensi, Kedokteran 5.0 menambahkan dimensi baru yang esensial: fokus pada pasien (*patient-centric*) dan kolaborasi manusia-mesin. Tujuannya bukan hanya menyembuhkan penyakit, tetapi juga menciptakan kesejahteraan (*well-being*) yang berkelanjutan dengan memanfaatkan teknologi canggih seperti AI yang dapat dijelaskan (*Explainable AI*) dan IoMT, sambil tetap menjaga sentuhan manusiawi. Sistem kesehatan tidak hanya pintar, tetapi juga bijaksana dan berpusat pada nilai-nilai kemanusiaan.

Prediktif: Dari “Mendiagnosis Sekarang” ke “Memprediksi Risiko”

Disinilah *predictive analytics* menjadi masuk akal. Literatur *predictive healthcare* menekankan bahwa *deep learning* dapat menganalisis data pasien untuk mendukung diagnosis dini, personalisasi terapi, dan pencegahan (Hassan & Omenogor, 2025). Literatur lain menegaskan bahwa model ML dapat memprediksi risiko penyakit sebelum gejala muncul, mendukung strategi proaktif, dan berpotensi menekan biaya perawatan serta *readmission* (Nyavor, 2025).

Aplikasi AI untuk skrining dan prediksi dibahas luas. Pada diabetes, AI digunakan untuk identifikasi risiko dini dengan akurasi tinggi dan membantu memahami heterogenitas T2DM Ikitasan penting untuk *precision medicine*. Ragam algoritma ML (termasuk *boosting*) juga diuji untuk klasifikasi diagnosis diabetes dengan pelaporan kinerja berbasis ROC/akurasi (Koçak & Çetin, 2023). Bahkan pendekatan yang memadukan fitur dari praktik Siddha dengan model ANN atau *deep neuro-fuzzy* menunjukkan upaya memperluas ruang prediksi meski tetap menuntut kehati-hatian terkait validitas eksternal dan kualitas dataset (Jeevarathinam dkk., 2025).

Pada area diagnostik yang lebih luas, ulasan AI/ML menekankan peningkatan akurasi diagnosis melalui analisis pola halus pada *imaging* dan EHR, termasuk pada onkologi (Gaonkar dkk., 2025). AI dalam kedokteran menggarisbawahi bahwa AI dapat menganalisis X-ray/MRI/CT dengan presisi tinggi dan mencontohkan studi AI mammografi yang dilaporkan mampu mengungguli radiolog dalam deteksi kanker payudara serta menurunkan *false negative/false positive* (Mehta, 2023). Di patologi, studi klasifikasi citra histopatologi karsinoma payudara dengan *feature fusion* dan *ensemble learning* melaporkan performa tinggi pada klasifikasi beberapa kelas karsinoma, sambil tetap mengakui kebutuhan validasi dan studi skalabilitas (Nair & Subaji, 2023).

Sintesisnya: prediksi bukan berarti “ramalan”, tetapi perhitungan risiko berbasis pola. Namun, literatur juga menuntut evaluasi yang disiplin: metrik performa, interpretabilitas, *fairness*, dan integrasi alur kerja (Nyavor, 2025), serta kesadaran atas *false positive/false negative* sebagai konsekuensi klinis (Mehta, 2023; Gaonkar dkk., 2025).

Preventif: Ketika Intervensi Lebih Murah, Lebih Dini, dan Lebih Manusiawi

Pencegahan menjadi lebih realistis ketika pemantauan menjadi kontinu dan umpan balik menjadi cepat. Pada kardiovaskular, *wearable* diposisikan sebagai paradigma baru untuk pemantauan fisiologis *real-time* dan deteksi dini, terutama untuk strategi pencegahan dan manajemen jangka panjang (Nazir, 2025). Pada sindrom metabolik, literatur menyatakan modifikasi gaya hidup adalah kunci pencegahan/manajemen kesehatan, dan *digital health care* (*wearable, mobile apps, telemedicine*) semakin integral untuk mendukung intervensi semacam itu (Lee dkk., 2024). Pada *diabetes* di populasi Asia Selatan, pendekatan presisi me-

nyoroti pemantauan digital (CGM, *wearables*, analitik AI) sebagai bagian dari deteksi dini dan stratifikasi risiko individual (Samajdar dkk., 2025).

Pada diabetes, pencegahan komplikasi juga menjadi fokus. AI dibahas untuk prediksi dan pencegahan komplikasi seperti ulkus dan kejadian hipoglikemia, yang dapat mengubah arah perawatan dari “terjadi komplikasi” menjadi “menghindari komplikasi”. *Telemedicine* berbasis AI untuk kaki diabetik di posisikan untuk edukasi dan konsultasi yang mendukung perawatan berkelanjutan, mengingat ulkus kaki diabetik merupakan komplikasi kronis yang sulit sembuh dan berkontribusi pada amputasi non-traumatik (Hidayat dkk., 2022).

Nuansa: pencegahan digital tidak otomatis efektif tanpa adopsi pasien, akses teknologi, dan validasi klinis. Literatur diabetes pediatrik menekankan hambatan seperti ketimpangan akses dan keterbatasan validasi jangka panjang (Valdespino-Saldaña, 2026), sedangkan literatur pediatri lebih luas menyoroti tantangan aksesibilitas, regulasi, integrasi dengan praktik tradisional, serta aspek etika/hukum (Memon dkk., 2025).

Personal (dan Partisipatif): Dari Rata-rata Populasi ke “Sidik Jari Biologis” Individu

Personalized medicine dipaparkan sebagai era terapi berbasis karakteristik individual, ditopang kemajuan genomik, AI, dan *multi-omics* (Shuja, 2024). Pada diabetes, heterogenitas T2DM dan kebutuhan *precision medicine* membuat model prediktif dan klasifikasi berbasis ML menjadi relevan untuk stratifikasi risiko dan penyesuaian terapi Samajdar dkk., 2025). Pada diabetes pediatrik, tinjauan sistematis menyebut intervensi AI yang terintegrasi dengan CGM, *closed-loop insulin delivery*, *telemedicine*, dan edukasi digital berasosiasi dengan perbaikan HbA1c dan *time in range*, mendukung personalisasi dosis insulin dan otonomi pasien (Valdespino-Saldaña, 2026). Di sisi diagnostik molekuler, inovasi biomarker berbasis RNA (miRNA, lncRNA, circRNA) dipaparkan sebagai kandidat untuk meningkatkan sensitivitas deteksi dini dan pemantauan diabetes (Alum dkk., 2025).

Dalam komplikasi diabetes seperti nefropati diabetik, ulasan strategi modern menekankan integrasi biomarker dan pendekatan presisi dalam diagnosis dan pencegahan/prognosis (Gumber dkk., 2025). Pada *diabesity*, ulasan menyoroti fenotipe khusus (misalnya “*thin-fat phenotype*”) dan kebutuhan strategi skrining serta intervensi

yang disesuaikan, termasuk dukungan pemantauan digital dan AI (Samajdar dkk., 2025).

Sintesisnya: personalisasi bukan sekadar memilih obat yang berbeda, tetapi menyusun model pasien dari berbagai lapisan data klinis, sensor, dan biomolekuler yang kemudian mengarahkan keputusan (Shuja, 2024; Alum dkk., 2025; Valdespino-Saldaña, 2026). Literatur juga menamai arah ini sebagai paradigma yang makin prediktif, preventif, personal, dan partisipatif, khususnya terlihat pada transformasi perawatan diabetes pediatrik (Valdespino-Saldaña, 2026).

Studi Kasus Global: Bagaimana Teknologi Mengubah Luanan Pasien

Mari kita lihat beberapa studi kasus nyata yang menggambarkan perubahan paradigma ini:

Studi Kasus 1: Deteksi Dini Kanker

- a. **Cara Lama (Reaktif):** Seorang pasien datang ke dokter setelah merasakan benjolan atau gejala lain yang mengganggu. Dokter kemudian merujuk untuk mamografi atau CT scan. Jika hasilnya positif, pengobatan dimulai, seringkali pada stadium lanjut yang lebih sulit diobati.
- b. **Cara Baru dengan AI (Prediktif & Preventif):** Ulasan AI/ML di diagnostik menyebut bahwa *deep learning* misalnya *convolutional neural networks* (CNN) meningkatkan deteksi dini di onkologi melalui analisis *imaging* (Gaonkar dkk., 2025). AI dalam kedokteran mencontohkan studi AI mamografi yang dilaporkan mengungguli radiolog dalam deteksi kanker payudara, dengan penurunan *false negative* dan *false positive* sebuah ilustrasi bagaimana AI dapat berdampak pada kualitas diagnosis dan potensi luaran pasien melalui deteksi lebih dini (Mehta, 2023). Fong dkk. (2020) juga membahas peran radiologi dalam deteksi dini kanker dan kelainan. Mereka menekankan bahwa radiologi adalah area penting dalam kedokteran untuk diagnosis dini dan pengobatan guna memastikan peluang maksimum untuk bertahan hidup (Fong dkk., 2020).

Di ranah histopatologi, pendekatan *feature fusion* dan *ensemble learning* untuk klasifikasi karsinoma payudara dilaporkan menghasilkan performa kuat pada klasifikasi beberapa kelas, menunjukkan arah otomasi analisis yang dapat mendukung keputusan klinis, sambil menegaskan perlunya validasi lanjutan dan studi skalabilitas (Nair & Subaji, 2023). Fong dkk. (2020) juga

menekankan pentingnya gambar resolusi tinggi bebas *noise* tanpa kehilangan detail halus dalam proses transmisi gambar. Mereka menyatakan bahwa pada tahap awal pembentukan tumor, terutama pada tahap CIS (*carcinoma in situ*), tkita-tkita halus mungkin tidak mudah dilihat. Ini adalah waktu kritis untuk mencegah fase invasif ketika pilihan pengobatan lain tersedia (Fong dkk., 2020). Dengan diagnosis dini, peluang kesembuhan pasien melonjak drastis dan biaya perawatan pun jauh lebih rendah.

Studi Kasus 2: Manajemen Diabetes

a. **Cara Lama (Reaktif):** Seorang pasien diabetes tipe 1 harus menusuk jarinya beberapa kali sehari untuk mengecek gula darah, lalu menghitung dosis insulin yang harus disuntikkan. Grafik gula darah hanya memberikan gambaran “cuplikan” di beberapa titik waktu. Risiko hipoglikemia (gula darah terlalu rendah) di malam hari selalu mengintai.

b. **Cara Baru dengan IoMT & AI (Personal & Preventif):** AI dalam perawatan diabetes dibahas mencakup skrining risiko, klasifikasi, dan manajemen terapi; model prediktif membantu identifikasi risiko dini dan pemahaman heterogenitas T2DM. Fong dkk. (2020) membahas tentang *continuous glucose monitors* untuk pemantauan diabetes. Tag RFID akan bertanggung jawab untuk mengirimkan data tingkat glukosa tubuh untuk analisis lanjutan (Fong dkk., 2020). Pada komplikasi, AI untuk retinopati/neuropati/kaki diabetik disebut meningkatkan aksesibilitas dan dukungan keputusan klinis (Gaonkar dkk., 2025).

Telemedicine berbasis AI untuk kaki diabetik diposisikan sebagai solusi edukasi-konsultasi yang berjalan berkelanjutan, relevan karena ulkus kaki diabetik sulit sembuh dan terkait amputasi (Hidayat dkk., 2022). Di level *self-management*, *chatbot* diabetes menunjukkan bagaimana sistem digital dapat memberi edukasi, pemantauan, dan pengingat perawatan dengan evaluasi pengujian sistem dan penerimaan pengguna (Muhammad, 2025). Untuk pemantauan glukosa, *optical glucose sensing* dipaparkan sebagai kandidat non-invasif untuk *monitoring* kontinu yang dipercepat oleh *machine learning*, meski masih menghadapi tantangan kalibrasi dan interferensi biologis (Wassan dkk., 2025). Fong dkk.

(2020) juga menggambarkan contoh sistem kontrol insulin nirkabel sederhana, di mana mikrokontroler sederhana mengatur kadar glukosa melalui umpan balik dari meter glukosa yang mengontrol jumlah insulin yang dipompa semata-mata berdasarkan pembacaan meter (Fong dkk., 2020). Pasien dapat tidur nyenyak dengan tenang, mengetahui bahwa teknologilah yang menjaga keseimbangan gulanya.

Studi kasus ini menunjukkan bahwa teknologi tidak menggantikan dokter, tetapi memberdayakan mereka dengan alat yang lebih baik untuk membuat keputusan yang lebih tepat. Dokter beralih peran dari sekadar “*diagnostikus*” dan “*pemberi resep*” menjadi “*mitra strategis*” pasien dalam mengelola kesehatan jangka panjang.

Peta Jalan Buku: Cara Membaca bagi Dokter, Peneliti, dan Praktisi IT

Bab 1 ini menempatkan Kita pada “peta besar”: transformasi kedokteran terjadi karena pertemuan data heterogen, komputasi AI/ML, dan konektivitas perangkat/telemedicine (Gaonkar dkk., 2025; Lee dkk., 2024; Nazir, 2025). Bab-bab berikutnya dalam buku ini akan mengurai pilar-pilar tersebut dari sudut pandang yang berbeda, sambil terus mengingatkan adanya tantangan nyata: privasi data, bias, validasi klinis, integrasi *workflow*, akses, regulasi, serta etika/hukum Valdespino-Saldaña, 2026; Memon dkk., 2025; Nyavor, 2025).

Buku ini dirancang sebagai kompas bagi Kita yang ingin menjelajahi lanskap baru dunia kedokteran digital yang menarik sekaligus kompleks ini. Berikut adalah peta jalan yang akan kita tempuh bersama:

- a. Untuk Dokter dan Mahasiswa Kedokteran (Praktisi Klinis):** Fokuskan bacaan pada jenis data klinis yang dianalisis AI: EHR, *imaging*, lab, sinyal sensor, dan (pada level lanjut) *multi-omics* (Gaonkar dkk., 2025; Hassan & Omenogor, 2025; Shuja, 2024). Pahami apa yang bisa dan tidak bisa dilakukan AI: contoh onkologi (mammografi/patologi), diabetes (prediksi, pemantauan, komplikasi), dan kardiovaskular (*wearable*) (Mehta, 2023; Nair & Subaji, 2023; Nazir, 2025).
- b. Untuk Peneliti (Dosen, Ilmuwan, R&D):** Gunakan buku ini sebagai penghubung antara *problem* klinis dan metode. Pahami tugas ML yang dominan di klinik: klasifikasi/skrining/ stratifikasi

risiko, prediksi komplikasi, dan *decision support* (Nyavor, 2025; Gaonkar dkk., 2025). Dalam evaluasi dan generalisasi: metrik performa (AUC-ROC, *precision/recall*), interpretabilitas, *fairness*, dan kebutuhan validasi lintas populasi (Nyavor, 2025; Valdespino-Saldaña, 2026). Eksplorasi *multi-omics* dan biomarker baru: bagaimana genomik/*multi-omics* serta biomarker RNA membentuk fondasi *precision medicine* (Shuja, 2024; Alum dkk., 2025).

- c. Untuk Praktisi IT dan Teknologi (*Engineer*, dan *Data scientist*):** Gunakan buku ini untuk memahami kebutuhan lapangan. Konektivitas sebagai infrastruktur klinis: *telemedicine*, *wearable*, aplikasi digital, serta tuntutan reliabilitas dan pengalaman pengguna (Lee dkk., 2024; Nazir, 2025; Muhammad, 2025). Perhatikan keamanan dan tata kelola: isu privasi data dan etika/hukum yang disebut sebagai tantangan adopsi Memon dkk., 2025; Nyavor, 2025). Pahami interoperabilitas kerja klinis: mengapa integrasi AI ke workflow penting agar teknologi tidak menjadi “alat tambahan” yang membebani, tetapi menjadi bagian dari praktik (Nyavor, 2025; Hassan & Omenogor, 2025).

Visi ini bukan lagi fiksi ilmiah. Ini adalah masa depan yang sedang kita bangun bersama. Kita berdiri di ambang sebuah era baru. Sebuah era di mana data dan algoritma bekerja bahu membahu dengan ilmuwan dan dokter untuk meringankan penderitaan manusia dan memperpanjang harapan hidup. Era ini penuh dengan peluang, tetapi juga menuntut kita untuk bijak dan bertanggung jawab.

BAB II

Transformasi Digital Kesehatan di Indonesia: Lanskap, Kebijakan, dan Tantangan

Pengantar

Indonesia, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.000 pulau dan 280 juta penduduk, menghadapi tantangan unik dalam mewujudkan layanan kesehatan yang merata dan berkualitas. Di tengah keterbatasan geografis dan demografis, transformasi digital hadir bukan sekadar sebagai pilihan, melainkan sebuah keniscayaan. Pemerintah Indonesia telah menetapkan arah yang jelas: membangun ekosistem kesehatan digital yang terintegrasi, dengan SATUSEHAT sebagai tulang punggungnya. Namun, perjalanan dari visi menuju realitas tidaklah linier. Bab ini akan mengupas tuntas lanskap fasilitas pelayanan kesehatan (fasyankes) di Indonesia, kebijakan yang menggerakkannya, tingkat kematangan digital yang beragam, serta tantangan khas yang hanya ditemui di bumi Nusantara.

Transformasi digital di fasyankes Indonesia berlangsung melalui kombinasi dorongan regulasi termasuk kewajiban dan standarisasi rekam medis elektronik serta pembangunan platform interoperabilitas nasional yang dikelola Kementerian Kesehatan (Kemenkes). Dalam literatur yang menjadi rujukan bab ini, dua benang merah yang paling konsisten adalah: (i) pergeseran dari sistem yang terfragmentasi menuju pertukaran data berbasis standarisasi (khususnya HL7-FHIR) melalui platform nasional, dan (ii) tantangan implementasi yang tidak hanya teknis, tetapi juga mencakup tata kelola, keamanan, aspek organisasi, serta pengalaman pengguna.

Arah tersebut tampak pada kajian penerapan interoperabilitas HL7-FHIR di puskesmas (Pradita & Fitriana, 2024), evaluasi kinerja dan keberhasilan SATUSEHAT dari perspektif pengguna dan organisasi (Lusiana & Nilogiri, 2023; Susanti & Maulana, 2024), penguatan tata kelola serta keamanan data pada inisiatif transformasi

digital Kemenkes (Indriyajati dkk., 2023), pemanfaatan integrasi data berbasis API untuk analitik rujukan melalui dashboard DaSK (Hidayat, 2022), hingga kajian yuridis yang menegaskan kewajiban dan tantangan adopsi Rekam Medis Elektronik (RME) di rumah sakit (Rubiyanti, 2023) dan isu hak privasi pasien pada layanan digital/*telemedicine* (Naurah dkk., 2024).

Sebagaimana ditegaskan dalam literatur manajemen informasi kesehatan, rekam medis adalah berkas yang berisikan catatan dan dokumen tentang identitas pasien, pemeriksaan, pengobatan, tindakan, dan pelayanan lain yang telah diberikan kepada pasien. Dokumen ini harus dibuat secara tertulis, lengkap, jelas, atau secara elektronik, dan setiap dokter atau dokter gigi dalam menjalankan praktik kedokteran wajib membuatnya. Kewajiban ini menjadi fondasi utama dalam transformasi digital kesehatan nasional (Susanto & Sugiharto, 2017).

Lanskap Fasilitas Pelayanan Kesehatan di Indonesia: Puskesmas, Klinik, dan Rumah Sakit (Pemerintah & Swasta)

Sistem pelayanan kesehatan Indonesia bertumpu pada jaringan fasilitas yang sangat luas dan beragam. Fasilitas pelayanan kesehatan (*fasyankes*) yang berkembang di Indonesia sangat beragam macamnya, diantaranya adalah rumah sakit, puskesmas, dokter keluarga, balai pengobatan, dan klinik (Susanto & Sugiharto, 2017). Puskesmas menjadi ujung tombak layanan primer, terutama di daerah kabupaten/kota, sementara rumah sakit berperan sebagai fasilitas rujukan.



Gambar 4. Fasilitas pelayanan kesehatan melalui JKN Mobile (BPJS Kesehatan Republik Indonesia)

Puskesmas: Garda Terdepan Layanan Primer dan Digitalisasi

Puskesmas dikenal sebagai tempat pelayanan primer yang mempunyai tugas memberikan pelayanan kesehatan secara menyeluruh, yaitu promotif, preventif, kuratif, dan rehabilitatif pada wilayah kerjanya. Keberadaannya yang hingga ke pelosok menjadikannya garda terdepan dalam sistem rujukan berjenjang. Untuk menjalankan tugas tersebut, puskesmas perlu didukung unit-unit pembantu dengan tugas spesifik, diantaranya unit rekam medis. Unit ini bertanggung jawab terhadap pengelolaan data pasien menjadi informasi kesehatan yang berguna bagi pengambilan keputusan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Di layanan primer, puskesmas menjadi arena penting transformasi digital karena menjadi titik kontak awal pasien dan penghasil data klinis populasi. Studi Pradita dan Fitriana (2024) menekankan bahwa sistem elektronik untuk penyelenggaraan Rekam Kesehatan Elektronik (RKE) di fasilitas kesehatan harus memiliki kompatibilitas dan interoperabilitas. Interoperabilitas RKE pada fasyankes di Indonesia diarahkan menggunakan platform layanan interoperabilitas data kesehatan yang dikelola Kemenkes dengan standarisasi HL7-FHIR. Dalam konteks puskesmas, kajian tersebut secara spesifik membahas penerapan HL7-FHIR pada interoperabilitas RKE di SIMPUS (Sistem Informasi Manajemen Puskesmas) sebagai upaya mempermudah implementasi interoperabilitas antar sistem informasi pelayanan kesehatan (Pradita & Fitriana, 2024).

Secara praktis, ini menggambarkan bahwa lanskap digital puskesmas tidak lagi semata "*komputerisasi internal*", melainkan mulai bergerak ke pola pertukaran data lintas aplikasi dan lintas tingkat layanan (primer rujukan) yang mensyaratkan standarisasi struktur data dan mekanisme integrasi (Pradita & Fitriana, 2024). Tantangan terbesar interoperabilitas RKE yang dicatat ialah data tersimpan di basis data yang berbeda, dengan format dan tipe data tidak kompatibel, sehingga menyulitkan sistem yang berbeda untuk menginterpretasi data secara benar terutama ketika belum ada platform interoperabilitas. Dengan hadirnya platform interoperabilitas nasional, tantangan "*tidak adanya platform*" secara konseptual mulai diatasi, namun tantangan heterogenitas data dan kesiapan sistem lokal tetap muncul sebagai pekerjaan implementasi (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024)

Sebagai ilustrasi nilai interoperabilitas, Pradita dan Fitriana (2024) menyinggung penggunaan HL7-FHIR pada ekosistem seperti Apple untuk menghubungkan Apple Health App dengan RKE dan perangkat wearable seperti Apple Watch. Contoh ini menegaskan bahwa manfaat standar interoperabilitas melampaui pertukaran antar fasyankes; ia dapat membuka ruang integrasi data pasien dari perangkat pribadi, yang implikasinya relevan dengan arah penguatan *patient centered care* dan *personal health record* (PHR), sebagaimana dibahas pada studi interoperabilitas PHR untuk diabetes (Riska dkk., 2024).

Klinik dan Ekosistem Layanan Digital: Fragmentasi Aplikasi

Dokter keluarga, balai pengobatan, dan klinik berperan dalam memberikan pelayanan kesehatan ringan bersifat kuratif (Susanto & Sugiharto, 2017). Fasilitas-fasilitas ini, meskipun skalanya lebih kecil, memiliki kewajiban yang sama dalam penyelenggaraan rekam medis.

Walau referensi tidak menguraikan secara khusus segmentasi klinik pemerintah vs swasta, isu yang sangat relevan bagi klinik adalah fragmentasi aplikasi kesehatan dan belum terintegrasinya data pasien. Riska dkk., (2024) menegaskan bahwa kondisi aplikasi kesehatan saat ini cenderung terfragmentasi dan belum terintegrasi penuh, dan hal ini menjadi tantangan dalam interoperabilitas PHR. Dalam lanskap layanan klinik yang beragam (baik klinik mandiri maupun jejaring), fragmentasi tersebut berdampak pada kesinambungan informasi klinis pasien, terutama untuk penyakit kronis yang memerlukan pemantauan jangka panjang seperti diabetes mellitus.

Kajian PHR untuk diabetes menunjukkan bahwa interoperabilitas dapat memungkinkan pasien mengakses data kesehatannya dan mengelola penyakit secara lebih mandiri, tetapi tantangan utama yang muncul adalah kebutuhan standarisasi data, standarisasi interoperabilitas, serta terminologi klinis (Riska dkk., 2024). Tiga tantangan ini data, pertukaran, dan terminologi secara konseptual sangat serupa dengan masalah interoperabilitas RKE lintas basis data yang dicatat pada konteks puskesmas (Pradita & Fitriana, 2024), sehingga dapat dipitang sebagai tantangan lintas tipe fasyankes (primer, klinik, hingga rujukan) ketika ingin membangun kesinambungan data pasien.

Rumah Sakit (Pemerintah dan Swasta): Kewajiban RME dan Jejaring Rujukan

Menurut World Health Organization (WHO), rumah sakit merupakan suatu bagian menyeluruh dari organisasi sosial dan medis yang memiliki fungsi memberikan pelayanan kesehatan yang lengkap kepada masyarakat, baik kuratif maupun rehabilitatif. Rumah sakit juga merupakan pusat latihan tenaga kesehatan serta sebagai tempat penelitian biososial. Unit rekam medis di rumah sakit sangat berperan untuk memelihara dan menjaga rekam medis pasien, dan menjadi salah satu penilaian pada proses akreditasi (Susanto & Sugiharto, 2017).

Pada layanan rujukan, rumah sakit merupakan produsen data klinis kompleks sekaligus simpul penting jejaring rujukan. Rubiyanti (2023) menegaskan bahwa pada 12 September 2022 Kemenkes menerbitkan Permenkes No. 24 Tahun 2022 tentang Rekam Medis, dan meskipun demikian "*belum semua*" fasyankes di Indonesia menerapkan praktik RME. Kajian yuridis tersebut juga mengaitkan penerapan RME dengan payung hukum lain seperti UU No. 47 Tahun 2021 tentang Rumah Sakit serta UU No. 29 Tahun 2004 tentang Praktik Kedokteran. Dengan demikian, lanskap rumah sakit (baik pemerintah maupun swasta) berada dalam kerangka kewajiban regulatif yang sama terkait rekam medis, meski tingkat kesiapan implementasi dapat bervariasi (Rubiyanti, 2023).

Selain aspek kewajiban, Rubiyanti (2023) juga menyebut kebutuhan dukungan tenaga nonkesehatan di bidang sistem informasi untuk menyokong implementasi RME di rumah sakit. Ini penting karena menunjukkan bahwa transformasi digital rumah sakit bukan sekadar pengadaan perangkat lunak, melainkan perubahan kapasitas organisasi, termasuk peran SDM TI dan tata kelola operasional rekam medis (Lusiana & Nilogiri, 2023; Rubiyanti, 2023).

Di sisi jejaring dan rujukan, Hidayat (2022) menyoroti bahwa sistem rujukan pasien masih dirasakan belum efektif dan efisien, dan masih banyak masyarakat belum dapat menjangkau pelayanan kesehatan sehingga terjadi penumpukan pasien di beberapa rumah sakit besar. Untuk merespons kebutuhan analitik dan visualisasi sistem rujukan, DaSK (Dashboard Sistem Kesehatan) dikembangkan sebagai portal rujukan data pemetaan SDM, fasyankes, sarana-prasarana, utilisasi, serta alur rujukan. Yang relevan untuk lanskap digital adalah mekanisme integrasi data DaSK: sumber data diperoleh dari database aplikasi RS Online, ASPAK, dan SI-SDMK milik Kemenkes yang diintegrasikan ke database DaSK melalui API. Ini menunjukkan bahwa, setidaknya untuk kebutuhan sistem rujukan dan pemetaan kapasitas, ekosistem rumah sakit telah terhubung dengan beberapa sistem pelaporan/pendataan nasional, dan integrasi teknis lintas sistem melalui API menjadi pola yang digunakan (Hidayat, 2022).

Secara konseptual, keberadaan integrasi seperti DaSK menguatkan argumen bahwa transformasi digital rumah sakit tidak hanya berkuat pada RME internal, tetapi juga pada kemampuan pelaporan dan pertukaran data untuk tujuan tata kelola sistem kesehatan (misalnya rujukan, kapasitas, dan utilisasi) (Hidayat, 2022), sejalan dengan kebutuhan interoperabilitas yang juga ditekankan pada level puskesmas melalui HL7-FHIR (Pradita & Fitriana, 2024).

Fasilitas pelayanan kesehatan mempunyai kewajiban memberikan pelayanan kesehatan sesuai dengan pokok sarannya masing-masing serta mempunyai kewajiban administrasi untuk membuat data dan memelihara rekam medis pasien. Hal ini ditegaskan dalam beberapa peraturan dan undang-undang, yaitu UU Nomor 29 Tahun 2004 tentang Praktik Kedokteran Pasal 46 ayat 1 yang berbunyi "*setiap dokter atau dokter gigi dalam menjalankan praktik kedokteran wajib membuat rekam medis*" (Susanto & Sugiharto, 2017).

Regulasi dan Kebijakan Nasional: Peran Kementerian Kesehatan, RME, dan Platform SATUSEHAT

Transformasi digital kesehatan di Indonesia tidak berjalan tanpa fondasi hukum yang kuat. Kementerian Kesehatan telah menerbitkan serangkaian regulasi yang menjadi lkitasan bagi seluruh ekosistem digital, dengan puncaknya pada pengembangan platform SATUSEHAT sebagai tulang punggung interoperabilitas data kesehatan nasional.

Hukum Rekam Medis

Penyelenggaraan rekam medis di Indonesia diatur dalam beberapa peraturan perundang-undangan. Berdasarkan Pasal 46 ayat (1) UU Nomor 29 Tahun 2004 tentang Praktik Kedokteran, setiap dokter atau dokter gigi dalam menjalankan praktik kedokteran wajib membuat rekam medis. Rekam medis sebagaimana dimaksud harus dibuat segera dan dilengkapi setelah pasien menerima pelayanan kesehatan. Setiap catatan rekam medis harus dibubuhi nama, waktu, dan tkita tangan petugas yang memberikan pelayanan atau tindakan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Pasal 47 UU Praktik Kedokteran mengatur bahwa dokumen rekam medis merupakan milik dokter, dokter gigi, atau sarana pelayanan kesehatan, sedangkan isi rekam medis merupakan milik pasien. Rekam medis harus disimpan dan dijaga kerahasiaannya oleh dokter atau dokter gigi dan pimpinan sarana pelayanan kesehatan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Undang-Undang Nomor 36 Tahun 2014 tentang Tenaga Kesehatan Pasal 70 juga menegaskan bahwa setiap tenaga kesehatan yang melaksanakan pelayanan kesehatan per-seorangan wajib membuat rekam medis penerima pelayanan kesehatan. Rekam medis tersebut harus segera dilengkapi setelah pasien selesai menerima pelayanan kesehatan, dan harus dibubuhi nama, waktu, dan tkita tangan atau paraf tenaga kesehatan yang memberikan pelayanan atau tindakan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Peraturan Menteri Kesehatan tentang Rekam Medis

Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 269/MENKES/PER/III/2008 tentang Rekam Medis merupakan instrumen yuridis yang secara khusus mengatur penyelenggaraan rekam medis. Peraturan ini mengatur tentang jenis dan isi rekam medis, tata cara penyelenggaraan, penyimpanan dan pemusnahan, kerahasiaan, kepemilikan dan pemanfaatan, tanggung jawab, pengorganisasian, serta pembinaan dan pengawasan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Pasal 5 Permenkes 269/2008 mengatur bahwa setiap dokter atau dokter gigi dalam menjalankan praktik kedokteran wajib membuat rekam medis, yang harus dibuat segera dan dilengkapi setelah pasien menerima pelayanan. Setiap pencatatan ke dalam rekam medis harus dibubuhi nama, waktu, dan tkita tangan dokter, dokter gigi, atau tenaga kesehatan tertentu yang memberikan pelayanan kesehatan secara langsung (Susanto & Sugiharto, 2017).

Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 290/MENKES/PER/III/2008 tentang Persetujuan Tindakan Kedokteran juga mengatur bahwa penjelasan mengenai tindakan medis harus dicatat dan didokumentasikan dalam berkas rekam medis oleh dokter atau dokter gigi yang memberikan penjelasan dengan mencantumkan tanggal, waktu, nama, dan tanda tangan pemberi penjelasan dan penerima penjelasan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 36 Tahun 2012 tentang Rahasia Kedokteran memberikan pengertian bahwa rekam medis adalah berkas yang berisikan catatan dan dokumen tentang identitas pasien, pemeriksaan, pengobatan, tindakan, dan pelayanan lain yang diberikan kepada pasien, termasuk dalam bentuk elektronik. Dalam hal pembukaan rahasia kedokteran dilakukan atas dasar perintah pengadilan atau dalam sidang pengadilan, maka rekam medis seluruhnya dapat diberikan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Permenkes No. 24 Tahun 2022: Tonggak Standarisasi RME

Rubiyanti (2023) menempatkan Permenkes No. 24 Tahun 2022 tentang Rekam Medis sebagai regulasi kunci yang memperjelas arah penerapan RME di Indonesia. Dalam kajian yuridisnya, Permenkes tersebut dibahas bersama UU No. 47 Tahun 2021 tentang Rumah Sakit dan UU No. 29 Tahun 2004 tentang Praktik Kedokteran sebagai lkitasan normatif yang terkait dengan penyelenggaraan rekam medis dan praktik layanan (Rubiyanti, 2023). Walau referensi tidak memuat rincian pasal demi pasal Permenkes, kajian Rubiyanti cukup untuk menegaskan dua hal kebijakan yang relevan bagi manajer rumah sakit dan pembuat kebijakan: (i) adanya kewajiban normatif dan baru yang harus diikuti, dan (ii) adanya kesenjangan implementasi ("*belum semua fasyankes menerapkan RME*") yang menjadi fokus tantangan transisi (Rubiyanti, 2023).

Rubiyanti (2023) juga menautkan nilai RME pada peningkatan keselamatan pasien dan kualitas perawatan, termasuk melalui promosi pengobatan berbasis bukti. Pernyataan ini penting untuk konteks kebijakan karena memberi rasional mengapa regulasi mendorong RME: bukan sekadar digitalisasi administratif, melainkan peningkatan mutu klinis dan keselamatan (Rubiyanti, 2023). Namun, karena kajian tersebut bersifat yuridis normatif, ia lebih kuat dalam memaparkan kewajiban dan argumentasi normatif daripada menyajikan ukuran kuantitatif keberhasilan implementasi (Rubiyanti, 2023). Celah ini kemudian dilengkapi oleh studi evaluasi SATUSEHAT yang memotret pengalaman pengguna dan faktor organisasi/teknologi (Susanti & Maulana, 2024; Lusiana & Nilogiri, 2023).

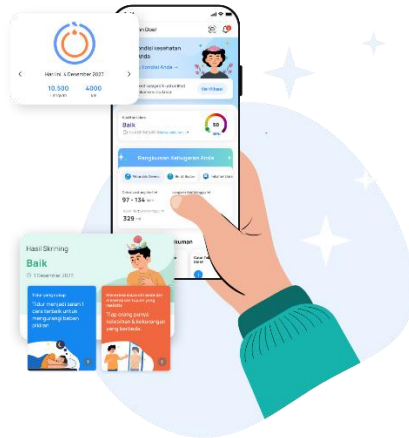
SATUSEHAT dan *Indonesia Health Services* (IHS): Platform Integrasi Data Kesehatan

Di atas kewajiban RME, pemerintah membangun platform SATUSEHAT sebagai ekosistem digital yang memungkinkan interoperabilitas data kesehatan secara nasional. Dua studi evaluasi Susanti & Maulana (2024) dan Lusiana & Nilogiri (2023) memberikan gambaran empiris bahwa SATUSEHAT diposisikan sebagai aplikasi/layanan untuk integrasi data rekam medis pasien pada tempat layanan kesehatan yang tergabung dalam *Indonesia Health Services* (IHS), dan juga dipahami sebagai layanan kesehatan berbasis mobile yang baru dikembangkan di masyarakat sehingga perlu dievaluasi kinerjanya. Penekanan “perlu dievaluasi” menunjukkan bahwa kebijakan platform nasional tidak berhenti pada peluncuran; keberhasilannya sangat ditentukan oleh kualitas layanan, kinerja sistem, keamanan, efisiensi, dan penerimaan pengguna (Susanti & Maulana, 2024; Lusiana & Nilogiri, 2023).

Evaluasi menggunakan model HOT-FIT menemukan bahwa kualitas layanan berpengaruh signifikan terhadap kepuasan pengguna, dan kepuasan pengguna berpengaruh signifikan terhadap *net benefit*; selain itu struktur organisasi juga berpengaruh signifikan terhadap *net benefit*. Ini memberi implikasi kebijakan yang jelas: adopsi SATUSEHAT di fasyankes membutuhkan intervensi pada dimensi layanan (responsivitas), tata kelola organisasi, dan manajemen perubahan, bukan hanya integrasi teknis (Lusiana & Nilogiri, 2023).

Sementara itu, evaluasi kinerja aplikasi SATUSEHAT menggunakan metode PIECES menunjukkan bahwa secara simultan variabel PIECES berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen (keberhasilan kinerja), dengan korelasi 0,762 dan R^2 76,2%. Namun, secara parsial, hanya variabel *Economics* serta *Control and Security* yang berpengaruh positif signifikan, sedangkan *Performance*, *Information and Data*, *Efficiency*, dan *Service* berpengaruh negatif signifikan. Nuansa ini penting: pada satu sisi, ada aspek yang dipersepsikan positif (ekonomi dan kontrol/keamanan), tetapi pada sisi lain, persepsi negatif pada kinerja, kualitas informasi/data, efisiensi, dan layanan mengindikasikan pekerjaan rumah pada aspek pengalaman pengguna dan kualitas teknis, yang juga selaras dengan temuan HOT-FIT tentang pentingnya kualitas layanan bagi kepuasan. Dengan kata lain, kebijakan SATUSEHAT perlu diiringi perbaikan berkelanjutan pada performa, kualitas data, dan layanan agar manfaat

integrasi dapat benar-benar dirasakan di lapangan (Susanti & Maulana, 2024; Lusiana & Nilogiri, 2023).



Gambar 5. Aplikasi satu sehat dari Kementerian Kesehatan Republik Indonesia (Kemenkes 2026)

Interoperabilitas HL7-FHIR sebagai Kebijakan Teknis

Pradita dan Fitriana (2024) secara eksplisit menyatakan bahwa interoperabilitas RKE pada fasilitas kesehatan harus menggunakan platform layanan interoperabilitas data kesehatan yang dikelola Kemenkes dengan HL7-FHIR. Ini memperlihatkan model kebijakan teknis “*platform nasional + standarisasi pertukaran*” sebagai strategi menghadapi heterogenitas sistem lokal. Kajian tersebut juga menekankan bahwa salah satu tantangan terbesar interoperabilitas adalah data berada pada basis data berbeda dengan format/tipe data tidak kompatibel, dan ketidakadaan platform interoperabilitas membuat integrasi makin sulit. Dengan demikian, kebijakan HL7-FHIR dan platform interoperabilitas dapat dipahami sebagai jawaban terhadap problem struktural yang nyata dalam sistem informasi kesehatan Indonesia: keragaman vendor, desain basis data, dan struktur data klinis (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024).

Riska dkk., (2024) menguatkan sisi lain dari argumen ini: pada konteks PHR, interoperabilitas terkendala oleh fragmentasi aplikasi serta kebutuhan integrasi data, interoperabilitas, dan terminologi klinis. Dengan demikian, seperti HL7-FHIR berperan sebagai prasyarat, tetapi belum cukup jika terminologi klinis dan pemetaan data tidak distandarisasi secara operasional. Ini mengisyaratkan

bahwa kebijakan nasional perlu mencakup bukan hanya pertukaran (FHIR), tetapi juga tata kelola terminologi dan model data yang konsisten agar pertukaran data tidak hanya “*terkirim*”, melainkan juga “*bermakna secara klinis*” (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024).

Sekretaris Direktorat Jenderal Kesehatan Lanjutan, dr. Sunarto, M.Kes, menegaskan bahwa Kementerian Kesehatan berkomitmen memberikan dukungan penuh kepada fasyankes dalam percepatan digitalisasi layanan kesehatan. Salah satunya melalui penyediaan aplikasi SIMGOS (*Sistem Informasi Manajemen Generik Open Source*) yang bersifat non-berbayar, *open source*, dan telah disesuaikan dengan nasional variabel dan metadata rekam medis. SIMGOS hadir sebagai solusi untuk membantu fasyankes dalam pengelolaan data pasien dan rekam medis secara terintegrasi, sekaligus mendukung interoperabilitas data kesehatan melalui platform SATUSEHAT.

Tata Kelola dan Keamanan Data: *Digital Transformation Office* (DTO)

Indriyajati dkk. (2023) menempatkan keamanan data sebagai komponen inti untuk mewujudkan konsep data terpadu di Kemenkes, terutama dalam konteks *big data* untuk data RME terintegrasi yang akan digunakan menganalisis kesehatan masyarakat Indonesia. Studi tersebut bertujuan merekomendasi-kan spesifikasi keamanan data untuk data *microservice* di Digital Transformation Office (DTO) Kemenkes, dengan basis analisis dokumen berupa Cetak Biru Rencana Strategi Transformasi Digital Kesehatan Tahun 2024 dan Laporan Tahunan 2022 dari situs web Kemenkes. Temuan mereka menekankan langkah perlindungan keamanan data pasien melalui autentikasi, kontrol akses, dan enkripsi.

Keterkaitan antara kebijakan keamanan dan implementasi layanan digital juga tampak pada evaluasi SATUSEHAT berbasis PIECES yang menemukan variabel *Control and Security* berpengaruh positif signifikan, serta temuan bahwa kualitas layanan dan struktur organisasi memengaruhi *net benefit* dalam model HOT-FIT. Artinya, keamanan bukan sekadar komponen teknis; ia berkelindan dengan tata kelola, persepsi pengguna, dan keberlanjutan pemanfaatan platform (Indriyajati dkk., 2023; Susanti & Maulana, 2024; Lusiana & Nilogiri, 2023).

Hak dan Privasi Pasien dalam Layanan Digital

Naurah dkk., (2024) membahas bahwa transformasi digital layanan kesehatan melalui *e-health* atau telemedicine memunculkan masalah keamanan data dan kerahasiaan medis pasien, dan menekankan bahwa regulasi terkait hak privasi medis pasien dalam layanan telemedicine telah diatur dalam perundang-undangan, namun masih diperlukan pemahaman yang lebih mendalam serta penegakan hukum yang konsisten. Mereka juga menekankan perlunya memperkuat dan mengawasi secara ketat tanggung jawab pelayanan kesehatan elektronik dalam menghadapi potensi kebocoran rahasia kedokteran.

Kajian privasi tersebut penting untuk dua alasan. Pertama, ia melengkapi diskusi keamanan data pada level arsitektur (DTO, *microservices*, enkripsi) dengan perspektif hak pasien dan tanggung jawab hukum penyelenggara layanan digital (Indriyajati dkk., 2023; Naurah dkk., 2024). Kedua, ia menegaskan bahwa “*kesiapan regulas*” tidak otomatis berarti “*kesiapan implementas*”, karena pemahaman dan penegakan menjadi faktor pembeda di lapangan (Naurah dkk., 2024), yang selaras dengan gambaran implementasi RME yang “*belum merata*” pada kajian yuridis Permenkes 24/2022 (Rubiyanti, 2023).

Tingkat Kematangan Digital Fasyankes: Dari Komputerisasi Dasar Menuju Interoperabilitas

Kematangan digital fasilitas kesehatan di Indonesia sangat bervariasi. Pemerintah melalui Kementerian Kesehatan telah melakukan pemetaan terhadap seluruh fasilitas kesehatan berdasarkan Indeks Kematangan Digital untuk mengetahui faskes mana yang sudah siap atau yang belum siap. Pemetaan ini penting untuk menentukan level kesiapan dan strategi pendampingan yang tepat. Bagian ini menyusun tahapan kematangan digital fasyankes sebagai sintesis dari bukti dalam referensi, terutama yang menyinggung fragmentasi sistem, kebutuhan integrasi API, HL7-FHIR, serta evaluasi implementasi platform nasional.



Gambar 6. Mekanisme digitalisasi kesehatan di Taiwan (Lee dkk 2022)

Tahap 1 Komputerisasi Dasar dan Digitalisasi Administrasi Internal (Silo Data)

Tahap awal kematangan biasanya berupa komputerisasi layanan dan pencatatan internal yang menghasilkan data dalam silo (terpisah per unit/instalasi atau per aplikasi). Pada tahap ini, fasyankes telah menggunakan komputer untuk administrasi dasar, namun data masih tersimpan secara terpisah. Puskesmas di daerah terpencil dan praktik mandiri kecil umumnya berada pada tahap ini.

Analisis kuantitatif menjadi penting pada tahap ini untuk mengevaluasi kelengkapan berbagai jenis formulir dan data/informasi (Susanto & Sugiharto, 2017). Dalam melakukan analisis kuantitatif, petugas rekam medis harus *"tahu"* tentang jenis formulir yang digunakan, jenis formulir yang harus ada, orang yang berhak mengisi formulir, dan orang yang harus melegalisasi penulisan (Susanto & Sugiharto, 2017).

Manifestasi masalah pada tahap ini terlihat dari penekanan bahwa tantangan interoperabilitas terbesar adalah data tersimpan pada basis data yang berbeda, dengan format/tipe data tidak kompatibel, sehingga sistem yang berbeda kesulitan menginterpretasi data (Pradita & Fitriana, 2024). Pada konteks aplikasi kesehatan yang lebih berorientasi pasien, fragmentasi juga muncul sebagai kondisi umum aplikasi kesehatan yang “*terfragmentasi dan belum terintegrasi penuh*” (Riska dkk., 2024).

Implikasinya bagi manajer fasyankes adalah: komputerisasi internal tanpa desain pertukaran data akan menimbulkan biaya integrasi di masa depan, karena heterogenitas struktur data dan terminologi menjadi hambatan utama ketika ingin naik ke tahap interoperabilitas (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024).

Tahap 2 Digitalisasi Internal dan Implementasi RME/RKE

Fasyankes mulai mengadopsi sistem informasi terintegrasi di internal institusi, seperti Sistem Informasi Manajemen Rumah Sakit (SIMRS) atau Sistem Informasi Manajemen Puskesmas (SIMPUS). Data pasien, laboratorium, farmasi, dan keuangan mulai terhubung dalam satu basis data. Pada tahap ini, fasyankes mulai menerapkan rekam medis elektronik secara internal.

Rubiyanti (2023) menegaskan adanya Permenkes No. 24 Tahun 2022 tentang Rekam Medis, tetapi “*belum semua*” fasyankes menerapkan RME. Ini menyiratkan bahwa kematangan pada tahap RME pun masih beragam antar fasilitas, meskipun dorongan regulasi sudah ada (Rubiyanti, 2023). Petugas rekam medis bertanggung jawab untuk mengevaluasi kualitas rekam medis itu sendiri guna menjamin keakuratan dan kelengkapan isi rekam medis. Analisa kuantitatif dilakukan untuk mengetahui kekurangan dari kelengkapan isi yang terdapat dalam rekam medis (Susanto & Sugiharto, 2017).

Secara organisasi, Rubiyanti (2023) juga menekankan kebutuhan rumah sakit menyediakan tenaga nonkesehatan di bidang sistem informasi untuk mendukung implementasi RME. Temuan ini selaras dengan kerangka HOT-FIT yang menempatkan kesesuaian faktor manusia–organisasi–teknologi sebagai penentu keberhasilan implementasi aplikasi kesehatan seperti SATUSEHAT (Lusiana & Nilogiri, 2023). Dengan demikian, tahap RME bukan hanya tahap “*menginstal aplikasi*”, melainkan tahap membangun kapasitas SDM, SOP, dan tata kelola data klinis (Rubiyanti, 2023; Lusiana & Nilogiri, 2023).

Tahap 3 Integrasi Internal dan Pelaporan ke Sistem Nasional (API, Pelaporan Kapasitas, dan Data Rujukan)

Setelah RME berjalan, fasilitas umumnya menghadapi kebutuhan integrasi internal (lintas unit) dan integrasi eksternal untuk pelaporan serta jejaring rujukan. Bukti konkret tentang pola integrasi eksternal berbasis API disediakan oleh DaSK: data dari aplikasi RS Online, ASPAK, dan SI-SDMK milik Kemenkes diintegrasikan ke DaSK melalui API. Ini menunjukkan bahwa arsitektur integrasi data kesehatan di Indonesia telah memanfaatkan API untuk menggabungkan berbagai sumber data operasional dan kapasitas (Hidayat, 2022).

Di sisi masalah yang ingin dipecahkan, Hidayat (2022) menekankan rujukan yang belum efektif dan efisien serta penumpukan pasien di RS besar, sehingga kebutuhan akan analitik/visualisasi jejaring rujukan menjadi relevan. Pada tahap ini, kematangan digital tidak hanya diukur dari ada/tidaknya RME, tetapi dari kemampuan fasyankes berkontribusi data yang dapat dipakai untuk keputusan sistem (misalnya alokasi rujukan dan pemetaan kapasitas) (Hidayat, 2022).

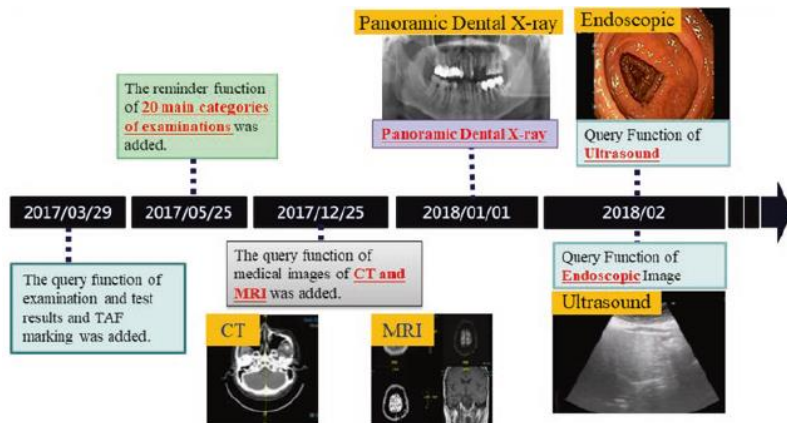
Tahap 4 Interoperabilitas Semantik dan Pertukaran Data Klinis Lintas Fasilitas: HL7-FHIR dan Platform Nasional

Tahap yang lebih maju adalah pertukaran data klinis lintas fasilitas dengan standarisasi yang memungkinkan interoperabilitas semantik. Pradita dan Fitriana (2024) menegaskan bahwa interoperabilitas RKE pada fasyankes menggunakan platform Kemenkes dengan HL7-FHIR. Pada tahap ini, tantangan yang harus dituntaskan bukan sekadar konektivitas, tetapi normalisasi data lintas basis data, penyeragaman format/tipe data, dan kemampuan sistem menerima menafsirkan data dengan benar.

Keterkaitan dengan konteks pasien juga tampak pada PHR diabetes: untuk membuat PHR interoperabel dan berguna, dibutuhkan standarisasi data dan terminologi klinis, selain standarisasi interoperabilitas. Artinya, interoperabilitas berbasis FHIR perlu ditopang tata kelola terminologi dan kualitas data agar manfaat klinis (kontinuitas perawatan, pemantauan kronis) benar-benar terjadi (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024).

Pada level kebijakan nasional, tahap ini terkait langsung dengan SATUSEHAT/IHS sebagai upaya integrasi data pasien (Lusiana & Nilogiri, 2023) dan evaluasi kinerja aplikasi SATUSEHAT di masyarakat. Interoperabilitas yang berhasil akan memengaruhi persepsi kualitas informasi dan data, yang pada evaluasi PIECES

justru ditemukan berpengaruh negatif signifikan secara parsial indikasi adanya tantangan kualitas informasi/data yang perlu diperbaiki dalam implementasi (Susanti & Maulana, 2024).



Gambar 7. Pengembangan unggahan dan berbagi gambar medis di Taiwan (Lee dkk 2022)

Tahap 5 Pemanfaatan Data untuk Analitik, Dashboard, dan Tata Kelola Sistem (*System Intelligence*)

Tahap lanjut setelah interoperabilitas adalah pemanfaatan data untuk analitik dan pengambilan keputusan. DaSK secara eksplisit dikembangkan untuk mendukung analisa dan visualisasi sistem rujukan dan memetakan SDM, fasyankes, sarana-prasarana, utilisasi, serta alur rujukan (Hidayat, 2022). Integrasi data dari beberapa sistem Kemenkes (RS Online, ASPAK, SI-SDMK) melalui API memungkinkan penyajian dashboard yang lebih terpadu (Hidayat, 2022).

Sejalan dengan itu, Indriyaji dkk., (2023) menekankan konteks *big data* untuk data RME terintegrasi yang akan digunakan untuk menganalisis data kesehatan masyarakat Indonesia, yang mensyaratkan tata pamong dan keamanan data agar “*konsep data terpadu*” dapat terwujud. Dengan demikian, kematangan tahap analitik tidak dapat dipisahkan dari keamanan (autentikasi, kontrol akses, enkripsi) dan tata kelola lintas.

Tahap 6 Layanan Berpusat pada Pasien dan Integrasi Data Personal (PHR, Aplikasi Mobile, dan Potensi *Wearable*)

Tahap paling “*dekat pasien*” dalam referensi tampak pada dua arah: (i) SATUSEHAT sebagai layanan berbasis *mobile* yang dievaluasi

kinerjanya (Susanti & Maulana, 2024) dan sebagai aplikasi integrasi data rekam medis pasien dalam ekosistem IHS (Lusiana & Nilogiri, 2023), serta (ii) PHR interoperabel untuk mendukung pengelolaan mandiri penyakit kronis seperti diabetes (Riska dkk., 2024). Riska dkk., (2024) menekankan bahwa interoperabilitas PHR dapat menjadi alat efektif agar pasien mengakses data kesehatannya dan mengelola penyakitnya, namun tantangannya adalah fragmentasi aplikasi serta kebutuhan standarisasi data/interoperabilitas/terminologi.

Pradita dan Fitriana (2024) menambahkan ilustrasi bahwa HL7-FHIR digunakan untuk menghubungkan aplikasi kesehatan dengan RKE dan perangkat *wearable* (contohnya *Apple Health App* dan *Apple Watch*). Meskipun contoh tersebut tidak spesifik Indonesia, ia menggarisbawahi bahwa ketika interoperabilitas sudah mapan, integrasi data personal berpotensi menjadi bagian dari ekosistem kesehatan digital, yang secara konseptual bersinggungan dengan PHR interoperabel (Riska dkk., 2024).

Namun, perlu ditekankan bahwa tahap ini memiliki prasyarat kuat pada aspek privasi dan keamanan. Naurah dkk., (2024) mengingatkan bahwa digitalisasi (termasuk telemedicine) memunculkan risiko kebocoran rahasia kedokteran dan menuntut penguatan tanggung jawab penyelenggara serta penegakan yang konsisten. Indriyajati dkk., (2023) menekankan kontrol akses, autentikasi, dan enkripsi sebagai langkah pengamanan data pasien. Maka, layanan berpusat pada pasien yang memperluas aliran data harus berjalan paralel dengan penguatan tata kelola dan keamanan (Indriyajati dkk., 2023; Naurah dkk., 2024).

Tantangan Unik Indonesia: Infrastruktur, Kesenjangan Digital, SDM, dan Keberagaman Sistem

Transformasi digital kesehatan di Indonesia menghadapi tantangan yang khas dan kompleks. Bagian ini membahas tantangan lapangan yang paling jelas terdokumentasi dalam referensi. Untuk isu “infrastruktur daerah terpencil” dan “kesenjangan digital”, bab ini menempatkannya sebagai kebutuhan pemetaan dan pengukuran yang perlu diturunkan ke indikator implementasi, karena data empiris spesifik dalam korpus referensi yang disediakan masih terbatas. Dengan demikian, fokus utama adalah tantangan yang dapat dilacak langsung pada temuan studi interoperabilitas, evaluasi SATUSEHAT, *dashboard* rujukan, kajian keamanan data DTO, dan kajian privasi serta yuridis RME.

Tantangan Infrastruktur di Daerah Terpencil dan Kesenjangan Digital

Kondisi geografis Indonesia yang berupa kepulauan menjadi hambatan paling mendasar. Banyak faskes di daerah terpencil belum memiliki infrastruktur TIK yang memadai, seperti koneksi internet yang stabil atau perangkat komputer yang memadai. drg. Rudy Kurniawan, M.Kes., dari Tim Transformasi Digital Kesehatan (TTDK) Pusdatin Kemenkes, menyoroti tantangan struktural seperti kondisi geografis, kompleksitas administrasi, dan keterbatasan SDM digital yang masih menghambat percepatan transformasi.

Dalam konteks ini, pimpinan sarana pelayanan kesehatan bertanggung jawab menyediakan sarana dan fasilitas untuk kegiatan unit rekam medis yang meliputi ruangan kegiatan, rak file, komputer, peralatan penunjang kegiatan. Dengan demikian petugas rekam medis dapat bekerja dengan efektif dan efisien (Susanto & Sugiharto, 2017).

Permintaan pembahasan "*infrastruktur daerah terpencil*" dan "*kesenjangan digital*" sangat relevan bagi implementasi SATUSEHAT/RME dan integrasi rujukan. Meskipun referensi tidak menyajikan pengukuran spesifik terkait kualitas jaringan, listrik, perangkat, atau indikator kesenjangan akses digital antar wilayah, bab ini dapat menyimpulkan secara berbasis evidensi bahwa ketika data berada pada basis data berbeda dan format tidak kompatibel (Pradita & Fitriana, 2024), serta ketika aplikasi terfragmentasi (Riska dkk., 2024) dan kualitas layanan memengaruhi kepuasan serta manfaat (Lusiana & Nilogiri, 2023), maka pengukuran kesiapan implementasi seharusnya mencakup bukan hanya kepatuhan regulasi RME (Rubiyanti, 2023), tetapi juga kesiapan teknis operasional yang memengaruhi kualitas layanan digital (Susanti & Maulana, 2024; Lusiana & Nilogiri, 2023) dan keamanan (Indriyajati dkk., 2023).

Kesenjangan Digital dan Kesiapan Sumber Daya Manusia

Tidak semua tenaga kesehatan memiliki tingkat literasi digital yang sama. Tidak semua tenaga kesehatan dan operator sistem informasi memiliki kompetensi digital untuk mengoperasikan sistem SatuSehat secara optimal. Pelatihan dan pendampingan masih sangat dibutuhkan. Terkait SDM, Kemenkes akan memfasilitasi fasilitas-fasilitas kesehatan khususnya di Puskesmas yang tidak memiliki kemampuan SDM secara digital.

Petugas rekam medis memiliki tanggung jawab penting dalam proses ini. Petugas rekam medis harus melakukan kegiatan analisa kualitatif dan analisa kuantitatif guna membantu dokter dalam

kegiatan pencatatan dan pengisian rekam medis yang lengkap dan akurat. Mereka bertanggung jawab untuk mengevaluasi kualitas rekam medis itu sendiri guna menjamin keakuratan dan kelengkapan isi rekam medis (Susanto & Sugiharto, 2017).

Rubiyanti (2023) menegaskan bahwa meskipun Permenkes No. 24 Tahun 2022 telah diterbitkan, belum semua fasyankes menerapkan RME. Ini adalah tantangan implementasi yang bersifat sistemik: regulasi ada, tetapi kesiapan adopsi tidak merata. Dalam kajian yang sama, rumah sakit diwajibkan menyediakan tenaga nonkesehatan di bidang sistem informasi untuk mendukung penerapan RME, yang berarti implementasi membutuhkan investasi SDM dan organisasi, bukan semata investasi perangkat.

Temuan ini berkorelasi dengan evaluasi HOT-FIT pada SATUSEHAT yang menunjukkan bahwa struktur organisasi berpengaruh signifikan terhadap *net benefit*, dan kualitas layanan memengaruhi kepuasan pengguna yang kemudian memengaruhi *net benefit* (Lusiana & Nilogiri, 2023). Dengan kata lain, bahkan bila platform nasional tersedia, manfaatnya di fasyankes dapat “*tertahan*” bila organisasi tidak siap (tata kelola, pembagian peran, dukungan layanan) (Lusiana & Nilogiri, 2023), sejalan dengan kebutuhan SDM sistem informasi yang disorot dalam konteks RME rumah sakit (Rubiyanti, 2023).

Fragmentasi dan Heterogenitas Data: Format Berbeda, Basis Data Berbeda, dan Terminologi yang Belum Seragam

Tantangan teknis paling konsisten adalah heterogenitas data. Pradita dan Fitriana (2024) menyatakan tantangan interoperabilitas RKE terbesar adalah data tersimpan pada basis data berbeda dengan beragam format/tipe data yang tidak kompatibel sehingga menyulitkan interpretasi lintas sistem. Pada konteks aplikasi pasien, Riska dkk., (2024) juga menekankan fragmentasi aplikasi kesehatan dan belum terintegrasi penuh, yang menjadi tantangan interoperabilitas PHR. Keduanya mengarah pada diagnosis yang sama: tanpa standarisasi data dan mekanisme pertukaran, integrasi akan rapuh dan mahal (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024).

Lebih spesifik, Riska dkk., (2024) menekankan bahwa standarisasi data, standarisasi interoperabilitas, dan terminologi klinis merupakan tantangan interoperabilitas PHR. Ini menguatkan bahwa persoalan bukan hanya “*mengirim data*”, melainkan menyamakan arti klinis data yang dipertukarkan (terminologi) agar dapat digunakan untuk pengambilan keputusan klinis atau pemantauan penyakit kronis (Riska dkk., 2024). Perspektif ini melengkapi fokus HL7-FHIR pada

pertukaran terstandarisasi yang dikelola Kemenkes FHIR menyediakan kerangka pertukaran, tetapi kualitas implementasi tetap bergantung pada pemetaan data dan terminologi (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024).

Pengalaman Pengguna dan Kualitas Layanan Platform Nasional

Tantangan berikutnya adalah kualitas implementasi aplikasi/platform pada level pengalaman pengguna. Susanti & Maulana (2024) menemukan bahwa dalam evaluasi PIECES, secara parsial variabel *Performance*, *Information and Data*, *Efficiency*, dan *Service* berpengaruh negatif signifikan terhadap variabel dependen (keberhasilan kinerja), sedangkan *Economics* serta *Control and Security* berpengaruh positif signifikan. Temuan ini penting untuk pengambil keputusan fasyankes: walau ada persepsi positif pada aspek ekonomi serta kontrol/keamanan, masalah pada performa, informasi/data, efisiensi, dan layanan dapat menurunkan penerimaan dan pemanfaatan (Susanti & Maulana, 2024).

Lusiana & Nilogiri (2023) melalui HOT-FIT menunjukkan bahwa kualitas layanan yang cepat dan responsif meningkatkan kepuasan pengguna, dan kepuasan meningkatkan manfaat bersih. Jika dipadukan dengan temuan PIECES, maka arah perbaikan implementasi SATUSEHAT seharusnya memprioritaskan peningkatan performa dan layanan serta kualitas informasi/data, sembari menjaga faktor kontrol dan keamanan yang telah dinilai positif (Susanti & Maulana, 2024; Lusiana & Nilogiri, 2023). Dengan demikian, tantangan “*digital maturity*” tidak hanya masalah integrasi teknis, tetapi juga masalah desain layanan, dukungan pengguna, dan manajemen kualitas (Susanti & Maulana, 2024; Lusiana & Nilogiri, 2023).

Tata Kelola, Keamanan, dan Arsitektur Data

Ketika transformasi digital bergerak menuju data terpadu dan analitik, masalah keamanan dan tata pamong menjadi semakin sentral. Indriyajati dkk. (2023) menekankan perlunya tata pamong untuk mengatur kebijakan regulasi dalam satu sistem data di Kemenkes, terutama dengan adanya *big data* untuk data RME terintegrasi yang akan digunakan menganalisis kesehatan masyarakat Indonesia. Untuk menjaga data dan mewujudkan konsep data terpadu, mereka menekankan keamanan data dan merekomendasikan langkah-langkah seperti autentikasi, kontrol akses, dan enkripsi pada lingkungan DTO dan arsitektur *microservices*.

Temuan ini beririsan dengan evaluasi SATUSEHAT berbasis PIECES yang menunjukkan *variable Control and Security* berpengaruh positif signifikan (Susanti & Maulana, 2024). Artinya, upaya keamanan tidak hanya menjawab risiko teknis, tetapi juga menjadi komponen kepercayaan pengguna (Indriyajati dkk., 2023; Susanti & Maulana, 2024). Namun, penguatan keamanan harus tetap sejalan dengan tata kelola organisasi dan kualitas layanan agar tidak menciptakan hambatan akses atau memperburuk pengalaman pengguna, yang juga menjadi perhatian dalam HOT-FIT (kualitas layanan → kepuasan → manfaat) (Lusiana & Nilogiri, 2023).



Gambar 8. Mekanisme proteksi privasi dan data medis (Lee dkk. 2022)

Privasi dan Tanggung Jawab Layanan Digital/Telemedicine

Naurah dkk., (2024) menekankan bahwa digitalisasi layanan (*e-health/telemedicine*) membawa problem keamanan data dan kerahasiaan medis pasien; meski regulasi privasi medis telah ada, masih dibutuhkan pemahaman mendalam dan penegakan hukum yang konsisten. Mereka juga menekankan perlunya penguatan dan pengawasan ketat terhadap tanggung jawab penyelenggara layanan kesehatan elektronik dalam menghadapi potensi kebocoran rahasia kedokteran.

Sebagaimana diatur dalam literatur manajemen informasi kesehatan, informasi tentang identitas, diagnosis, riwayat penyakit, riwayat pemeriksaan, dan riwayat pengobatan pasien harus dijaga kerahasiaannya oleh dokter, dokter gigi, tenaga kesehatan tertentu, petugas pengelola, dan pimpinan sarana pelayanan kesehatan. Informasi medis pasien tidak boleh sembarangan diserahkan kepada orang lain. Sumber hukum yang dapat dijadikan acuan di dalam masalah kerahasiaan suatu informasi medis yang menyangkut rekam medis pasien dapat dilihat pada pasal 48 UU RI No. 29 tahun 2004 tentang Praktik Kedokteran yaitu mengenai “Rahasia Kedokteran” pada ayat 1 bahwa *“setiap dokter atau dokter gigi dalam*

melaksanakan praktik kedokteran wajib menyimpan rahasia kedokteran” Sedangkan pada ayat 2 menyatakan bahwa “Rahasia kedokteran dapat dibuka hanya untuk kepentingan kesehatan pasien, memenuhi permintaan aparaturnya penegak hukum dalam rangka penegakan hukum, permintaan pasien sendiri, atau berdasarkan ketentuan perundang-undangan” (Susanto & Sugiharto, 2017).

Secara umum, informasi rekam medis bersifat rahasia, tetapi terdapat pengecualian. Permasalahannya adalah bagi siapa rekam medis itu dirahasiakan dan dalam keadaan bagaimana rekam medis dirahasiakan. Informasi dalam rekam medis bersifat rahasia karena hal ini menjelaskan hubungan yang khusus antara pasien dan dokter yang wajib dilindungi dari pembocoran sesuai dengan kode etik kedokteran dan peraturan perundang-undangan yang berlaku (Susanto & Sugiharto, 2017).

Keberagaman Sistem Informasi Antar Rumah Sakit dan Jejaring Rujukan

Sebelum era SATUSEHAT, setiap rumah sakit mengembangkan atau membeli SIMRS dari vendor berbeda-beda dengan standar yang tidak seragam. Banyak rumah sakit dan klinik sudah menggunakan sistem informasi kesehatan sendiri (HIS). Proses integrasi ke SatuSehat memerlukan penyesuaian teknis yang tidak selalu mudah, terutama jika sistem lama tidak sesuai dengan standarisasi interoperabilitas FHIR.

Hidayat (2022) menunjukkan adanya kebutuhan integrasi data untuk mendukung analisa dan visualisasi rujukan melalui DaSK, yang menggabungkan data dari RS Online, ASPAK, dan SI-SDMK melalui API. Pola ini menunjukkan bahwa integrasi lintas sistem sudah dilakukan, tetapi lebih dominan pada level data operasional atau kapasitas dan tata kelola rujukan (Hidayat, 2022). Sekretaris Badan Kebijakan Pembangunan Kesehatan (BKPK), Etik Retno Wiyati, menyatakan bahwa tema integrasi ini menjadi isu yang paling sering dikeluhkan oleh pemerintah daerah. *“Yang menjadi permasalahan adalah banyaknya sistem informasi yang harus diakses dan diisi oleh teman-teman”*.

Di sisi lain, interoperabilitas klinis lintas fasilitas membutuhkan standarisasi yang lebih ketat (HL7-FHIR) sebagaimana disorot pada puskesmas dan RKE (Pradita & Fitriana, 2024), dan membutuhkan penanganan terminologi dan standarisasi data sebagaimana ditegaskan dalam PHR interoperabel (Riska dkk., 2024). Dengan demikian, keberagaman sistem informasi antar RS yang secara implisit tercermin dari kebutuhan integrasi berbagai basis data dan

aplikasi (Pradita & Fitriana, 2024; Hidayat, 2022) memerlukan strategi berlapis: API untuk integrasi sistem-sistem pendataan/operasional (Hidayat, 2022) dan HL7-FHIR serta tata kelola terminologi untuk pertukaran data klinis bermakna (Pradita & Fitriana, 2024; Riska dkk., 2024).

Hak Akses dan Pelepasan Informasi

Hak akses dan rahasia medis adalah dua sisi dari satu mata uang. Hak akses memastikan hak pasien atas wewenangnyanya untuk melihat atau mengkopi data-data rekam medisnya sendiri, sedangkan rahasia medis lebih menekankan segi kerahasiaannya. Hak pasien atas isi rekam medis ditegaskan dalam Pasal 52 UU Praktik Kedokteran yang menyatakan bahwa pasien berhak mendapatkan isi rekam medis. Pasal 12 ayat (2) dan ayat (3) Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 269/MENKES/PER/III/2008 tentang Rekam Medis mengatakan bahwa isi rekam medis merupakan milik pasien yang dibuat dalam bentuk ringkasan rekam medis. Pasal 12 ayat (4) menjelaskan bahwa ringkasan rekam medis dapat diberikan, dicatat, atau dicopy oleh pasien atau orang yang diberi kuasa atau atas persetujuan tertulis pasien atau keluarga pasien yang berhak untuk itu (Susanto & Sugiharto, 2017).

Informasi medis seorang pasien dapat diberikan kepada pihak-pihak terkait antara lain: asuransi, pasien/keluarga pasien, rumah sakit yang menjadi tempat rujukan, dokter lain yang merawat pasien, kepolisian, dan untuk keperluan pengadilan. Pemberian informasi medis harus mengikuti prosedur yang berlaku, dan informasi medis dapat diberikan apabila pasien menkitatangani serta memberikan kuasa kepada pihak ketiga untuk mendapatkan informasi medis mengenai dirinya (Susanto & Sugiharto, 2017).

Penting untuk membangun budaya data, bukan hanya operator yang paham data, tapi juga kepala dinas, kepala puskesmas, kepala rumah sakit, bahkan kepala desa sekalipun. Karena keputusan terbaik itu lahir dari data yang dipahami bersama. Sebagai tenaga kesehatan, pemangku kebijakan, dan akademisi, kita semua memiliki peran dalam mewujudkan ekosistem tersebut ekosistem di mana data dan teknologi bekerja bahu-membahu untuk meningkatkan derajat kesehatan masyarakat Indonesia, dengan tetap menjunjung tinggi etika profesi dan aspek hukum yang melindungi hak-hak pasien dan tenaga kesehatan.

BAB III

Perkembangan Digitalisasi Serta Terapannya di Berbagai Lini Pelayanan

Revolusi digital dalam kesehatan tidak terjadi dalam semalam. Ia adalah akumulasi dari puluhan tahun inovasi, dimulai dari langkah sederhana mengkomputerisasi administrasi rumah sakit hingga terciptanya ekosistem data terintegrasi yang mampu menghubungkan pasien, dokter, dan pembuat kebijakan secara real-time. Memahami perjalanan ini penting karena setiap era meninggalkan warisan yang membentuk lanskap digital saat ini. Sebagaimana ditegaskan oleh Chaari (2019), evolusi kedokteran dari pendekatan tradisional menuju *Predictive, Preventive, and Personalised Medicine* (PPPM) tidak lepas dari kemajuan teknologi informasi dan komunikasi yang memungkinkan pengumpulan, pengolahan, dan analisis data kesehatan dalam skala besar.

Digitalisasi kesehatan (sering juga disebut *eHealth* atau *digital health*) dapat dipahami sebagai proses bertahap ketika layanan kesehatan mulai mengkaitkan sistem informasi untuk meningkatkan mutu layanan, efisiensi operasional, serta kemampuan koordinasi lintas unit dan lintas fasilitas. Di berbagai kawasan, dorongan digitalisasi muncul dari kebutuhan membangun “*ekosistem*” layanan kesehatan digital yang aman, saling terhubung, dan diatur oleh standarisasi serta regulasi misalnya agenda Uni Eropa untuk membentuk pasar digital termasuk layanan kesehatan digital dan standarisasi berbagai komponen seperti perlindungan data pasien dan keamanan informasi (Mwogosi, 2025).

Dalam konteks yang berbeda, pembangunan *Electronic Health Record* (EHR) juga dipikitung sebagai komponen inti informatika kesehatan yang menentukan arah layanan kesehatan digital dan *smart healthcare*, sehingga kebijakan publik menjadi instrumen penting untuk mengarahkan implementasi, alokasi sumber daya, dan tata kelolanya (Kristanto dkk., 2024).

Di Indonesia, pembahasan digitalisasi kesehatan tidak dapat dilepaskan dari evolusi sistem informasi fasilitas kesehatan, terutama sistem informasi rumah sakit (*Hospital Information System*) yang dikenal sebagai SIMRS. Kementerian Kesehatan mengharuskan rumah sakit melakukan pencatatan dan pelaporan aktivitas dalam SIMRS (Grishin & Odintsov, 2023). Di tahap yang lebih maju, rekam medis elektronik (RME/EMR) dipahami sebagai bagian penting dari SIMRS karena berhubungan langsung dengan kemampuan identifikasi informasi klinis, hasil pemeriksaan, riwayat, dan catatan pasien; sekaligus merefleksikan tren global peralihan dari rekam medis kertas ke format elektronik. Perubahan ini kemudian “*dipercepat*” oleh kewajiban regulatif: beberapa studi di Indonesia secara eksplisit mengaitkan mkitab implementasi EMR/RME dengan Peraturan Menteri Kesehatan No. 24 Tahun 2022, sembari menunjukkan bahwa kesiapan infrastruktur, kebijakan, dan SDM masih menjadi tantangan yang nyata (Chen, 2025).

Bab ini menyajikan narasi kronologis dalam bentuk “*tiga generasi*” digitalisasi kesehatan: (1) Era 1.0 yang dominan administratif dan berpusat pada sistem informasi fasilitas (mis. SIMRS), (2) Era 2.0 yang berfokus pada EMR/EHR dan konektivitas, serta (3) Era 3.0 yang menekankan integrasi data lintas sistem dan analitik (termasuk AI), berikut penerapannya di berbagai lini pelayanan dan contoh implementasi yang terdokumentasi dalam literatur.

Generasi Digitalisasi Kesehatan: Era 1.0, 2.0, dan 3.0

Digitalisasi kesehatan dapat dibagi ke dalam tiga era utama yang masing-masing memiliki ciri khas dan tonggak teknologi tersendiri. Pembagian ini membantu kita memahami bagaimana teknologi informasi perlahan-lahan meresap ke dalam sendi-sendi pelayanan kesehatan.

Era 1.0: Komputerisasi Administrasi dan Sistem Informasi Rumah Sakit (SIRS/SIMRS)

Era pertama dimulai sekitar tahun 1970-an hingga 1990-an, ketika rumah sakit mulai menggunakan komputer untuk menunjang tugas administratif. Fokus utama era ini adalah menggantikan pencatatan manual dengan sistem elektronik untuk pengelolaan data pasien, keuangan, dan inventaris. Secara historis-konseptual, tahap awal digitalisasi kesehatan sering dimulai dari kebutuhan paling “*dasar*”: menertibkan administrasi layanan melalui sistem informasi organisasi. Dalam konteks rumah sakit Indonesia, SIMRS diposisikan sebagai

instrumen untuk memastikan aktivitas rumah sakit dicatat dan dilaporkan secara sistematis sesuai kewajiban Kementerian Kesehatan (Grishin & Odintsov, 2023). Fokus Era 1.0 dengan demikian cenderung berada pada *administrative computing*: pencatatan aktivitas layanan, dukungan proses operasional, dan penguatan akuntabilitas internal melalui pelaporan.

Sistem Informasi Rumah Sakit (SIRS) generasi awal umumnya bersifat stand-alone, berjalan di komputer mainframe atau PC yang tidak terhubung satu sama lain. Data pasien tersimpan dalam basis data lokal masing-masing unit, seperti pendaftaran, laboratorium, atau farmasi, tanpa integrasi lintas fungsi. Pada masa ini, rekam medis masih didominasi kertas, sementara komputer hanya digunakan untuk membantu pencarian indeks pasien atau mencetak laporan statistik sederhana. Di Indonesia, beberapa rumah sakit besar mulai mengadopsi SIRS pada akhir 1980-an, meskipun cakupannya masih terbatas. Sebagaimana diatur dalam Permenkes No. 269 Tahun 2008, rekam medis wajib dikelola dengan baik, namun pada era 1.0, pengelolaan tersebut belum berbasis elektronik secara menyeluruh (Susanto & Sugiharto, 2017).

Namun, literatur juga menekankan bahwa implementasi sistem informasi pada tahap ini tidak otomatis “ringan” bagi organisasi. Penggunaan perangkat lunak, perangkat keras, dan *brainware* (SDM pengguna) yang tidak selaras dapat mengurangi efektivitas manajemen dan kegunaan sistem, bahkan menimbulkan beban kerja tersendiri. Nuansa ini penting: Era 1.0 sering kali menghasilkan “*digitalisasi proses*” (komputerisasi formulir/administrasi) tetapi belum sepenuhnya menghasilkan “*transformasi layanan klinis*” yang terintegrasi karena persoalan kesiapan SDM, tata kelola, dan keselarasan alur kerja dapat menghambat nilai guna sistem (Grishin & Odintsov, 2023; Chen, 2025).

Ciri utama Era 1.0:

- a. Berorientasi administrasi dan pelaporan organisasi (SIMRS sebagai kewajiban pencatatan/pelaporan aktivitas rumah sakit).
- b. Digitalisasi terfokus di level fasilitas (sistem terutama “*hidup*” di internal organisasi, belum kuat dalam pertukaran data lintas fasilitas).
- c. Tantangan dominan pada kesiapan operasional dan pengguna (ketidaksiapan *software–hardware–brainware* dapat me-nurunkan *usability* dan menambah beban kerja).

Era 2.0: Rekam Medis Elektronik (RME/EMR/EHR) dan Konektivitas

Era kedua bergulir seiring dengan meluasnya penggunaan internet dan teknologi jaringan pada akhir 1990-an hingga 2010-an. Jika Era 1.0 menekankan administrasi fasilitas, maka Era 2.0 ditkai oleh “*naiknya*” pusat gravitasi digitalisasi ke data klinis pasien: EMR/EHR. Ciri utama era ini adalah munculnya Rekam Medis Elektronik (RME) yang menggantikan rekam medis berbasis kertas. Literatur dari Indonesia menegaskan bahwa EMR menjadi implementasi penting dari SIMRS karena mencakup informasi klinis inti (identitas, riwayat, pemeriksaan, dan catatan pasien) dan menjadi substitusi rekam medis kertas (Grishin & Odintsov, 2023). RME tidak hanya menyimpan data administrasi, tetapi juga catatan klinis, hasil laboratorium, dan radiologi dalam format digital yang dapat diakses oleh berbagai unit di dalam rumah sakit berkat jaringan lokal (LAN). Integrasi internal ini memungkinkan dokter melihat riwayat pasien dari mana saja di lingkungan rumah sakit, mempercepat diagnosis, dan mengurangi duplikasi pemeriksaan.

Pada Era 2.0, tema “*konektivitas*” mulai menguat. Konektivitas di sini bukan hanya koneksi internet, melainkan juga konektivitas antar-modul dan antar-unit layanan. Studi pengembangan RME di rumah sakit yang mengacu pada integrasi dengan platform nasional menyebut adanya modul-modul layanan (mis. IGD, rawat jalan, rawat inap) yang perlu disiapkan untuk integrasi data (Sandhe dkk., 2025). Dari sudut tata kelola global, agenda integrasi dan standarisasi juga tampak di Uni Eropa: pembangunan ekosistem *eHealth* didorong oleh standarisasi dan regulasi yang menyentuh *e-prescription*, perlindungan data pasien, identitas digital, serta keamanan informasi; namun tetap menghadapi persoalan kompatibilitas lintas platform nasional, isu keamanan siber, serta pengaturan hak atas data kesehatan personal (Mwogosi, 2025). Di Tiongkok, EHR dipotret sebagai komponen inti informatika kesehatan; analisis kebijakan menunjukkan kebijakan publik memainkan peran besar dalam mendorong kualitas layanan dan inovasi teknologi melalui instrumen otoritatif dan informasi (*nodality*), diikuti instrumen organisasi dan ekonomi menggambarkan bahwa konektivitas dan skala EHR sangat dipengaruhi desain kebijakan (Kristanto dkk., 2024).

Yang khas dari Era 2.0 adalah munculnya dialektika “*manfaat vs kendala*” secara lebih nyata. Studi implementasi EMR di fasilitas kesehatan Indonesia mencatat manfaat seperti peningkatan efisiensi dan dukungan kepatuhan regulasi, tetapi juga memotret kendala

seperti resistensi perubahan, keterbatasan teknis, serta tantangan integrasi dengan sistem yang sudah ada (Faida dkk., 2022). Kajian lain merangkum hambatan dominan berupa infrastruktur tidak memadai, kebijakan yang belum jelas, pelatihan yang kurang, dan kendala konektivitas; sekaligus menekankan bahwa perencanaan pra-implementasi dan pelatihan terstruktur dapat memperbaiki keberhasilan adopsi (R dkk., 2025). Dari perspektif penerimaan pengguna, literatur menyoroti faktor-faktor penerimaan dan penggunaan sistem dan menggarisbawahi bahwa gangguan pada aspek teknologi dan SDM dapat mengurangi efektivitas pemanfaatan sistem informasi, sehingga adopsi EMR bukan semata proyek IT, melainkan perubahan organisasi (Grishin & Odintsov, 2023).

Ciri utama Era 2.0:

- a. Fokus pada data klinis pasien (EMR/EHR) sebagai inti layanan digital.
- b. Digerakkan oleh regulasi dan tata kelola (mkitab EMR di Indonesia; kebijakan EHR di Tiongkok; standarisasi dan perlindungan data di UE).
- c. Konektivitas meningkat melalui integrasi modul/layanan dan kebutuhan interoperabilitas.
- d. Manfaat efisiensi muncul, tetapi tantangan implementasi (infrastruktur, pelatihan, resistensi, integrasi) menjadi isu sentral.

Era 3.0: Data Terintegrasi, Interoperabilitas, dan Analitik

Era ketiga adalah fase di mana kita berada saat ini. Dimulai sekitar pertengahan 2010-an, era ini ditkai oleh tiga kata kunci: interoperabilitas, analitik, dan kecerdasan buatan. Era 3.0 dapat dipahami sebagai fase ketika digitalisasi kesehatan bergeser dari sekadar "*mencatat secara elektronik*" menjadi "*mengintegrasikan dan memaknai data*" untuk mendukung keputusan klinis, operasional, dan kebijakan. Data kesehatan tidak lagi hanya tersimpan di masing-masing fasilitas, tetapi mulai dihubungkan dalam ekosistem nasional melalui platform interoperabilitas seperti SATUSEHAT di Indonesia. Standarisasi pertukaran data seperti HL7-FHIR memungkinkan sistem informasi yang berbeda untuk "*berbicara*" dalam bahasa yang sama (Pradita & Fitriana, 2024).

Dalam literatur, kebutuhan integrasi tampak pada upaya menghubungkan RME fasilitas dengan platform yang berfungsi sebagai rujukan integrasi data nasional. Studi pengembangan modul RME di rumah sakit Indonesia menyebut bahwa platform SATUSEHAT dari Kementerian Kesehatan menjadi rujukan utama integrasi data RME (dengan cakupan modul IGD, rawat jalan, dan

rawat inap) pada periode setelah terbitnya mkitab RME, sekaligus menkitai bahwa integrasi masih berkembang sehingga dapat berubah dan menuntut fleksibilitas pengembangan (Sandhe dkk., 2025). Ini memberi gambaran bahwa Era 3.0 bukan hanya “*implementasi sistem*”, melainkan juga “*evolusi ekosistem*” yang dinamis (Sandhe dkk., 2025; Mwogosi, 2025).

Integrasi data lintas fasilitas membuka peluang besar untuk analitik kesehatan populasi. Data yang terkumpul dapat digunakan untuk memprediksi wabah, mengevaluasi efektivitas terapi, dan menyusun kebijakan berbasis bukti. Kecerdasan buatan (AI) dan *machine learning* mulai diterapkan untuk membantu diagnosis, misalnya dalam deteksi dini kanker payudara melalui analisis citra mamografi atau prediksi risiko diabetes dari data rekam medis. Chaari (2019) menyebut bahwa era ini sejalan dengan filosofi PPPM, di mana layanan kesehatan bergeser dari reaktif menjadi prediktif, preventif, dan personal. *Internet of Things* (IoT) juga turut memperkaya data dengan sensor yang dapat dikenakan (*wearable*) dan perangkat medis pintar yang mengirimkan data fisiologis pasien secara *real-time*.

Di tataran layanan, nilai Era 3.0 terlihat ketika data terintegrasi menghasilkan *real-time visibility* dan koordinasi lintas peran. Tinjauan naratif tentang informatik kesehatan terintegrasi menunjukkan bahwa interoperabilitas EHR, sistem pelacakan pasien, dan platform terhubung dapat meningkatkan komunikasi antar profesi dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data untuk memperlancar alur pasien dari instalasi gawat darurat hingga admisi rawat inap; dampaknya dapat berupa penurunan *length of stay* dan indikator kemacetan layanan lainnya, meski tetap ada hambatan seperti keterbatasan interoperabilitas, ketidakselarasan alur kerja, dan defisit pelatihan (Almarwani, 2024). Dengan kata lain, integrasi data bukan tujuan akhir ia harus “*menyatu*” dengan proses dan peran kerja agar menghasilkan manfaat (Grishin & Odintsov, 2023).

Pada Era 3.0 pula, analitik lanjutan dan AI mulai menonjol sebagai lapisan nilai tambah. Studi tentang penerapan AI di Tanzania menunjukkan AI dimanfaatkan untuk diagnostik, *predictive analytics*, dukungan kesehatan mental, serta edukasi kesehatan; sekaligus menyoroti kendala infrastruktur, kesiapan organisasi, kapasitas SDM, literasi digital (terutama di wilayah terpencil), dan isu etika seperti privasi data, *algorithmic bias*, serta kurangnya transparansi (Rezha & Ismah, 2024). Walau konteksnya Tanzania, temuan ini relevan sebagai ilustrasi bahwa analitik/AI membutuhkan fondasi data yang

baik dan tata kelola etis yang kuat, sejalan dengan perhatian UE pada perlindungan data, keamanan informasi, dan tantangan regulasi yang “tertinggal” dari perkembangan *eHealth* (Mwogosi, 2025).

Akhirnya, Era 3.0 juga mendorong inovasi arsitektur teknis untuk berbagi data secara aman. Usulan arsitektur terdesentralisasi untuk jaringan *Internet of Medical Things* (IoMT) menggabungkan *mobile edge computing* dan *blockchain* guna mendukung *data offloading* dan *data sharing* dalam jaringan rumah sakit terdistribusi, dengan mekanisme autentikasi berbasis *smart contract* dan tujuan memperbaiki kualitas layanan sekaligus menjaga privasi/keamanan (Nguyen dkk., 2021). Meski bersifat rancangan teknis, pendekatan ini menggambarkan arah perkembangan ketika kebutuhan integrasi lintas fasilitas bertemu dengan kebutuhan keamanan dan tata kelola akses data (Nguyen dkk., 2021; Mwogosi, 2025).

Di Indonesia, era 3.0 diwujudkan melalui kebijakan Permenkes No. 24 Tahun 2022 tentang Rekam Medis Elektronik yang mewajibkan seluruh fasilitas kesehatan menerapkan RME dan terhubung dengan platform SATUSEHAT. Integrasi data ini diharapkan mampu menciptakan kesinambungan layanan dan memudahkan akses pasien terhadap riwayat kesehatannya sendiri.

Ciri utama Era 3.0:

- a. Integrasi lintas sistem dan lintas layanan menjadi pusat (platform integrasi nasional; interoperabilitas dan kompatibilitas lintas platform sebagai isu kunci).
- b. Data dipakai untuk koordinasi operasional dan keputusan berbasis bukti (mis. manajemen alur pasien berbasis sistem terintegrasi).
- c. Analitik/AI muncul sebagai lapisan nilai, tetapi memunculkan tantangan etika, privasi, transparansi, dan kesiapan organisasi (Rezha & Ismah, 2024).
- d. Arsitektur keamanan dan tata kelola akses semakin penting (mis. *blockchainedge* untuk berbagi data aman).

Penerapan di Berbagai Lini Pelayanan

Digitalisasi telah merambah hampir semua lini pelayanan kesehatan, dari manajemen rumah sakit, layanan primer, hingga sistem rujukan. Bagian ini memetakan bagaimana tiga era tersebut “*turun*” menjadi aplikasi nyata di lini manajemen rumah sakit, layanan primer/komunitas, dan koordinasi lintas fasilitas yang sering dikaitkan dengan rujukan dan kesinambungan layanan.

Manajemen Rumah Sakit: Antrean Online, Billing Terintegrasi, dan Alur Pasien

Salah satu dampak paling terasa dari digitalisasi adalah pada manajemen rumah sakit. Sistem antrean online memungkinkan pasien mendaftar melalui aplikasi atau *website*, memilih jadwal dokter, dan mendapatkan nomor antrean tanpa harus datang pagi-pagi. Di banyak rumah sakit, sistem ini telah terintegrasi dengan BPJS Kesehatan, sehingga pasien dapat langsung mengetahui ketersediaan kuota dan estimasi waktu tunggu.

Selain itu, *billing* terintegrasi antara sistem informasi rumah sakit dan BPJS memungkinkan klaim yang lebih cepat dan transparan. Data tindakan dan diagnosis yang tercatat dalam RME langsung digunakan untuk menghitung biaya sesuai dengan tarif INA-CBGs. Susanto & Sugiharto (2017) menekankan bahwa rekam medis tidak hanya berfungsi sebagai dokumentasi medis, tetapi juga sebagai dasar pembayaran biaya pelayanan kesehatan. Dengan digitalisasi, proses ini menjadi lebih akurat dan efisien.

Dalam manajemen rumah sakit, fondasi digitalisasi berawal dari kewajiban pencatatan dan pelaporan aktivitas melalui SIMRS (Grishin & Odintsov, 2023). Pada tahap berikutnya, EMR menjadi komponen kunci karena menampung informasi klinis pasien dan menggantikan rekam medis kertas. Di lapangan, implementasi EMR di fasilitas Indonesia dilaporkan membawa manfaat efisiensi dan membantu pemenuhan kepatuhan regulasi, tetapi juga menghadapi hambatan perubahan dan keterbatasan teknis, termasuk persoalan integrasi dengan sistem yang sudah ada (Faida dkk., 2022). Temuan ini konsisten dengan kajian yang menekankan kendala infrastruktur, pelatihan, konektivitas, dan kebijakan yang belum jelas sebagai faktor yang sering menghambat adopsi EMR di rumah sakit.

Pada Era 3.0, fokus manajemen rumah sakit bergeser ke pengendalian alur layanan secara *end-to-end*. Tinjauan tentang informatik kesehatan terintegrasi menyatakan bahwa kombinasi EHR, sistem pelacakan pasien, dan platform interoperabel dapat memperbaiki visibilitas *real-time*, komunikasi antarprofesi, dan keputusan berbasis data dalam alur dari IGD ke admisi, serta berpotensi menurunkan waktu tunggu dan indikator kemacetan layanan; namun keberhasilan bergantung pada keselarasan alur kerja dan pelatihan. Dengan demikian, penerapan digital di rumah sakit tidak hanya "*mendigitalkan dokumen*", melainkan membangun kemampuan koordinasi lintas unit yang memerlukan integrasi teknologi dan perubahan peran kerja (Almarwani, 2024).

Layanan Kesehatan Primer: Aplikasi untuk Kader Kesehatan

Di tingkat puskesmas dan posyandu, digitalisasi membantu para kader kesehatan dalam mencatat data tumbuh kembang balita, imunisasi, dan ibu hamil. Aplikasi seperti Sehat Indonesia-ku atau e-Posyandu memungkinkan kader merekam data langsung dari lapangan menggunakan ponsel pintar, sehingga data dapat segera diakses oleh puskesmas dan dinas kesehatan. Hal ini sangat membantu dalam pemantauan status gizi dan deteksi dini masalah kesehatan masyarakat. Chaari (2019) menyoroti bahwa penggunaan alat digital dalam layanan primer sejalan dengan upaya mewujudkan *personalised medicine* karena data individu dapat dilacak secara longitudinal. Dengan data yang terintegrasi, intervensi kesehatan dapat lebih tepat sasaran, misalnya pemberian suplemen gizi pada balita yang mengalami *stunting*.

Di layanan primer, digitalisasi sering kali bergerak melalui adopsi EMR pada klinik atau fasilitas dengan kapasitas lebih kecil. Studi implementasi EMR di fasilitas kesehatan Indonesia (berbasis studi kasus di dua klinik) menggambarkan bahwa EMR dipkitingkatkan meningkatkan efisiensi kerja dan membantu kepatuhan terhadap regulasi terkait, tetapi juga menyoroti prasyarat penting seperti kesiapan infrastruktur, pelatihan pengguna, serta tantangan integrasi dan resistensi perubahan (Faida dkk., 2022). Secara lebih umum pada konteks rumah sakit, kajian strategi implementasi EMR di Indonesia menekankan bahwa perencanaan pra-implementasi dan pelatihan terstruktur merupakan kunci keberhasilan adopsi prinsip yang relevan pula untuk layanan primer karena keterbatasan SDM dan literasi digital dapat menjadi hambatan lintas-*setting* (Rezha & Ismah, 2024).

Literatur dari konteks negara berkembang menunjukkan arah pemanfaatan perangkat *mobile* dan AI untuk memperluas akses layanan dan edukasi kesehatan. Studi di Tanzania melaporkan penerapan AI untuk edukasi kesehatan dan dukungan kesehatan mental, serta menekankan bahwa solusi ber-basis *mobile* dapat membantu memperluas akses, tetapi keberhasilannya dipengaruhi literasi digital, kesiapan organisasi, dan infrastruktur (Rezha & Ismah, 2024). Temuan ini memberi konteks bahwa digitalisasi layanan primer/komunitas sangat mungkin mengkitalkan aplikasi *mobile* dan dukungan keputusan, tetapi tetap mensyaratkan fondasi tata kelola data dan kapasitas SDM agar aman dan efektif (Rezha & Ismah, 2024; Mwogosi, 2025).

Sistem Rujukan Digital dan Koordinasi Lintas Fasilitas

Sistem rujukan berjenjang yang selama ini sering dikeluhkan karena lambat dan tidak efisien mulai terbantu dengan digitalisasi. Di Indonesia, sistem rujukan online yang dikelola oleh BPJS Kesehatan memungkinkan faskes primer mengirim pasien ke rumah sakit rujukan dengan dilengkapi data medis awal. Rumah sakit tujuan dapat melihat ketersediaan tempat tidur secara *real-time* melalui aplikasi SISRUITE (Sistem Informasi Rujukan Terintegrasi). Hal ini mengurangi risiko pasien ditolak karena alasan kapasitas dan mempercepat penanganan. Hidayat (2022) menjelaskan bahwa pengembangan *dashboard system* Kesehatan (DaSK) yang mengintegrasikan data dari RS Online, ASPAK, dan SI-SDMK melalui API memungkinkan analisis dan visualisasi alur rujukan, sehingga pemerintah dapat memetakan kebutuhan fasilitas kesehatan secara lebih akurat.

Sistem rujukan digital (dalam pengertian koordinasi lintas fasilitas untuk kesinambungan layanan) pada dasarnya membutuhkan interoperabilitas dan mekanisme pertukaran data yang aman. Literatur UE menekankan bahwa salah satu tantangan *eHealth* adalah kompatibilitas platform kesehatan digital antarnegara serta isu keamanan siber dan pengaturan hak atas data personal (Mwogosi, 2025). Perspektif ini relevan untuk skala nasional: tanpa kesepakatan standar, keamanan, dan tata kelola, pertukaran data lintas fasilitas akan mudah terhambat (Mwogosi, 2025; Almarwani, 2024).

Dalam konteks Indonesia, arah integrasi lintas modul layanan dan rujukan data ke platform nasional dapat dilihat dari posisi SATUSEHAT sebagai rujukan utama integrasi data RME, termasuk pembagian modul layanan (IGD, rawat jalan, rawat inap) yang perlu dipetakan dan disiapkan untuk integrasi (Sandhe dkk., 2025). Karena platform integrasi masih berkembang, integrasi pun bersifat dinamis dan menuntut fleksibilitas dalam pengembangan sistem fasilitas (Sandhe dkk., 2025). Di sisi arsitektur teknis, rancangan jaringan rumah sakit terdistribusi berbasis *edgeblockchain* menunjukkan satu pendekatan untuk memungkinkan *data sharing* dan autentikasi akses tanpa otoritas terpusat, dengan sasaran meningkatkan QoS sekaligus menjaga privasi dan keamanan. Walaupun belum otomatis identik dengan “*rujukan*”, prinsip yang diangkat pertukaran data aman lintas entitas adalah jantung dari rujukan digital yang efektif (Nguyen dkk., 2021; Mwogosi, 2025).

Contoh Implementasi di Indonesia dan Dunia

Aplikasi Sehat Indonesia-ku

Sehat Indonesia-ku adalah aplikasi yang dikembangkan oleh Kementerian Kesehatan untuk mendukung integrasi data kesehatan masyarakat. Aplikasi ini dirancang untuk digunakan oleh kader kesehatan, tenaga kesehatan, dan masyarakat umum. Melalui aplikasi ini, kader dapat mencatat hasil posyandu, memantau status imunisasi, dan melaporkan temuan kasus secara *real-time*. Data yang terkumpul kemudian masuk ke dalam sistem SATUSEHAT dan dapat diakses oleh puskesmas serta dinas kesehatan untuk perencanaan intervensi.

Aplikasi ini merupakan contoh nyata bagaimana digitalisasi dapat menjangkau hingga ke lapisan terbawah sistem kesehatan. Dengan antarmuka yang sederhana dan fitur *offline*, kader di daerah terpencil pun tetap dapat menggunakannya. Chaari (2019) menekankan pentingnya *digital medicine* yang inklusif dan berpusat pada pasien; Sehat Indonesia-ku mewujudkan hal itu dengan memberdayakan masyarakat sebagai bagian dari ekosistem data kesehatan.

a. Sistem Rujukan Online Terintegrasi

Sistem rujukan online yang dioperasikan oleh BPJS Kesehatan bersama Kementerian Kesehatan merupakan salah satu tulang punggung transformasi digital layanan kesehatan di Indonesia. Setiap pasien yang dirujuk dari puskesmas ke rumah sakit harus melalui sistem ini. Data pasien, diagnosis awal, dan tujuan rujukan tercatat secara elektronik, sehingga rumah sakit tujuan dapat mempersiapkan pelayanan yang diperlukan. Keberhasilan sistem ini sangat bergantung pada interoperabilitas data antara SIMPUS di puskesmas dan SIMRS di rumah sakit. Meskipun masih ada tantangan dalam standarisasi data, upaya integrasi melalui platform SATUSEHAT terus dilakukan. Pradita & Fitriana (2024) menyoroti bahwa penggunaan standarisasi HL7-FHIR menjadi kunci untuk mencapai interoperabilitas yang mulus. Dengan demikian, sistem rujukan online tidak hanya memindahkan pasien, tetapi juga memindahkan informasi klinis yang esensial, sehingga kesinambungan perawatan tetap terjaga.

b. Integrasi RME Rumah Sakit dengan SATUSEHAT

Salah satu contoh konkret yang terdokumentasi adalah perancangan integrasi SIMRS/RME Rumah Sakit Kristen Mojowarno (modul Instalasi Gawat Darurat) dengan SATUSEHAT Kementerian Kesehatan. Studi ini mengaitkan mkitab implementasi

RME dengan Permenkes No. 24 Tahun 2022 dan menyebut SATUSEHAT sebagai rujukan utama integrasi data RME pada periode 2022 - 2024, dengan cakupan modul IGD, rawat jalan, dan rawat inap (Sandhe dkk., 2025). Menariknya, penelitian tersebut menggunakan metode *Scrum* agar pengembangan sistem fleksibel terhadap perubahan kebutuhan dan perubahan spesifikasi integrasi, karena SATUSEHAT masih dalam tahap pengembangan (Sandhe dkk., 2025). Contoh ini merepresentasikan Era 3.0 dalam praktik: integrasi nasional mendorong fasilitas untuk menata ulang pengembangan sistem internal agar adaptif, bukan sekadar "*membangun aplikasi sekali jadi*" (Sandhe dkk., 2025; Mwogosi, 2025).

c. Implementasi EMR di Klinik: Manfaat dan Kendala Praktis

Studi lain mendokumentasikan implementasi EMR pada dua klinik di Indonesia (Klinik LAPAS II Purwokerto dan Klinik PMI Purbalingga). Temuan menekankan manfaat EMR bagi efisiensi dan kepatuhan, tetapi juga memotret kendala implementasi seperti kebutuhan pelatihan, kesiapan infrastruktur, resistensi perubahan, keterbatasan teknis, dan tantangan integrasi dengan sistem lain (Faida dkk., 2022). Gambaran ini selaras dengan kajian yang lebih luas tentang hambatan adopsi EMR di rumah sakit Indonesia (infrastruktur, kebijakan, pelatihan, konektivitas) serta rekomendasi perencanaan pra implementasi dan pelatihan terstruktur. Jika Era 2.0 adalah "*gelombang adopsi EMR*", maka pengalaman klinik memperlihatkan bahwa keberhasilan adopsi sangat ditentukan faktor organisasi dan manusia, bukan semata pilihan perangkat lunak.

Standarisasi Ekosistem dan Kebijakan EHR di Dunia

a. Uni Eropa: *eHealth* sebagai Ekosistem yang Distandarisasi

Kajian tentang UE menunjukkan *digital health* dipacu oleh upaya membangun pasar digital bersama, termasuk layanan kesehatan digital, dengan dukungan regulasi/standarisasi seperti *e-prescription*, perlindungan data pasien, identitas digital, dan keamanan informasi (Mwogosi, 2025). Namun, literatur yang sama menegaskan adanya kesulitan pada kompatibilitas lintas platform nasional, isu keamanan siber, dan hak eksklusif atas data medis personal, serta risiko regulasi yang tertinggal dari perkembangan teknologi (Mwogosi, 2025). Gambaran UE ini penting sebagai "cermin" Era 3.0: semakin terintegrasi suatu ekosistem, semakin kompleks pula masalah standarisasi, keamanan, dan tata kelola data (Mwogosi, 2025; Nguyen dkk., 2021).

b. Tiongkok: EHR sebagai Pilar Informatika Kesehatan

Analisis kebijakan EHR di Tiongkok menggambarkan EHR sebagai komponen inti informatika kesehatan dan menekankan peran kebijakan untuk mengarahkan implementasi yang seimbang dan berkitaskan etika (Kristanto dkk., 2024). Studi tersebut menunjukkan dominasi instrumen otoritatif dalam mencapai tujuan kebijakan (misalnya mutu layanan dan inovasi), disertai instrumen informasi (*nodality*) dan organisasi mengindikasikan bahwa skala EHR nasional sangat bergantung pada desain perangkat kebijakan dan koordinasi kelembagaan (Kristanto dkk., 2024). Perspektif ini berisiran dengan pengalaman Indonesia ketika mkitat regulatif EMR mendorong fasilitas untuk mengadopsi dan menyesuaikan sistem, tetapi tetap membutuhkan kesiapan implementasi dan dukungan pelatihan agar efektif (Sandhe dkk., 2025; Faída dkk., 2022).

c. Inovasi Arsitektur dan AI: dari Integrasi Aman hingga Analitik dan Etika

Pada sisi teknologi, rancangan BEdgeHealth (*edge computing + blockchain*) menunjukkan arah solusi untuk berbagi data kesehatan dalam jaringan rumah sakit terdistribusi, termasuk mekanisme autentikasi terdesentralisasi dan skema pertukaran data yang dirancang untuk memperkuat privasi serta keamanan (Nguyen dkk., 2021). Di lapisan aplikasi yang lebih “*cerdas*”, studi di Tanzania memaparkan pemanfaatan AI untuk diagnostik, analitik prediktif, dukungan kesehatan mental, dan edukasi kesehatan; tetapi juga menggarisbawahi tantangan infrastruktur, kapasitas SDM, literasi digital, serta isu etika seperti privasi, bias algoritmik, dan transparansi (Rezha & Ismah, 2024). Kedua contoh ini mempertegas karakter Era 3.0: integrasi data dan analitik dapat memperluas manfaat layanan, namun hanya berkelanjutan jika didukung keamanan, tata kelola akses, dan fondasi etika yang kuat (Nguyen dkk., 2021; Rezha & Ismah, 2024; MwoGosi, 2025).

Penutup: Mengapa Fondasi Historis Ini Penting?

Perjalanan digitalisasi kesehatan dari era 1.0 hingga 3.0 menunjukkan bahwa teknologi bukan sekadar alat bantu, tetapi pengubah cara kita memberikan dan menerima layanan kesehatan. Menempatkan digitalisasi kesehatan dalam “generasi” membantu pembaca memahami bahwa transformasi digital bukan peristiwa tunggal, melainkan perjalanan bertahap: dari digitalisasi administrasi fasilitas (Era 1.0), menuju EMR/EHR sebagai pusat data klinis dengan dorongan regulatif dan kebutuhan konektivitas (Era 2.0), lalu menuju integrasi lintas sistem dan pemanfaatan analitik/AI yang menuntut interoperabilitas, keamanan, dan tata kelola etis (Era 3.0).

Dari komputerasi administrasi hingga analitik *big data*, setiap era membawa lompatan kualitas yang pada akhirnya bermuara pada satu tujuan: meningkatkan derajat kesehatan masyarakat. Di Indonesia, langkah-langkah nyata seperti penerapan RME wajib, integrasi data melalui SATUSEHAT, dan aplikasi untuk kader kesehatan adalah bukti bahwa kita sedang bergerak menuju sistem kesehatan yang lebih cerdas, responsif, dan berpihak pada pasien. Contoh Indonesia memperlihatkan bahwa mkitab regulasi dan platform integrasi nasional mendorong perubahan yang nyata, tetapi tetap memerlukan fleksibilitas pengembangan, kesiapan infrastruktur, dan investasi pelatihan agar manfaat EMR/RME benar-benar dirasakan. Sementara itu, pengalaman global (UE dan Tiongkok) mengingatkan bahwa skala ekosistem dan ambisi integrasi akan selalu beriringan dengan tantangan standarisasi, keamanan, hak data, dan desain kebijakan yang mempengaruhi kualitas implementasi. Seperti diingatkan oleh Chaari (2019), masa depan kedokteran adalah prediktif, preventif, personal, dan partisipatif dan digitalisasi adalah kendaraan utama menuju masa depan itu.

BAB IV

***Big Data* dalam Kesehatan**

Kita hidup di era di mana data dihasilkan setiap detik. Setiap langkah yang kita ambil, setiap detak jantung yang terekam oleh jam tangan pintar, setiap hasil laboratorium yang tersimpan dalam rekam medis elektronik, dan bahkan setiap unggahan media sosial tentang keluhan kesehatan semuanya adalah bagian dari ledakan data yang belum pernah terjadi sebelumnya. Dalam dunia kesehatan, fenomena ini dikenal sebagai *big data*. Namun, *big data* bukan sekadar tentang volume data yang besar. Ia adalah tentang bagaimana kita memanfaatkan kekayaan informasi tersebut untuk memahami penyakit, memprediksi risiko, dan pada akhirnya menyelamatkan nyawa.

Seperti ditegaskan oleh Chaari (2019), perkembangan kedokteran menuju *Predictive, Preventive, and Personalised Medicine* (PPPM) sangat bergantung pada kemajuan teknologi informasi dan komunikasi yang memungkinkan pengumpulan, pengolahan, dan analisis data kesehatan dalam skala besar. Tanpa kemampuan mengolah data secara cerdas, kita hanya akan tenggelam dalam lautan informasi tanpa mampu mengambil satu pun wawasan berharga.

Bab ini akan mengajak Kita menyelami dunia *big data* dalam kesehatan. Kita akan membahas apa yang dimaksud dengan *big data* melalui lensa 5V sekaligus menekankan bahwa data kesehatan sering “besar dan rumit” sehingga memerlukan data *pre-processing* dan manajemen kualitas yang ketat. Selanjutnya, kita akan menjelajahi beragam sumber data biomedis, memahami bagaimana data tersebut diolah melalui serangkaian analitik dari pembersihan hingga pemodelan yang dapat menghasilkan wawasan klinis maupun masukan kebijakan. Penekanan pada *pre-processing* dan kualitas data mengikuti temuan bahwa data *pre-processing* merupakan fondasi analisis yang valid pada data operasional berskala besar dan kompleks (Fan dkk., 2021). Data mentah (misalnya log aplikasi

kesehatan) memerlukan pembersihan dan kurasi sistematis agar kesimpulan yang diambil akurat (Savai dkk., 2022). Di konteks rumah sakit, kualitas data juga dapat terganggu oleh data curang yang memengaruhi dimensi kualitas seperti ketepatan waktu dan keterpercayaan, sehingga isu kualitas tidak dapat dipisahkan dari pembahasan *big data* kesehatan (Brahimi & Elhoussein, 2023).

Apa itu *Big data* dalam Kesehatan? Karakteristik 5V

Big data dalam kesehatan tidak cukup didefinisikan hanya dengan ukuran filenya yang besar. Dalam bab ini, *big data* kesehatan didefinisikan secara operasional sebagai himpunan data terkait kesehatan yang (a) jumlahnya besar, (b) mengalir atau diperbarui secara cepat, (c) bentuknya beragam (multi-format/multi-sumber), (d) kualitas/kebenarannya bervariasi, dan (e) berpotensi menghasilkan nilai klinis maupun nilai kebijakan bila dikelola dan dianalisis secara tepat. Kerangka 5V membantu menjelaskan karakteristik unik ini sekaligus menghubungkannya dengan praktik: literatur menegaskan bahwa *data pre-processing* adalah fondasi untuk analisis yang sah karena data dunia nyata kerap memiliki masalah kualitas (Fan dkk., 2021).



Gambar 9. Kartu kesehatan virtual mendukung pengembangan “*Digital Nation*”

Volume: Skala Data dan Implikasinya pada Pembersihan, Reduksi, dan Efisiensi

Volume mengacu pada skala data yang sangat besar. Bayangkan data yang dihasilkan oleh jutaan rekam medis elektronik di seluruh Indonesia, dikombinasikan dengan data genomik dari proyek penelitian, data *real-time* dari perangkat *wearable*, dan citra radiologi dari rumah sakit. Data ini tidak lagi terukur dalam gigabyte, melainkan petabyte atau bahkan exabyte. Seperti dicatat oleh Karray, Gharbi, & Jmaiel (2019), rekam kesehatan elektronik (EHR) sendiri mengandung beragam jenis data yang sulit diproses sekaligus, mulai dari riwayat rawat inap, data deret waktu tkita-tkita vital, laporan medis, hingga kode diagnosis dan prosedur. Volume yang besar ini menuntut infrastruktur komputasi yang mumpuni, seperti komputasi awan (*cloud computing*), untuk dapat menyimpan dan memprosesnya.

Volume yang tinggi membuat proses pembersihan dan penyiapan data menjadi pekerjaan utama, bukan sekadar langkah administratif. Tinjauan tentang *data pre-processing* pada data operasional berskala besar menempatkan *missing value imputation*, deteksi *outlier*, reduksi data, penskalaan, transformasi, dan pemartisian data sebagai komponen inti untuk membuat data siap analisis (Fan dkk., 2021). Pada kasus *log* aplikasi kesehatan, volume yang besar justru mengungkap banyaknya duplikasi, inkonsistensi, dan data hilang; pembersihan dan kurasi yang iteratif diperlukan agar data menjadi kital untuk analisis pola kerja atau performa tenaga kesehatan (Savai dkk., 2022). Untuk efisiensi komputasi pada data berdimensi tinggi, studi lain menunjukkan penggunaan reduksi fitur (misalnya PCA dan seleksi fitur berbasis *random forest*) dapat mengurangi kompleksitas dan mempercepat pemrosesan sebelum pemodelan (Songma dkk., 2023).

Velocity: Kecepatan Data Masuk dan Kebutuhan Proses yang Berulang (Iteratif)

Velocity merujuk pada seberapa cepat data dihasilkan, ditransmisikan, dan perlu diproses. Di ruang rawat inap, data tkita-tkita vital pasien seperti detak jantung, tekanan darah, dan saturasi oksigen dihasilkan setiap detik. Perangkat *wearable* mengirimkan data aktivitas harian, kualitas tidur, dan irama jantung secara kontinu. Dalam situasi gawat darurat atau pemantauan pasca operasi, kecepatan pemrosesan data bisa menjadi penentu antara hidup dan mati. Kecepatan ini menuntut sistem yang mampu menyerap, menganalisis, dan merespons aliran data secara *real-time* atau mendekati *real-time*. Walaupun referensi yang tersedia tidak me-

musatkan pembahasan pada arsitektur *real-time*, bukti pentingnya proses berulang tampak jelas: pem-bersihan *log* aplikasi kesehatan digambarkan sebagai proses sistematis dan iteratif (skrining---> diagnosis---> *treatment*) untuk menemukan inkonsistensi, duplikasi, dan *missingness* (Savai dkk., 2022).

Di sisi lain, kajian *pre-processing* menekankan bahwa kualitas analisis sangat bergantung pada langkah penyiapan data yang benar yang dalam praktiknya sering perlu diulang ketika data baru masuk atau ketika aturan kualitas diperbarui (Fan dkk., 2021). Bahkan pada konteks “lingkungan *big data*” di luar kesehatan, pembersihan dan konversi data diposisikan sebagai cara meningkatkan efisiensi pemrosesan informasi (Li dkk., 2021) sebuah analogi yang relevan ketika organisasi kesehatan harus memproses aliran data operasional yang terus bertambah (Fan dkk., 2021; Savai dkk., 2022).

Variety: Ragam Bentuk Data Biomedis dan Konsekuensi Integrasi

Variety adalah keragaman sumber dan format data. Inilah mungkin karakteristik yang paling menantang. Data kesehatan tidak lagi hanya berupa angka hasil laboratorium atau teks catatan dokter. Ia datang dalam berbagai bentuk: data terstruktur seperti kode ICD-10, data semi-terstruktur seperti file XML, dan data tidak terstruktur seperti catatan klinis naratif, gambar radiologi (DICOM), sinyal EKG, hingga data genetik. Setiap format memiliki struktur dan bahasa yang berbeda, sehingga mengintegrasikannya menjadi satu kesatuan yang utuh memerlukan pendekatan dan teknologi yang canggih.

Referensi yang tersedia menunjukkan contoh ragam ini secara implisit melalui tipe data yang berbeda: (i) data pengukuran untuk pencitraan/diagnosis seperti *electrical impedance tomography* (EIT) yang membutuhkan *pre-processing* untuk me-ningkatkan kualitas citra hasil rekonstruksi (Wang dkk., 2020); (ii) data administratif/ operasional rumah sakit yang dapat dipengaruhi oleh fraud sehingga kualitasnya berubah (Brahimi & Elhoussein, 2023); dan (iii) log aplikasi kesehatan yang menangkap jejak penggunaan aplikasi oleh tenaga kesehatan dan memerlukan kurasi agar layak dianalisis (Savai dkk., 2022). Keragaman format ini menuntut teknik *pre-processing* yang berbeda misalnya, *pre-processing* pada EIT berfokus pada peningkatan kualitas rekonstruksi citra dan ketergantungan pada algoritma rekonstruksi (Wang dkk., 2020), sedangkan pada log aplikasi kesehatan fokusnya pada konsistensi rekaman, penghapusan duplikasi, dan imputasi nilai yang hilang (Savai dkk., 2022). Kajian umum *pre-processing* juga menggarisbawahi bahwa kebutuhan

transformasi, penskalaan, dan partisi data sangat bergantung pada karakter data dan tujuan analisis (Fan dkk., 2021).

Veracity: Kebenaran/Keterpercayaan Data dan Dimensi Kualitas yang Terdampak

Veracity berkaitan dengan kualitas dan keakuratan data. Data kesehatan seringkali “kotor”: tidak lengkap, mengandung ke-salahan entri, inkonsistensi, atau bias. Misalnya, pasien mungkin tidak melaporkan seluruh riwayat penyakitnya, atau alat pengukur tekanan darah di rumah mungkin tidak terkalibrasi dengan baik. Data dari media sosial tentang keluhan kesehatan bisa jadi tidak terverifikasi. Jika data yang dimasukkan tidak berkualitas, analisis yang dihasilkan pun akan menyesatkan sebuah prinsip klasik dalam dunia komputer: *garbage in, garbage out*. Oleh karena itu, pembersihan dan validasi data menjadi langkah krusial sebelum analisis lebih lanjut.

Studi pada konteks rumah sakit menunjukkan data curang dapat menyusup dan setelah diukur efeknya terkait dengan penurunan dimensi kualitas seperti ketepatan waktu, koherensi, keterpercayaan, dan interpretabilitas (meski tidak selalu memengaruhi konsistensi) (Brahimi & Elhussein, 2023). Ini memperlihatkan nuansa penting: tidak semua dimensi kualitas bergerak searah; suatu intervensi kualitas mungkin memperbaiki aspek tertentu namun tidak aspek lain (Brahimi & Elhussein, 2023). Pada log aplikasi kesehatan, masalah *veracity* muncul dalam bentuk duplikasi, inkonsistensi, dan data hilang yang bila tidak ditangani akan menghasilkan kesimpulan yang keliru tentang pola kerja atau performa (Savai dkk., 2022). Karena itu, literatur menempatkan deteksi *outlier*, imputasi, dan pembersihan sebagai prasyarat untuk penemuan pengetahuan yang reliabel (Fan dkk., 2021).

Value: Nilai Klinis dan Kebijakan yang Muncul Setelah Data “Dipercaya” dan “Dapat Dipakai”

Value adalah tujuan akhir dari semua upaya ini: nilai tambah yang bisa diekstrak dari data. Volume yang besar, kecepatan tinggi, variasi data, dan verifikasi yang cermat tidak akan berarti jika tidak dapat menghasilkan wawasan yang bermanfaat. Nilai ini bisa berupa prediksi risiko penyakit pada seorang pasien, identifikasi faktor penyebab wabah di suatu daerah, evaluasi efektivitas suatu kebijakan kesehatan, atau penemuan biomarker baru untuk diagnosis dini kanker.

Bukti nilai ini tampak pada beberapa konteks: *pre-processing* EIT dapat meningkatkan kualitas citra hasil rekonstruksi sehingga berdampak pada kegunaan klinis pencitraan/diagnosis (Wang dkk., 2020). Pada log aplikasi kesehatan, pembersihan yang sistematis memungkinkan data dipakai untuk menganalisis pola kerja atau performa tenaga kesehatan sesuatu yang tidak dapat dilakukan secara sah bila data mentah dibiarkan apa adanya (Savai dkk., 2022). Di ranah prediksi, artikel tentang prediksi diabetes menempatkan *pre-processing* sebagai penentu kualitas model prediktif yang memutuskan apakah pasien diprediksi memiliki diabetes atau tidak (Prakash, 2024). Nilai juga dapat hadir sebagai dukungan keputusan operasional: contoh di luar kesehatan menunjukkan integrasi model prediksi untuk peramalan dan deteksi anomali sebagai masukan sistem manajemen (Moon dkk., 2024), sementara optimasi alokasi tugas dalam “*lingkungan big data*” menunjukkan bagaimana data yang dibersihkan dapat mendukung pengambilan keputusan preskriptif/optimasi (Li dkk., 2021).

Sumber Data Biomedis

Keragaman data kesehatan berasal dari berbagai sumber yang dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama: data *omics*, data klinis, dan data perilaku/digital. Karena referensi yang tersedia lebih banyak menampilkan contoh pada data klinis, pencitraan/sinyal, serta data perilaku berbasis aplikasi, pembahasan *omics* disajikan sebagai pengantar kategorisasi, sedangkan contoh aplikatif diperdalam pada tipe data yang memang dibahas eksplisit dalam referensi.

Data Omics: Genomik, Proteomik, Metabolomik

Revolusi biologi molekuler telah melahirkan berbagai disiplin ilmu yang berakhiran “-omics”, yang semuanya bertujuan untuk mempelajari secara komprehensif kumpulan molekul biologis. Data *omics* adalah tulang punggung dari kedokteran presisi. Seperti dijelaskan oleh Karray dkk. (2019), data *omics* dan EHR membuka peluang besar untuk analitik kedokteran presisi.

Secara konseptual, data *omics* dapat dipikang sebagai data molekuler yang berpotensi berukuran besar dan berdimensi tinggi. Implikasinya selaras dengan prinsip umum *pre-processing* skala besar: data berdimensi tinggi lazim memerlukan langkah reduksi/seleksi fitur, transformasi, dan partisi agar analisis menjadi efisien dan valid (Fan dkk., 2021; Songma dkk., 2023). Walaupun referensi yang tersedia tidak membahas *omics* secara spesifik, dua pelajaran metodologis tetap relevan untuk konteks *omics*: (i) reduksi

dimensi dan seleksi fitur sering dipakai untuk mengurangi kompleksitas dan mempercepat pemrosesan sebelum pemodelan (Songma dkk., 2023), dan (ii) *pre-processing* merupakan fondasi yang tidak dapat dilewati pada data besar yang kualitasnya tidak sempurna (Fan dkk., 2021).

Data Klinis: RME, Laboratorium, Pencitraan Medis, dan Data Operasional Rumah Sakit

Data klinis adalah data yang dihasilkan dari interaksi pasien dengan sistem layanan kesehatan. Ini adalah sumber data yang paling tradisional namun tetap sangat berharga.

- a. **Rekam Medis Elektronik (RME)** adalah jantung dari data klinis modern. RME berisi informasi demografis pasien, catatan perkembangan penyakit, hasil pemeriksaan fisik, diagnosis, resep obat, laporan operasi, dan ringkasan pulang. Bhatt (2021) menekankan bahwa kardiologi adalah disiplin ilmu yang sangat digerakkan oleh data, dan sebagian besar data tersebut kini terekam dalam RME. Akses ke RME, data pasien jarak jauh, dan aliran data dari perangkat digital memungkinkan pengambilan keputusan klinis yang lebih baik ketika dianalisis dengan alat analitik yang canggih.
- b. **Data Laboratorium** mencakup hasil tes darah, urine, dan pemeriksaan lainnya. Data ini umumnya terstruktur dengan baik (berupa angka atau kode) dan seringkali menjadi indikator objektif status kesehatan pasien. Tren perubahan nilai laboratorium dari waktu ke waktu dapat memberikan sinyal peringatan dini.
- c. **Data Pencitraan Medis** seperti foto rontgen, CT scan, MRI, dan USG menghasilkan data dalam jumlah besar. Sebuah CT scan dapat menghasilkan ratusan gambar (irisan) yang detail. Analisis citra medis dengan bantuan kecerdasan buatan, seperti yang dibahas oleh Bouaziz, Chaari, Batatia, & Quintero-Rincon (2019) dalam deteksi kejang epilepsi dari sinyal EEG, atau oleh Slim dkk., (2019) dalam segmentasi mikrokalsifikasi pada mammogram, adalah area yang sangat aktif dalam *big data* kesehatan. Algoritma *deep learning* kini mampu mendeteksi kelainan halus yang mungkin terlewatkan oleh mata manusia.
- d. **Data Administratif/Operasional Rumah Sakit** juga merupakan sumber data klinis penting. Studi kasus di rumah sakit menunjukkan proses untuk mengukur efek data curang selama persiapan data dimulai dari identifikasi aturan bisnis, pengukuran aturan, deteksi data curang, pembersihan, lalu pengukuran

kualitas setelah pembersihan. Temuan bahwa *fraud* memengaruhi dimensi kualitas tertentu menegaskan bahwa kualitas data klinis bukan hanya isu teknis, melainkan juga isu tata kelola dan kepatuhan proses (Brahimi & Elhoussein, 2023).

Data Perilaku/Digital: Wearable, Aplikasi mHealth, Media Sosial

Kategori ini adalah sumber data terbaru dan berkembang paling pesat, didorong oleh proliferasi perangkat digital dan media sosial.

- a. **Perangkat yang Dapat Dikenakan (*Wearable Devices*)**. Joe dkk., (2021) dalam Bhatt (2021) memberikan gambaran komprehensif tentang perangkat *wearable*. Jam tangan pintar, gelang aktivitas, bahkan pakaian pintar kini mampu mengukur detak jantung, variabilitas detak jantung, langkah kaki, kualitas tidur, kalori terbakar, dan bahkan melakukan perekaman EKG sadapan tunggal. Data ini memberikan gambaran tentang kesehatan seseorang di luar lingkungan klinis, dalam konteks kehidupan sehari-hari. Bhatt (2021) mencatat bahwa sensor dan perangkat ini memungkinkan pemantauan diskrit, yang sangat berharga untuk memahami pola kesehatan jangka panjang dan mendeteksi anomali lebih dini.
- b. **Aplikasi Kesehatan (*mHealth*)**. Data perilaku/digital juga terekam dalam *log* penggunaan aplikasi kesehatan. Studi tentang *log* aplikasi kesehatan menunjukkan bahwa data ini menangkap keterlibatan pengguna dan dapat dipakai untuk memahami pola kerja atau performa tenaga kesehatan. Namun, karena *log* adalah data mentah, dibutuhkan pembersihan dan kurasi yang *robust* agar kesimpulan akurat (Savai dkk., 2022). Studi tersebut menunjukkan berbagai masalah kualitas (inkonsistensi, duplikasi, *missing*) dan menggambarkan proses pembersihan sistematis berbasis kerangka iteratif (skrining → diagnosis → *treatment*) (Savai dkk., 2022), yang koheren dengan piktangan umum bahwa *pre-processing* adalah prasyarat analisis yang reliabel (Fan dkk., 2021).
- c. **Media Sosial dan Mesin Pencari**. Apa yang orang cari dan bagikan di dunia maya dapat menjadi indikator kesehatan populasi. Peningkatan pencarian terkait “demam” atau “batuk” di suatu wilayah dapat menjadi sinyal awal wabah flu, bahkan sebelum laporan resmi dari fasilitas kesehatan keluar. Analisis sentimen di media sosial juga dapat digunakan untuk memantau kesehatan mental masyarakat. Untuk *wearable* atau media sosial,

bab ini memkitangnya sebagai perluasan konseptual dari data perilaku/digital yang secara prinsip akan menghadapi tantangan serupa: data masuk terus menerus, rawan missingness/anomali, dan memerlukan pembersihan serta standarisasi sebelum dianalisis (Fan dkk., 2021; Savai dkk., 2022). Dalam praktik, pendekatan seperti deteksi anomali dan peramalan berbasis model sekuensial yang terbukti efektif pada data deret waktu di domain lain dapat menjadi inspirasi metodologis ketika mengolah data perilaku kesehatan yang bersifat temporal (Moon dkk., 2024).

Proses Analitik Data: dari Pemrosesan hingga Analitik Preskriptif

Memiliki data yang besar dan beragam tidaklah cukup. Data harus diolah dan dianalisis agar menghasilkan wawasan. Proses analitik data secara garis besar melewati beberapa tahapan: (1) pemrosesan dan pembersihan, (2) analitik deskriptif, (3) diagnostik, (4) prediktif, dan (5) preskriptif.

a. Pemrosesan dan Pembersihan Data (*Data Pre-processing*)

Langkah pertama dan seringkali paling memakan waktu adalah pembersihan data. Data mentah dari berbagai sumber harus dikumpulkan, diintegrasikan, dan dibersihkan dari kesalahan, duplikasi, dan inkonsistensi. Data dari RME mungkin memiliki format tanggal yang berbeda, data laboratorium mungkin memiliki satuan yang tidak seragam, dan data *wearable* mungkin memiliki derau atau nilai yang hilang akibat koneksi terputus. Proses ini disebut juga sebagai *data wrangling* atau *data munging*. Hasilnya adalah kumpulan data yang bersih, terstruktur, dan siap untuk dianalisis. Dalam konteks IoT dan perangkat yang terhubung, Chaari dkk., (2019) membahas penggunaan *compressed sensing* untuk mengatasi kendala energi dan komunikasi, yang secara tidak langsung juga berkontribusi pada efisiensi pemrosesan data.

b. Skrining masalah data dan kurasi iteratif. Pada log aplikasi kesehatan, proses pembersihan yang sistematis mengungkap inkonsistensi, duplikasi, dan data hilang yang membutuhkan imputasi; hasil akhirnya menunjukkan hanya sebagian data yang layak dianalisis (Savai dkk., 2022). Pola ini sejalan dengan pkitangan yang lebih umum bahwa *pre-processing* dibutuhkan karena kompleksitas data operasional dan defisiensi kualitas data (Fan dkk., 2021).

- c. **Penanganan missing value.** Kajian *pre-processing* merangkum imputasi sebagai salah satu pilar utama penyiapan data skala besar (Fan dkk., 2021). Contoh konkret pada data aplikasi kesehatan menunjukkan data hilang dalam log dapat muncul dan perlu penanganan agar dataset final valid (Savai dkk., 2022). Di domain lain, penggunaan pendekatan berbasis *Expectation Maximization* PCA (EM-PCA) untuk menangani nilai hilang sekaligus memilih fitur signifikan ditunjukkan dalam pipeline peramalan (Moon dkk., 2024), yang relevan sebagai contoh bahwa *missingness* dapat ditangani bersamaan dengan reduksi dimensi/seleksi fitur.
- d. **Deteksi anomali/outlier dan duplikasi.** Deteksi outlier merupakan komponen *pre-processing* yang disorot dalam tinjauan umum (Fan dkk., 2021). Dalam data aplikasi kesehatan, duplikasi dan inkonsistensi adalah masalah nyata yang harus diatasi sebelum analisis pola kerja atau performa (Savai dkk., 2022). Pada konteks keamanan siber (sebagai analogi *pipeline* data), pembersihan data dan eksplorasi data dilakukan sebelum klasifikasi; langkah ini memperlihatkan bahwa identifikasi nilai yang tidak wajar dan pembersihan merupakan praktik standarisasi sebelum pembelajaran mesin (Songma dkk., 2023).
- e. **Normalisasi/penskalaan dan transformasi.** Tinjauan *pre-processing* menempatkan penskalaan dan transformasi sebagai komponen penting (Fan dkk., 2021). Secara operasional, contoh pipeline menunjukkan normalisasi (min–max dan Z-score) sebagai langkah persiapan agar berbagai pengklasifikasi dapat bekerja lebih baik (Songma dkk., 2023). Ini dapat dipahami sebagai praktik umum ketika fitur memiliki skala berbeda dan analisis sensitif terhadap skala (Fan dkk., 2021; Songma dkk., 2023).
- f. **Reduksi dimensi dan seleksi fitur.** Reduksi data juga merupakan bagian dari *pre-processing* (Fan dkk., 2021). Contoh konkret: PCA dan seleksi fitur berbasis *random forest* dipakai untuk mengurangi fitur tidak signifikan dan menekan kompleksitas model, yang berdampak pada waktu komputasi dan performa evaluasi (Songma dkk., 2023). Pada studi peramalan, EM-PCA juga digunakan untuk memilih fitur signifikan sebagai bagian dari *pre-processing* (Moon dkk., 2024). Pada konteks “lingkungan *big data*”, pembersihan dan konversi data diposisikan sebagai cara meningkatkan efisiensi pemrosesan (Li dkk., 2021), memperkuat argumen bahwa reduksi dan standarisasi tidak hanya meningkatkan akurasi tetapi juga keterpakaian operasional.

g. Validasi kualitas dan aturan bisnis. Dalam kasus rumah sakit, pengukuran efek *fraud* dilakukan dengan pendekatan berbasis aturan bisnis: identifikasi aturan, pengukuran, deteksi *fraud*, pembersihan, lalu evaluasi kualitas setelah pembersihan (Brahimi & Elhussein, 2023). Ini menunjukkan bahwa “kualitas” tidak selalu dapat diselesaikan hanya dengan teknik statistik; ia membutuhkan definisi aturan operasional yang eksplisit (Brahimi & Elhussein, 2023), selaras dengan gagasan bahwa *pre-processing* harus menyesuaikan tujuan dan konteks data (Fan dkk., 2021).

h. Analitik Deskriptif (Apa yang Terjadi?)

Setelah data bersih, langkah pertama yang paling logis adalah bertanya, “Apa yang telah terjadi?” Analitik deskriptif menjawab pertanyaan ini dengan merangkum data historis menjadi informasi yang dapat dipahami. Contohnya adalah laporan bulanan rumah sakit yang menampilkan jumlah kunjungan pasien, rata-rata lama rawat inap, sepuluh diagnosis terbanyak, atau tren tekanan darah pasien hipertensi di suatu puskesmas. Ini adalah bentuk analitik paling dasar namun sangat penting untuk memahami kondisi saat ini.

Dalam kerangka bab ini, analitik deskriptif bertujuan merangkum apa yang terjadi pada data. Praktik eksplorasi data yang dicontohkan dalam pipeline klasifikasi (walau domainnya berbeda) menunjukkan eksplorasi data sebagai tahap awal setelah pembersihan/normalisasi untuk memahami distribusi dan karakteristik data (Songma dkk., 2023). Pada konteks kesehatan digital, *log* aplikasi kesehatan dapat dianalisis secara deskriptif untuk menggambarkan keterlibatan pengguna dan pola kerja, tetapi hanya setelah data dikurasi agar inkonsistensi dan duplikasi tidak mendistorsi ringkasan (Savai dkk., 2022). Tinjauan *pre-processing* menegaskan bahwa langkah-langkah seperti partisi data dan transformasi mendukung analisis yang valid pada dataset besar (Fan dkk., 2021).

i. Analitik Diagnostik (Mengapa Itu Terjadi?)

Analitik diagnostik melangkah lebih jauh dengan bertanya, “Mengapa hal itu terjadi?” Jika analitik deskriptif menunjukkan lonjakan kunjungan pasien dengan gejala diare pada bulan Januari, analitik diagnostik akan mencoba mencari penyebabnya. Mungkin ada korelasi dengan data curah hujan yang tinggi, atau dengan data laporan kualitas air minum di suatu daerah. Analisis ini sering melibatkan teknik seperti *drill-down*, *data discovery*, dan korelasi. Dalam studi tentang stratifikasi pasien dengan data tidak

seimbang, Karray dkk. (2019) menyoroti tantangan dalam mengidentifikasi kelompok pasien yang tepat, yang merupakan bagian dari upaya diagnostik untuk memahami heterogenitas penyakit.

Analitik diagnostik dalam bab ini mengarah pada penelusuran penyebab pola atau masalah. Contoh paling jelas adalah diagnosis masalah kualitas data: proses pembersihan *log* aplikasi kesehatan mengidentifikasi inkonsistensi, duplikasi, dan *missingness* sebagai “akar masalah” sebelum data dapat dipakai untuk menyimpulkan perilaku kerja (Savai dkk., 2022). Pada konteks rumah sakit, pendekatan aturan bisnis untuk mendeteksi dan membersihkan data curang secara eksplisit menautkan diagnosis masalah pada proses bisnis yang memungkinkan *fraud* terjadi, dan kemudian mengukur dampaknya pada dimensi kualitas tertentu (Brahimi & Elhussein, 2023). Ini sejalan dengan perspektif umum bahwa *pre-processing* bukan sekadar memperbaiki data, melainkan juga memahami sumber kesalahan dan batasan data (Fan dkk., 2021).

j. Analitik Prediktif (Apa yang Mungkin Terjadi Selanjutnya?)

Inilah ranah di mana *big data* benar-benar menunjukkan kekuatannya. Analitik prediktif menggunakan data historis dan teknik statistik, serta *machine learning*, untuk memprediksi kemungkinan kejadian di masa depan. Chaari (2019) menekankan bahwa prediksi dan pencegahan menggunakan AI memiliki potensi besar untuk melawan penyakit seperti kanker atau penyakit neurodegeneratif. Bhatt (2021) menyebutkan bahwa algoritma dapat dilatih untuk meningkatkan perawatan kronis, dan telah terbukti meningkatkan kepatuhan minum obat dan kontrol tekanan darah. Contoh konkretnya adalah model yang memprediksi risiko seorang pasien diabetes dirawat kembali di rumah sakit dalam 30 hari ke depan, atau model yang memperkirakan kemungkinan seseorang mengalami serangan jantung berdasarkan profil risiko dan data *wearable*-nya.

Contoh terkait kesehatan muncul pada artikel prediksi diabetes: tujuan akhirnya adalah memprediksi apakah pasien memiliki diabetes, dan *pre-processing* diposisikan sebagai tahap penentu untuk menyiapkan data berkualitas bagi model (Prakash, 2024). Contoh metodologis dari domain lain menunjukkan kombinasi model (XGBoost dan LSTM-AE) dapat mencapai metrik prediksi yang tinggi untuk peramalan deret waktu dan sekaligus deteksi anomali, dengan *pre-processing* (EM-PCA) untuk menangani nilai hilang dan memilih fitur (Moon dkk., 2024). *Pipeline* klasifikasi lain menunjukkan serangkaian algoritma pembelajaran mesin dapat

dibandingkan setelah pembersihan, normalisasi, dan seleksi fitur, dengan beberapa model unggul dalam ROC dan waktu komputasi (Songma dkk., 2023). Ketiga contoh ini konsisten dalam satu pesan: prediksi yang baik bergantung pada kualitas *pre-processing* dan pemilihan fitur/model yang sesuai (Moon dkk., 2024; Prakash, 2024; Songma dkk., 2023)

k. Analitik Preskriptif (Apa yang Sebaiknya Dilakukan?)

Ini adalah tahap analitik paling canggih, yang tidak hanya memprediksi apa yang akan terjadi, tetapi juga merekomendasikan tindakan apa yang sebaiknya diambil. Analitik preskriptif menjawab pertanyaan, "Apa yang harus kita lakukan?" Dengan menggunakan teknik simulasi dan optimasi, sistem dapat memberikan rekomendasi yang dipersonalisasi. Misalnya, berdasarkan prediksi risiko readmisi pasien, sistem dapat merekomendasikan jadwal kunjungan lanjutan yang lebih ketat, penyesuaian dosis obat, atau intervensi gaya hidup tertentu. Bhatt (2021) menyebutkan bahwa diagnosis seperti fibrilasi atrium, gagal jantung, dan evaluasi pra dan pasca-prosedur adalah area yang siap untuk paradigma perawatan campuran dengan panduan yang jelas untuk evaluasi dan manajemen. Analitik preskriptif inilah yang menjadi ujung tombak dari perawatan yang benar-benar personal dan proaktif.

Dalam kerangka bab ini, analitik preskriptif mengarah pada rekomendasi tindakan atau optimasi berbasis data. Referensi yang tersedia memberi contoh preskriptif terutama dari domain luar kesehatan: optimasi dekomposisi dan alokasi tugas produksi dalam "lingkungan *big data*" menggunakan pembersihan/ konversi data untuk meningkatkan efisiensi pemrosesan dan kemudian membangun model optimasi yang mempertimbangkan waktu, biaya, dan layanan (Li dkk., 2021). Studi peramalan energi juga menekankan tujuan integrasi model prediksi ke sistem manajemen untuk pengambilan keputusan dan respons *real-time*, termasuk deteksi anomali (Moon dkk., 2024). Walau konteksnya bukan klinis, kedua studi ini membantu menjelaskan bentuk preskriptif: setelah prediksi/diagnosis tersedia, langkah berikutnya adalah menyusun kebijakan operasional atau alokasi sumber daya secara sistematis (Moon dkk., 2024; Li dkk., 2021) sebuah pola yang dapat dianalogikan untuk kebijakan kesehatan berbasis data ketika data klinis dan operasional telah dibersihkan dan dipercaya (Brahimi & Elhussein, 2023; Savai dkk., 2022).

Contoh Terapan Prediksi Wabah Penyakit

Salah satu aplikasi *big data* yang paling berdampak adalah prediksi dan pelacakan wabah penyakit. Dengan menganalisis data dari berbagai sumber, seperti data pencarian Google, unggahan media sosial, data penjualan obat bebas di apotek, dan data kunjungan ke fasilitas kesehatan, para peneliti dapat mendeteksi peningkatan aktivitas penyakit jauh sebelum laporan resmi keluar. Di masa pandemi COVID-19, pemodelan penyebaran penyakit menggunakan data mobilitas penduduk dari ponsel menjadi alat penting bagi pembuat kebijakan untuk mengambil keputusan tentang pembatasan sosial. Pendekatan ini sejalan dengan visi PPPM yang menekankan pada tindakan preventif (Chaari, 2019).

Dalam skenario wabah, sasaran kebijakan biasanya adalah mendeteksi kenaikan kasus lebih dini dan mengarahkan intervensi (komunikasi risiko, alokasi tenaga, kesiapan fasilitas). Untuk mendekati sasaran itu, organisasi sering memerlukan data yang masuk cepat dan beragam, sehingga keberhasilan sangat bergantung pada *pre-processing* dan kualitas data (Fan dkk., 2021; Savai dkk., 2022).

Salah satu sumber yang relevan dari referensi adalah *log* aplikasi kesehatan yang menangkap aktivitas penggunaan aplikasi oleh tenaga kesehatan; *log* dapat memberi sinyal operasional tentang pola kerja atau aktivitas layanan, tetapi mentahnya data menyebabkan banyak inkonsistensi/ duplikasi/data hilang dan perlu pembersihan sistematis agar sinyalnya tidak palsu (Savai dkk., 2022). Prinsip umum *pre-processing* imputasi, deteksi *outlier*, transformasi, partisi menjadi kerangka untuk menyiapkan data sebelum dipakai sebagai sinyal pemantauan (Fan dkk., 2021).

Untuk peramalan deret waktu dan deteksi anomali, studi peramalan menunjukkan pendekatan *ensemble* XGBoost dan LSTM-AE dapat dipakai untuk memprediksi pola konsumsi dan mendeteksi anomali, dengan *pre-processing* EM-PCA untuk menangani nilai hilang dan memilih fitur (Moon dkk., 2024). Dalam konteks wabah, metode seperti itu dapat diposisikan sebagai inspirasi: (i) peramalan *baseline* "normal", lalu (ii) deteksi deviasi/anomali terhadap *baseline*. Namun, bab ini menekankan bahwa adaptasi ke wabah harus didahului pembersihan data yang ketat, karena studi *log* aplikasi kesehatan menunjukkan data mentah dapat membuat sebagian besar rekaman tidak layak analisis (Savai dkk., 2022), dan tinjauan

preprocessing menegaskan kualitas data adalah prasyarat penemuan pengetahuan yang reliabel (Fan dkk., 2021).

Keluaran yang masuk akal adalah *dashboard* ringkas (deskriptif) dan indikator anomali (prediktif) yang dapat memicu investigasi (diagnostik). Akan tetapi, validitasnya harus ditopang tata kelola kualitas data, termasuk mekanisme aturan/validasi untuk mencegah data tidak sah atau manipulatif (analog dengan kerangka pengukuran dampak *fraud* berbasis aturan bisnis pada data rumah sakit) (Brahimi & Elhussein, 2023). Dengan kata lain, kebijakan berbasis prediksi wabah memerlukan kombinasi: *pipeline* data yang bersih (Fan dkk., 2021), pembersihan yang terbukti efektif pada data kesehatan digital (Savai dkk., 2022), dan kontrol *veracity* melalui aturan proses (Brahimi & Elhussein, 2023).

Identifikasi Faktor Risiko Penyakit Kronis

Big data memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi faktor risiko penyakit kronis dengan cara yang belum pernah dilakukan sebelumnya. Alih-alih hanya mengkaitkan studi kohort terbatas, peneliti kini dapat menganalisis data dari jutaan individu yang tercatat dalam RME dan basis data asuransi kesehatan. Sebagai contoh, dengan menganalisis data EHR dari ratusan ribu pasien, para ilmuwan dapat mengidentifikasi hubungan baru antara kebiasaan tidur (dari data *wearable*) dengan risiko diabetes, atau antara polusi udara (data lingkungan) dengan kejadian stroke di suatu wilayah. Bhatt (2021) menyebutkan bahwa pemantauan jarak jauh dengan perangkat *wearable* memungkinkan deteksi dini dekomposisi, sehingga intervensi dapat dilakukan lebih cepat dan tepat sasaran. Studi tentang deteksi kelelahan pengemudi menggunakan jaringan Bayesian oleh Bani, Akrouf, & Mahdi (2019) juga merupakan contoh bagaimana data dari berbagai sensor dapat diintegrasikan untuk memprediksi risiko kecelakaan.

Pada penyakit kronis, tujuan kebijakan sering berupa penajaman skrining dan intervensi pencegahan. Contoh referensi yang tersedia adalah prediksi diabetes, di mana *pre-processing* digunakan untuk menghasilkan data bersih dan berkualitas agar model dapat memprediksi status diabetes pasien (Prakash, 2024).

Langkah praktik yang dapat direplikasi meliputi:

- a. **Kurasi kualitas data sebelum pemodelan.** Prinsip yang ditekankan pada kajian *pre-processing* imputasi, deteksi *outlier*, transformasi, *scaling*, partisi memberi daftar langkah yang dapat diadaptasi untuk dataset klinis kronis (Fan dkk., 2021). Artikel

diabetes juga menempatkan *pre-processing* sebagai tahap penting untuk menyiapkan data sebelum prediksi (Prakash, 2024).

- b. Normalisasi dan seleksi fitur agar model stabil dan efisien.** *Pipeline* klasifikasi menunjukkan praktik normalisasi (min–max/Z-score) dan reduksi/seleksi fitur (PCA + *random forest*) dapat meningkatkan efisiensi dan performa model pada dataset berdimensi banyak (Songma dkk., 2023). Untuk identifikasi faktor risiko, pendekatan seleksi fitur seperti ini dapat dipakai untuk menyaring variabel paling informatif sebelum model final dibangun (dengan catatan interpretasi klinis tetap dibutuhkan).
- c. Pemodelan prediktif dan evaluasi.** Artikel diabetes mengarahkan analisis pada keluaran klasifikasi (diabetes/tidak) (Prakash, 2024). Contoh evaluasi berbasis berbagai model ML dan metrik (mis. ROC) ditunjukkan pada studi klasifikasi lain setelah rangkaian *pre-processing* (Songma dkk., 2023), sementara studi peramalan menunjukkan metrik *error* dan R^2 sebagai cara menilai model prediksi dalam konteks deret waktu (Moon dkk., 2024). Bab ini menggarisbawahi bahwa pemilihan metrik harus sesuai tujuan (skrining vs pemantauan vs manajemen sumber daya), tetapi selalu berangkat dari data yang telah dibersihkan (Fan dkk., 2021; Prakash, 2024; Songma dkk., 2023).
- d. Dari model ke kebijakan.** Setelah model risiko terbentuk, kebijakan dapat memprioritaskan kelompok berisiko tinggi untuk edukasi atau skrining lebih intensif. Namun, bab ini menekankan dua pengaman berbasis bukti referensi: (i) jaga *veracity* karena data curang dapat mengubah dimensi kualitas dan berisiko menggeser prioritas intervensi secara keliru (Brahimi & Elhussein, 2023); dan (ii) dokumentasikan dan standarkan *pre-processing* karena data mentah dapat mengandung duplikasi/ inkonsistensi yang mengubah hasil model bila tidak ditangani secara konsisten (Savai dkk., 2022), dan literatur *pre-processing* menempatkan langkah-langkah tersebut sebagai fondasi penemuan pengetahuan yang efisien dan reliabel (Fan dkk., 2021).

Big Data: Summary

Kerangka 5V membantu memetakan tantangan utama *big data* kesehatan menjadi persoalan yang dapat ditangani: skala dan kecepatan mendorong otomasi/iterasi pembersihan; keragaman format menuntut *pre-processing* yang kontekstual; *veracity* mengharuskan kontrol kualitas dan aturan proses, termasuk mitigasi *fraud*; dan *value* baru muncul ketika data siap analisis sehingga dapat mendukung diagnosis, prediksi, dan keputusan operasional. *Big data* telah membuka cakrawala baru dalam dunia kesehatan. Dari sekadar mencatat penyakit, kita kini mampu memprediksi, mencegah, dan mempersonalisasi pengobatan. Dengan memahami karakteristik 5V, mengenali beragam sumber data, dan menguasai proses analitik dengan fondasi *pre-processing* yang kuat para profesional kesehatan dapat mengubah data mentah menjadi wawasan berharga yang tidak hanya bermanfaat bagi satu pasien, tetapi bagi seluruh populasi. Tantangan ke depan adalah memastikan data yang digunakan berkualitas, analisis yang dilakukan etis dan tidak bias, serta wawasan yang dihasilkan dapat diterjemahkan menjadi kebijakan dan tindakan nyata yang meningkatkan derajat kesehatan masyarakat. Seperti ditegaskan oleh Chaari (2019), dengan kelimpahan data dan alat AI yang tersedia, minat akan bergeser dari bantuan diagnosis menuju pencegahan dan *big data* adalah bahan bakarnya.

BAB V

Bioinformatika Klinis: Memahami Bahasa Molekuler dalam Praktik Sehari-hari

Seorang pasien datang dengan gejala yang tidak biasa. Riwayat keluarga menunjukkan pola penyakit yang mencurigakan. Kita mencurigai adanya kelainan genetik, tetapi pemeriksaan fisik dan laboratorium rutin tidak memberikan jawaban. Kita memutuskan untuk melakukan pemeriksaan sekuensing DNA. Beberapa minggu kemudian, sebuah laporan tebal tiba di meja Kita, berisi ribuan varian genetik yang tidak Kita kenali. Di mana Kita harus memulai? Varian mana yang relevan? Bagaimana cara menentukannya?

Ini adalah tantangan yang dihadapi para dokter di era genomik modern. Teknologi sekuensing telah berkembang pesat, memungkinkan kita untuk membaca seluruh rangkaian DNA pasien dengan biaya yang semakin terjangkau. Namun, data yang dihasilkan sangat besar dan kompleks. Di sinilah bioinformatika klinis berperan. Ia adalah jembatan antara data molekuler mentah dan keputusan klinis yang tepat.

Bab ini akan memperkenalkan Kita pada dunia bioinformatika klinis sebuah disiplin ilmu yang menggabungkan biologi molekuler, ilmu komputer, dan kedokteran untuk meningkatkan diagnosis, prognosis, dan terapi. Seperti ditegaskan oleh Trent (2014), perkembangan *omics* kini berdampak pada perawatan pasien, didorong oleh platform analitik yang semakin canggih. Pertanyaan utama saat ini bukan lagi “*bagaimana menghasilkan data*”, melainkan “*apa arti data tersebut*”.

Definisi dan Ruang Lingkup Bioinformatika Klinis

Bioinformatika klinis merupakan cabang interdisipliner yang mengintegrasikan ilmu bioinformatika dengan praktik kedokteran klinis, dengan tujuan utama memanfaatkan data molekuler termasuk

data genomik, proteomik, dan transkriptomik untuk meningkatkan kualitas diagnosis, prognosis, dan terapi pasien. Ini mencakup segala sesuatu mulai dari penyimpanan data urutan DNA, analisis varian genetik, prediksi dampak mutasi pada protein, hingga integrasi data genomik dengan catatan kesehatan elektronik.

Willet dan Wade (2014) menggambarkan perjalanan dari fenotipe ke genotipe melalui bioinformatika. Proses ini dimulai dari observasi sifat atau penyakit, kemudian memetakan lokus genetik yang bertanggung jawab, dan akhirnya mengidentifikasi varian kausal. Dalam praktik klinis, ini berarti menerjemahkan pertanyaan klinis (misalnya, "*mengapa pasien ini menderita penyakit langka?*") menjadi pertanyaan molekuler yang dapat diuji.

Dalam konteks perkembangan genomika klinis yang kini telah mapan dalam praktik kedokteran, Lupski (2021) menekankan bahwa bioinformatika klinis menjadi jembatan yang menghubungkan informasi genetik yang sangat granular dan informatif dari genom personal dengan kebutuhan klinis sehari-hari. Meskipun kandungan informasi dari genom personal sangat besar, pemanfaatannya masih terbatas oleh kurangnya karakterisasi fungsional dari mayoritas gen yang dianotasi secara komputasional (Lupski, 2021).

Ruang lingkup bioinformatika klinis mencakup beberapa domain utama:

- a. **Interpretasi varian genetik:** proses menganalisis dan mengklasifikasikan varian yang ditemukan dalam sekuensing genom atau eksom pasien untuk menentukan signifikansi klinisnya.
- b. **Pemanfaatan basis data biologis:** mencocokkan temuan molekuler dengan fenotip penyakit yang telah diketahui.
- c. **Analisis ekspresi gen:** untuk keperluan prognosis dan pemilihan terapi, khususnya dalam bidang onkologi.
- d. **Pencarian homologi sekuens:** mengidentifikasi hubungan evolusioner dan fungsional antara gen atau protein yang belum terkarakterisasi dengan baik.

Perkembangan teknologi *next-generation sequencing* (NGS) telah secara dramatis mempercepat penemuan asosiasi gen penyakit dan presisi diagnostik. Chiu *dkk.* (2021) mendokumentasikan bahwa dalam satu dekade terakhir, teknologi NGS telah mengidentifikasi 166 asosiasi baru gen penyakit pada penyakit kulit hereditas saja, menunjukkan akselerasi luar biasa dibandingkan era sebelumnya. Hal ini menegaskan bahwa klinisi modern perlu memahami dasar-dasar

bioinformatika untuk dapat menginterpretasikan dan memanfaatkan data molekuler yang semakin menjadi bagian integral dari alur kerja diagnostik (Chiu dkk., 2021). Yu (2014) menekankan bahwa penerapan teknologi sekuensing generasi berikutnya di laboratorium medis memerlukan perhatian khusus pada jaminan kualitas, akurasi, dan interpretasi data. Ini adalah tanggung jawab bersama antara ahli bioinformatika, ilmuwan laboratorium, dan dokter.

Bagi dokter, mahasiswa kedokteran, dan peneliti, pemahaman bioinformatika klinis tidak berarti harus menguasai pemrograman komputer secara mendalam, melainkan memahami prinsip-prinsip dasar bagaimana data biologis diorganisasi, diakses, dan diinterpretasikan menggunakan sumber daya yang tersedia secara daring dan gratis. Sobreira dkk. (2021) menekankan bahwa akses gratis terhadap informasi genetika dan genomika yang terkurasi, terkini, dan komprehensif telah memungkinkan peningkatan pelayanan klinis dan kemajuan riset, bahkan di negara-negara dengan sumber daya terbatas (Sobreira dkk., 2021).

Sumber Data Biologis untuk Klinisi

Sebagai seorang dokter, tidak perlu menjadi ahli bioinformatika untuk memanfaatkan kekayaan data biologis. Banyak database publik yang dapat diakses secara gratis dan menyediakan informasi penting yang dapat membantu Kita dalam praktik sehari-hari. Berikut adalah beberapa sumber data utama yang perlu Kita kenali.

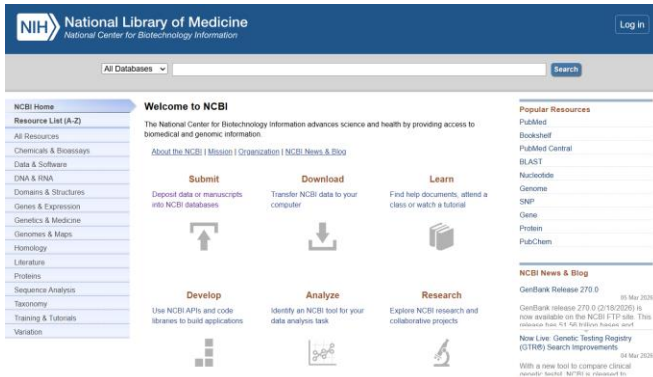
Database Nukleotida: GenBank dan ENA

GenBank adalah database urutan nukleotida publik yang dikelola oleh *National Center for Biotechnology Information* (NCBI). GenBank menyimpan semua sekuens gen yang telah dianotasi dan dapat diakses secara bebas ("*Hereditary Disorders of Elastin Fiber Development*", 2025). Di sini dapat mencari urutan gen tertentu, melihat variasi antar spesies, dan mengunduh referensi urutan untuk analisis lebih lanjut. Bersama dengan European Nucleotide Archive (ENA) dan DNA Data Bank of Japan (DDBJ), mereka membentuk *International Nucleotide Sequence Database Collaboration* (INSDC), yang memastikan data dapat dipertukarkan secara global.

Bagi klinisi, GenBank berfungsi sebagai repositori utama untuk memverifikasi sekuens gen yang terkait dengan penyakit hereditas. Dalam praktik klinis, basis data nukleotida digunakan terutama untuk memverifikasi sekuens referensi gen, mengidentifikasi varian patogenik, dan merancang primer untuk konfirmasi diagnostik menggunakan sekuensing Sanger. Sebagai contoh, dalam kasus

diagnosis *cystic fibrosis*, sekuens gen *CFTR* dapat diakses melalui GenBank untuk memverifikasi varian yang teridentifikasi (Yavuz dkk., 2024).

Kegunaan klinis: Ketika kita menemukan varian gen yang belum pernah dilaporkan, kita dapat mencari di GenBank untuk melihat apakah varian tersebut telah ditemukan sebelumnya pada populasi normal, atau untuk membandingkan urutan pasien dengan urutan referensi.



Gambar 10. Database Genbank dikelola oleh departemen kesehatan Amerika Serikat

Database Protein: UniProt dan PDB

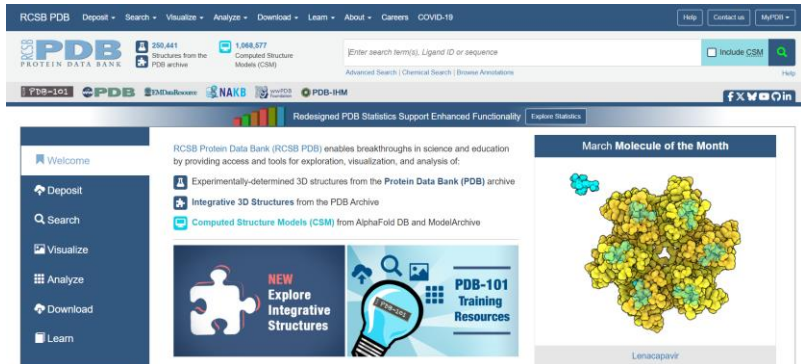
UniProt (*Universal Protein Resource*) adalah sumber daya komprehensif untuk informasi tentang urutan dan fungsi protein. Setiap entri protein dilengkapi dengan deskripsi fungsinya, lokasi subseluler, modifikasi pasca-translasi, domain, serta interaksi dengan protein lain. Ini sangat berguna untuk memahami konsekuensi fungsional dari varian gen yang Kita temukan. Abramov dan Makushkin (2024) mendemonstrasikan penggunaan UniProt bersama dengan basis data lainnya untuk mendeskripsikan gangguan neurodevelopmental yang terkait dengan defek genetik pada struktur reseptor glutamatergik.



Gambar 11. Database UniProt yang dikelola melalui kolaborasi Departemen Kesehatan Amerika Serikat, Secretariat for Education, Research and Innovation SERI Swiss, dan Europe's Life Sciences Laboratory

Protein Data Bank (PDB) menyimpan struktur tiga dimensi protein yang telah ditentukan melalui kristalografi sinar-X, nuclear magnetic resonance (NMR), atau *cryo-electron microscopy*. Dengan melihat struktur protein, Kita dapat memahami bagaimana suatu mutasi dapat mengganggu lipatan protein atau situs aktifnya. Cheong dan Caramins (2014) menjelaskan bagaimana konservasi residu dalam domain fungsional dapat menjadi indikator pentingnya suatu posisi asam amino.

Kegunaan klinis: Misalkan Kita menemukan varian *missense* pada gen *TP53*. Dengan mengakses UniProt, Kita dapat melihat bahwa posisi yang bermutasi terletak pada domain pengikatan DNA yang sangat terkonservasi. Dengan PDB, Kita dapat memvisualisasikan bagaimana perubahan asam amino dapat mempengaruhi interaksi dengan DNA.



Gambar 12. Database protein data bank dikelola oleh U.S. National Science Foundation (DBI-2321666), the US Department of Energy (DE-SC0019749), and the National Cancer Institute, National Institute of Allergy and Infectious Diseases, and National Institute of General Medical Sciences of the National Institutes of Health

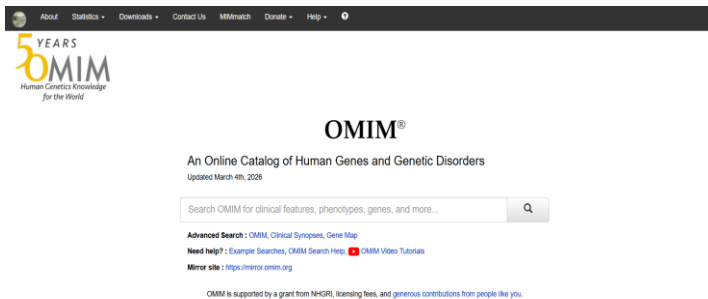
Database Penyakit: OMIM, ClinVar, dan Lainnya

a. **Online Mendelian Inheritance in Man (OMIM,)** merupakan basis data yang paling fundamental dan otoritatif bagi klinisi yang bekerja dengan penyakit genetik. OMIM, yang awalnya diterbitkan dalam bentuk buku oleh Victor McKusick pada tahun 1966, telah berkembang menjadi katalog daring yang mencakup lebih dari 25.000 entri yang mendeskripsikan lebih dari 16.000 gen dan 8.600 fenotip (Hamosh dkk., 2021). Hamosh dkk. (2021) menjelaskan bahwa OMIM kini memiliki lebih dari 20.000 pengguna unik per hari dari setiap negara di dunia, menjadikannya sumber daya yang tak tergantikan bagi komunitas genetika.

OMIM menyediakan sinopsis klinis yang terperinci untuk setiap penyakit Mendelian, termasuk deskripsi fenotip, pola pewarisan, gen penyebab, dan varian alelik (Hamosh dkk., 2021; Lupski, 2021; Sobreira dkk., 2021). Lupski (2021) menekankan bahwa integrasi *deep phenotyping* yang tersedia dalam sinopsis klinis OMIM dengan analisis genom personal merupakan jalan ke depan dalam praktik kedokteran genomik.

Fitur penting OMIM yang perlu diketahui klinisi meliputi:

- a) **Phenotypic Series:** mengelompokkan penyakit-penyakit yang secara klinis serupa namun disebabkan oleh gen yang berbeda (Gamba dkk., 2021)
- b) **Clinical Synopsis:** menyediakan daftar terstruktur manifestasi klinis berdasarkan sistem organ (Badreddine dkk., 2023; Lupski, 2021).
- c) **GeneScout:** alat berbasis web yang memungkinkan pencarian gen dan fenotip terkait dalam region kromosom tertentu, sangat berguna untuk menganalisis *copy number variants* (CNV) dan region homozigositas (Applegate dkk., 2022).



Gambar 13. Database Online Mendelian Inheritance in Man[®] dikelola oleh Departemen Genetika Kedokteran, Johns Hopkins University.

- b. **ClinVar** adalah arsip publik yang mengumpulkan interpretasi signifikansi klinis varian genetik dari laboratorium di seluruh dunia (Abramov & Макушкин, 2024; Birgmeier dkk., 2020; Liu dkk., 2024). ClinVar mengklasifikasikan varian ke dalam kategori: patogenik, kemungkinan patogenik, signifikansi tidak pasti (*variant of uncertain significance/VUS*), kemungkinan jinak, dan jinak. Basis data ini sangat penting dalam alur kerja interpretasi varian klinis, karena memungkinkan klinisi untuk memeriksa apakah varian yang ditemukan pada pasien telah dilaporkan sebelumnya dan bagaimana klasifikasinya (Lee dkk., 2020; Rim dkk., 2020).
- c. **Human Gene Mutation Database (HGMD)** adalah database komersial yang mengumpulkan mutasi yang dilaporkan dalam literatur sebagai penyebab penyakit genetik. Plazzer dan Macrae (2014) membahas pentingnya database varian dan upaya standarisasi seperti *Locus Reference Genomic* (LRG) untuk memastikan konsistensi dalam pelaporan varian.

Selain OMIM dan ClinVar, beberapa basis data pendukung lainnya yang relevan bagi klinisi meliputi: Orphanet untuk penyakit langka (Albuquerque & Lanza, 2025; Zhu dkk., 2020); Human Phenotype Ontology (HPO) untuk terminologi fenotip terstandarisasi (Cacheiro dkk., 2024; Rim dkk., 2020); dan GeneReviews yang menyediakan ulasan klinis komprehensif untuk penyakit genetik spesifik (Hamosh dkk., 2021).

Kegunaan klinis: Ketika Kita menemukan varian pada seorang pasien, langkah pertama adalah memeriksa apakah varian tersebut telah dilaporkan sebelumnya di ClinVar atau OMIM. Jika varian tersebut telah diklasifikasikan sebagai patogenik untuk penyakit yang sesuai dengan gejala pasien, Kita dapat dengan yakin membuat diagnosis.

Alat dan Aplikasi Praktis untuk Dokter

Sekarang kita akan membahas alat-alat praktis yang dapat Kita gunakan untuk menginterpretasi data genetik pasien.

Interpretasi Varian Genetik

Interpretasi varian genetik merupakan keterampilan inti dalam bioinformatika klinis. Ketika hasil sekuensing eksom atau genom diterima, klinisi dihadapkan pada ratusan hingga ribuan varian kandidat yang perlu diprioritaskan (Lee dkk., 2020; Birgmeier dkk., 2020). Lee dkk. (2020) melaporkan bahwa dalam kohort 553 pasien Korea dengan masalah neurodevelopmental, varian penyebab penyakit teridentifikasi pada 57,5% proband, dengan 35,1% di antaranya diwariskan secara resesif.

Govrisankar dan Lebo (2014) menguraikan langkah-langkah sistematis untuk menilai signifikansi varian *missense*:

- a. **Kualitas varian:** Pastikan varian disebut dengan keyakinan tinggi, dengan kedalaman bacaan yang memadai.
- b. **Frekuensi alel:** Periksa frekuensi varian dalam populasi umum menggunakan database seperti dbSNP, 1000 Genomes Project, atau *gnomAD*. Varian dengan frekuensi >5% umumnya jinak. Untuk penyakit langka, ambang batas yang lebih ketat (misalnya, <0,1%) sering digunakan. Görükmez dkk. (2023) menjelaskan bahwa varian kemudian diperiksa silang menggunakan beberapa basis data termasuk OMIM, HGMD, ClinVar, dan PubMed (Görükmez dkk., 2023).
- c. **Riwayat dalam database klinis:** Cari varian di ClinVar, OMIM, atau HGMD.

- d. **Analisis *in silico***: Gunakan alat prediksi untuk menilai dampak varian pada fungsi protein. Beberapa alat yang umum digunakan adalah:
- a) **SIFT** (*Sorting Intolerant From Tolerant*): Memprediksi apakah substitusi asam amino mempengaruhi fungsi protein berdasarkan homologi sekuens.
 - b) **PolyPhen-2**: Menggabungkan informasi sekuens dan struktur untuk memprediksi dampak varian.
 - c) **MutationTaster**: Menilai potensi patogenik varian dengan mempertimbangkan konservasi, perubahan *splice site*, dan fitur lainnya.
- e. **Konservasi evolusioner**: Periksa apakah posisi yang bermutasi terkonservasi antar spesies menggunakan UCSC Genome Browser atau alat serupa. Residu yang sangat terkonservasi cenderung penting untuk fungsi protein.
- f. **Lokasi dalam domain fungsional**: Gunakan database seperti Pfam atau SMART untuk menentukan apakah varian terletak dalam domain protein yang diketahui penting.
- g. **Klasifikasi menurut pedoman ACMG**: Varian yang belum pernah dilaporkan diklasifikasikan menggunakan kriteria *American College of Medical Genetics and Genomics* (ACMG) yang mempertimbangkan bukti populasi, komputasional, fungsional, dan segregasi (Rim dkk., 2020; Görükmez dkk., 2023).
- h. **Data keluarga**: Jika memungkinkan, lakukan analisis segregasi untuk melihat apakah varian tersebut ada pada anggota keluarga yang terkena dan tidak ada pada yang sehat.

Cheong dan Caramins (2014) memberikan contoh bagaimana kombinasi alat ini dapat digunakan untuk mengklasifikasikan varian pada gen *CPOX*, *LDLR*, dan *BRCA2* (lihat Tabel 4 pada bab mereka). Penting untuk diingat bahwa tidak ada satu alat pun yang sempurna; pendekatan konsensus dengan menggunakan beberapa alat memberikan hasil yang lebih kital.

Birgmeier dkk. (2020) mengembangkan AMELIE (*Automatic Mendelian Literature Evaluation*), sebuah alat yang menggunakan *natural language processing* untuk memprioritaskan varian kandidat berdasarkan kesesuaiannya dengan fenotip pasien. Mereka menunjukkan bahwa evaluasi hanya 11 gen teratas dari median 127 gen kandidat per pasien menghasilkan diagnosis cepat pada lebih dari 90% kasus.

Pencarian Homologi untuk Diagnosis Penyakit Langka (BLAST)

BLAST (*Basic Local Alignment Search Tool*) adalah alat yang sangat berguna untuk mencari kesamaan antara sekuens *query* Kita dengan sekuens yang ada di database. Willet dan Wade (2014) menjelaskan bagaimana BLAST digunakan dalam penemuan penkita genetik dan pemilihan genom referensi. Dalam konteks klinis, BLAST memiliki beberapa aplikasi penting:

- a. **Identifikasi patogen:** Nour dkk. (2024) mendemonstrasikan penggunaan BLAST nukleotida untuk mengidentifikasi *Nocardia paucivorans* dari sampel sputum pasien yang dicurigai tuberkulosis, menunjukkan pentingnya diagnosis akurat untuk membedakan antara dua kondisi dengan presentasi klinis serupa. Demikian pula, Koide dkk. (2023) melaporkan penggunaan BLAST untuk mengidentifikasi *Candida rugosa* sebagai penyebab endoftalmitis fungal endogen atipikal.
- b. **Diferensiasi spesies virus:** Eltom dkk. (2021) menggunakan BLAST lokal (*offline BLAST*) untuk diferensiasi virus *capripox*, mendemonstrasikan bahwa basis data lokal sekuens genom lengkap dan sekuens parsial gen dapat digunakan untuk identifikasi spesies yang cepat dan kital di lapangan.
- c. **Karakterisasi varian genetik baru:** Ketika varian baru ditemukan pada pasien, BLAST dapat digunakan untuk mencari homologi sekuens dengan gen atau protein yang telah dikarakterisasi, membantu memprediksi dampak fungsional varian tersebut.

Analisis Ekspresi Gen untuk Prognosis Kanker

Dalam onkologi, profil ekspresi gen dapat memberikan informasi prognostik yang berharga. Doyle dkk. (2014) membahas bagaimana sekuensing DNA generasi berikutnya digunakan untuk mempelajari genom kanker dan mengidentifikasi mutasi somatik. Namun, data ekspresi gen sering diperoleh melalui microarray atau RNA-seq.

Alat seperti OncoPrint atau cBioPortal for Cancer Genomics memungkinkan Kita untuk mengeksplorasi data ekspresi gen dari ribuan sampel kanker. Kita dapat melihat apakah gen yang Kita minati diekspresikan secara berlebihan pada jenis kanker tertentu, dan bagaimana hal ini berkorelasi dengan kelangsungan hidup pasien.

Pividori dkk. (2020) mengembangkan PhenomeXcan, sebuah platform yang mensintesis 8,87 juta varian dari statistik ringkasan GWAS pada 4.091 sifat dengan data transkriptomik dari 49 jaringan dalam *Genotype-Tissue Expression* (GTEx) v8, menghasilkan

platform berbasis gen yang dapat dikueri mencakup 22.515 gen. Platform ini memungkinkan identifikasi asosiasi gen-sifat kausal yang potensial dan target terapeutik baru (Pividori dkk., 2020).

Baird dkk. (2021) menggunakan *Mendelian Randomization* pada ekspresi gen yang diukur dalam jaringan otak untuk mengidentifikasi target obat yang terlibat dalam penyakit neurologis dan psikiatri, mengidentifikasi lima gen (ACE, GPNMB, KCNQ5, RERE dan SUOX) sebagai target obat yang menarik.

Dalam praktik klinis sehari-hari, klinisi dapat mengakses informasi ekspresi gen melalui beberapa sumber daya daring: Ensembl menyediakan anotasi genom komprehensif termasuk data ekspresi; GTEx Portal menyediakan data ekspresi gen spesifik jaringan; dan cBioPortal menyediakan data genomik kanker yang dapat dieksplorasi secara interaktif.

Studi Kasus: Bagaimana Bioinformatika Membantu Diagnosis Pasien dengan Kelainan Genetik Langka

Kasus Ilustratif: Diagnosis Kelainan Genetik Langka Melalui Pendekatan Multi-Omik

Untuk mengilustrasikan peran bioinformatika klinis dalam diagnosis penyakit genetik langka, mari kita ikuti sebuah studi kasus nyata yang diadaptasi dari Erlich dkk. (2011), yang juga dibahas oleh Jegga (2014), serta dilengkapi dengan sintesis dari kasus-kasus lain yang dipublikasikan dalam literatur.

Seorang pasien laki-laki berusia 30 tahun datang dengan keluhan kelemahan progresif pada kedua kakinya yang dimulai sejak usia 20 tahun. Pemeriksaan neurologis menunjukkan spastisitas, kelemahan otot, dan refleks tendon yang meningkat. Diagnosis banding mengarah pada *hereditary spastic paraparesis* (HSP), suatu kelompok penyakit neurodegeneratif heterogen. Riwayat keluarga menunjukkan pola pewarisan autosomal dominan, dengan beberapa anggota keluarga di tiga generasi mengalami gejala serupa.

- a. **Langkah 1: Pengumpulan sampel dan sekuensing.** Sampel darah diambil dari pasien dan anggota keluarga lainnya. Dilakukan sekuensing *whole-exome* pada beberapa anggota keluarga yang terkena.
- b. **Langkah 2: Identifikasi varian kandidat.** Dari data sekuensing, diperoleh ribuan varian. Varian yang umum dalam populasi (frekuensi >1%) disaring menggunakan database seperti dbSNP dan 1000 Genomes. Varian yang tidak mengubah protein (misalnya, sinonim) juga disaring. Tersisa 15 varian kandidat.

- c. **Langkah 3: Prioritisasi dengan bioinformatika.** Para peneliti menggunakan tiga alat prioritisasi gen yang berbeda (Endeavour, ToppGene, SUSPECTS). Mereka memasukkan 11 gen yang diketahui terkait dengan HSP sebagai set pelatihan. Ke-15 gen kandidat kemudian diurutkan berdasarkan kemiripan fungsionalnya dengan set pelatihan. Hasilnya menarik: ketiga alat tersebut sepakat menempatkan gen *KIF1A* di peringkat teratas. Gen ini sebelumnya tidak terkait dengan HSP, tetapi diketahui berperan dalam transpor aksonal.
- d. **Langkah 4: Validasi.** Analisis segregasi dalam keluarga menunjukkan bahwa varian *KIF1A* terdapat pada semua anggota keluarga yang terkena dan tidak pada yang sehat. Varian tersebut adalah perubahan asam amino yang sangat terkonservasi dan diprediksi merusak oleh SIFT dan PolyPhen-2. Varian ini tidak ditemukan dalam database populasi normal.
- e. **Langkah 5: Diagnosis.** Berdasarkan bukti-bukti ini, pasien didiagnosis dengan HSP yang disebabkan oleh mutasi pada gen *KIF1A*. Diagnosis ini memiliki implikasi untuk konseling genetik keluarga dan pemahaman tentang prognosis.

Pelajaran dari Kasus-Kasus Lain

Kasus serupa dilaporkan dalam berbagai konteks klinis. Ning dkk. (2024) melaporkan seorang anak perempuan berusia 13 tahun dengan riwayat fraktur berulang, perawakan pendek, dan temuan radiografis spesifik yang mengarah pada kecurigaan *osteogenesis imperfecta* (OI). WES mengidentifikasi varian homozigot baru c.492G>C (p.Leu164=) pada gen *CCDC134*. Varian ini awalnya tampak sebagai varian sinonim yang tidak mengubah asam amino, sehingga berpotensi diabaikan. Analisis RNA-seq mengidentifikasi bahwa varian tersebut merupakan varian *splicing* abnormal yang menyebabkan delesi Ekson 5, yang mengakibatkan fenotip penyakit (Ning dkk., 2024). Colin dkk. (2023) menekankan bahwa implementasi teknologi genomik dan transkriptomik secara bertahap sangat efektif dalam mengidentifikasi etiologi molekuler, dengan tingkat resolusi mencapai 87% pada pasien yang sebelumnya tidak terdiagnosis secara molekuler.

Liu dkk. (2024) mengidentifikasi varian *de novo* heterozigot pada gen *CRMP1* melalui WES pada pasien dengan gangguan neurodevelopmental, dan menyerahkan mutasi tersebut ke ClinVar (SCV005196589), meskipun gen *CRMP1* belum memiliki asosiasi fenotip penyakit yang jelas dalam OMIM. Kasus ini mengilustrasikan

bagaimana bioinformatika klinis tidak hanya membantu diagnosis tetapi juga berkontribusi pada perluasan pengetahuan tentang asosiasi gen-penyakit.

Corsten-Janssen dkk. (2020) mendemonstrasikan implementasi *rapid exome sequencing* (rES) dalam perawatan prenatal menggunakan panel gen virtual dari sekitar 3.850 gen OMIM, yang berhasil menegakkan diagnosis genetik pada 35% fetus tanpa abnormalitas QF-PCR atau *array*, termasuk sindrom MIRAGE, Zellweger, Walker-Warburg, Noonan, Kabuki, dan CHARGE. Dalam enam kasus, diagnosis rES membantu manajemen perinatal, menunjukkan relevansi klinis yang signifikan.

Ariani dan Rachmadi (2022) melaporkan pengalaman di Indonesia di mana OMIM digunakan untuk membedakan malformasi kongenital multipel sindromik dan non-sindromik pada 83 pasien. Sebanyak 34 pasien (41%) berhasil ditegakkan diagnosis klinisnya menggunakan basis data fenotip, dan dari 49 pasien non-sindromik yang menjalani analisis kromosom dengan metode G-banding, 17 (34,7%) menunjukkan aberasi kromosom. Kasus ini menunjukkan bahwa bahkan di negara dengan fasilitas laboratorium genetika molekuler yang terbatas, penggunaan basis data fenotip seperti OMIM tetap berperan penting sebagai alat skrining awal (Ariani & Rachmadi, 2022).

Alur Kerja Praktis untuk Klinisi

Berdasarkan sintesis literatur di atas, alur kerja bioinformatika klinis yang direkomendasikan untuk klinisi dalam mendiagnosis penyakit genetik langka adalah sebagai berikut:

- a. **Fenotipifikasi mendalam:** Dokumentasikan semua temuan klinis menggunakan terminologi HPO yang terstandarisasi.
- b. **Pemeriksaan genetik:** Lakukan WES atau *whole genome sequencing* (WGS) trio (pasien dan kedua orang tua) (Corsten-Janssen dkk., 2020; Lee dkk., 2020).
- c. **Filtrasi dan prioritasasi varian:** Gunakan alat seperti AMELIE (Birgmeier dkk., 2020) atau platform analisis genom-fenome seperti RD-Connect untuk memprioritaskan varian kandidat (Uzan dkk., 2025).
- d. **Verifikasi basis data:** Periksa silang varian dengan ClinVar, HGMD, dan OMIM (Görükmez dkk., 2023).
- e. **Analisis tambahan jika diperlukan:** Pertimbangkan RNA-seq untuk varian splicing yang dicurigai atau *optical genome mapping* untuk varian struktural (Colin dkk., 2023).

- f. **Konfirmasi dan pelaporan:** Konfirmasi varian dengan sekuensing Sanger dan laporkan temuan baru ke ClinVar untuk berkontribusi pada basis pengetahuan global (Liu dkk., 2024).

Pendekatan sistematis ini, yang mengintegrasikan berbagai alat dan basis data bioinformatika, telah terbukti meningkatkan tingkat diagnostik secara signifikan dan memiliki implikasi langsung terhadap manajemen klinis pasien dan konseling genetik keluarga (Colin dkk., 2023; Corsten Janssen dkk., 2020; Sobreira dkk., 2021)).

Summary

Bioinformatika klinis bukan lagi domain eksklusif para peneliti. Ia telah menjadi komponen esensial dalam praktik kedokteran modern, khususnya dalam diagnosis dan manajemen penyakit genetik. Basis data seperti OMIM, ClinVar, GenBank, dan UniProt menyediakan infrastruktur informasi yang memungkinkan klinisi untuk menginterpretasikan data molekuler secara akurat dan efisien. Alat-alat seperti BLAST, AMELIE, dan platform analisis multi-omik telah mendemonstrasikan kemampuannya dalam mempercepat proses diagnostik dan meningkatkan tingkat diagnosis.

Seperti diingatkan oleh Trent (2014), “sementara beberapa tahun yang lalu fokusnya adalah pada bagaimana menghasilkan set data besar, hari ini pertanyaannya berkisar pada apa arti data tersebut.” Sebagai ujung tombak pelayanan kesehatan, Kita memiliki peran kunci dalam menjawab pertanyaan itu.

Bagi dokter, mahasiswa kedokteran, dan residen, penguasaan dasar-dasar bioinformatika klinis bukan lagi pilihan melainkan kebutuhan, mengingat genomika klinis telah mapan dalam praktik kedokteran (Lupski, 2021) dan akses terhadap sumber daya bioinformatika yang terkurasi dan komprehensif tersedia secara gratis (Sobreira dkk., 2021; Hamosh dkk., 2021).

BAB VI

Penemuan Obat Berbasis Komputer (*Computer-Aided Drug Design/CADD*)

Krisis Penemuan Obat Tradisional: Biaya Tinggi, Waktu Lama, dan Tingkat Kegagalan Besar

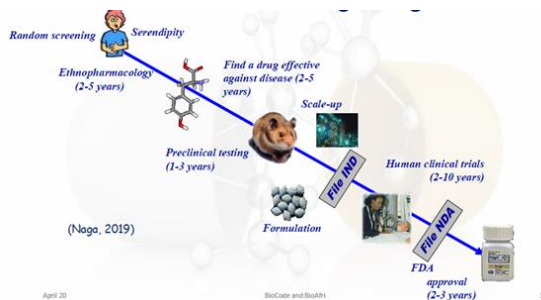
Penemuan dan pengembangan obat baru merupakan proses yang sangat panjang, mahal, dan penuh ketidakpastian. Mari kita bayangkan proses ini seperti mencari jarum dalam tumpukan jerami yang sangat besar, dan kita melakukannya dalam keadaan gelap gulita. Secara historis, pendekatan tradisional dalam penemuan obat mengkitalkan metode *trial and error* yaitu mensintesis ribuan senyawa kimia, mengujinya satu per satu di laboratorium, dan berharap menemukan satu kandidat yang efektif dan aman. Metode utamanya adalah *High-Throughput Screening* (HTS), di mana jutaan senyawa kimia diuji satu per satu untuk melihat apakah ada yang bereaksi terhadap target penyakit, misalnya sebuah protein yang berperan dalam pertumbuhan sel kanker. Proses ini ibarat melemparkan ribuan kunci yang berbeda bentuk ke sebuah gembok, berharap ada satu yang bisa membukanya.

Menurut estimasi industri farmasi, dari ribuan senyawa yang disintesis dan dievaluasi, hanya sekitar seratus senyawa yang dinilai aman untuk diuji lebih lanjut, dan dari jumlah tersebut hanya sekitar sepuluh senyawa yang akhirnya diuji secara klinis pada manusia untuk setiap satu produk obat yang disetujui (Cai dkk., 2021). Proses ini tidak hanya memakan waktu bertahun-tahun (lebih dari satu dekade), tetapi juga membutuhkan biaya miliaran dolar. Sayangnya, pendekatan ini memiliki tiga masalah besar yang sering disebut sebagai “*krisis*”:

- a. **Pertama, Biaya Tinggi dan Waktu Lama.** Menguji jutaan senyawa secara fisik membutuhkan robot canggih, bahan kimia dalam jumlah besar, dan tenaga ahli. Waktu dan biaya yang

dibutuhkan untuk menemukan dan mensintesis target obat baru dengan aktivitas biologis yang lebih baik menjadi tantangan besar (Goel dkk., 2022).

- b. Kedua, Tingkat Kegagalan Tinggi (Attrition Rate).** Tingkat keberhasilannya sangat rendah. Banyak senyawa yang awalnya tampak menjanjikan di tabung reaksi, ternyata gagal saat diuji pada hewan atau manusia. Kegagalan bisa disebabkan oleh berbagai hal: senyawa tidak bekerja seperti yang diharapkan (tidak efikasi), terlalu beracun (toksik), atau tidak bisa diserap tubuh dengan baik (farmakokinetik buruk). Sebagai contoh, cedera hati akibat obat (*drug-induced liver injury/DILI*) merupakan salah satu efek samping paling serius yang menyebabkan penarikan obat dari pasar pasca-pemasaran (Cai dkk., 2021). Metode skrining konvensional seperti HTS memiliki tingkat keberhasilan (*hit rate*) yang sangat rendah, yaitu hanya berkisar antara 0,01% hingga 0,1% (Matsumoto dkk., 2021). Rendahnya tingkat keberhasilan ini berkontribusi pada besarnya biaya penemuan obat secara keseluruhan. Selain itu, metode pengujian laboratorium konvensional untuk mengevaluasi sifat-sifat senyawa seperti biodegradabilitas, toksisitas, dan aktivitas biologis seringkali memakan waktu lama dan biaya tinggi (Shayanfar & Shayanfar, 2022). Kegagalan di tahap akhir pengembangan klinis adalah kerugian yang sangat besar, baik secara finansial maupun waktu.
- c. Ketiga, Keterbatasan Eksplorasi.** Secara teoritis, ada lebih dari 10^{60} kemungkinan molekul obat. Namun, HTS tradisional hanya mampu menjangkau beberapa juta senyawa. Artinya, kita hanya menjelajahi bagian yang sangat kecil dari “*ruang kimia*” (*chemical space*) yang mungkin menyimpan obat-obat potensial lainnya (Sheng dkk., 2016).



Gambar 14. Penemuan obat baru secara tradisional tanpa bantuan teknologi informasi (Sontakke dkk 2023)

Masalah lain yang memperparah krisis ini adalah munculnya resistensi obat (Kurniawan & Winarno, 2025). Dalam konteks penyakit infeksi seperti tuberkulosis, munculnya galur *Mycobacterium tuberculosis* yang resisten terhadap berbagai obat (*multi-drug resistant*) menuntut pengembangan agen anti-tuberkulosis baru yang lebih poten (Goel dkk., 2022). Situasi serupa juga terjadi pada penyakit-penyakit lain seperti kanker, di mana toksisitas, efek samping yang berat, dan resistensi obat merupakan masalah serius dari obat-obat antikanker yang tersedia saat ini (Kunde dkk., 2021).

Dengan demikian, terdapat kebutuhan mendesak akan paradigma baru yang dapat mempercepat proses penemuan obat, mengurangi biaya, dan meningkatkan tingkat keberhasilan. Lalu, adakah cara yang lebih cerdas untuk mencari jarum di tumpukan jerami ini? Jawabannya adalah ya, dengan menggunakan supermagnet. Di sinilah peran komputasi menjadi sangat penting.

Paradigma Baru: Penemuan Obat Berbasis Komputer (Computer-Aided Drug Design/CADD)

Untuk mengatasi keterbatasan pendekatan tradisional, dunia farmasi dan kedokteran telah mengadopsi paradigma baru yang dikenal sebagai *Computer-Aided Drug Design* (CADD) atau penemuan obat berbasis komputer. CADD bukanlah pengganti eksperimen laboratorium, melainkan sebuah kompas dan lampu penerang yang memandu para ilmuwan di kegelapan. Ibarat kita tidak perlu mencocokkan semua kunci satu per satu ke gembok, kita bisa menggunakan pemindai 3D untuk mempelajari bentuk gemboknya, lalu merancang atau memilih kunci yang secara logika paling mungkin cocok.

CADD memanfaatkan kekuatan komputasi untuk memfasilitasi dan mempercepat proses desain obat dengan memilih kandidat utama (*lead candidate*) yang paling menjanjikan untuk pengujian biologis (Kurniawan & Rohmatika, 2026; Wang dkk., 2022). Dengan kata lain, alih-alih menguji ribuan senyawa secara acak di laboratorium, komputer digunakan terlebih dahulu untuk "*menyaring*" dan memprediksi senyawa mana yang paling berpotensi efektif.

Pendekatan CADD secara umum dapat dibagi menjadi dua kategori utama:

- a. Pertama, pendekatan berbasis ligan (*ligand-based drug design*). Pendekatan ini menganalisis sifat-sifat struktural dan fisikokimia dari senyawa-senyawa yang sudah diketahui memiliki aktivitas biologis tertentu, kemudian menggunakan informasi tersebut untuk

merancang senyawa baru yang lebih baik (Mahendra dkk., 2025). Salah satu metode yang paling umum dalam pendekatan ini adalah Quantitative Structure-Activity Relationship (QSAR), yaitu metode yang membangun model matematika untuk menghubungkan struktur kimia suatu senyawa dengan aktivitas biologisnya (Kurniawan & Rohmatika, 2026; Kurniawan & Winarno, 2025).

- b. Kedua, pendekatan berbasis struktur target (*structure-based drug design*).

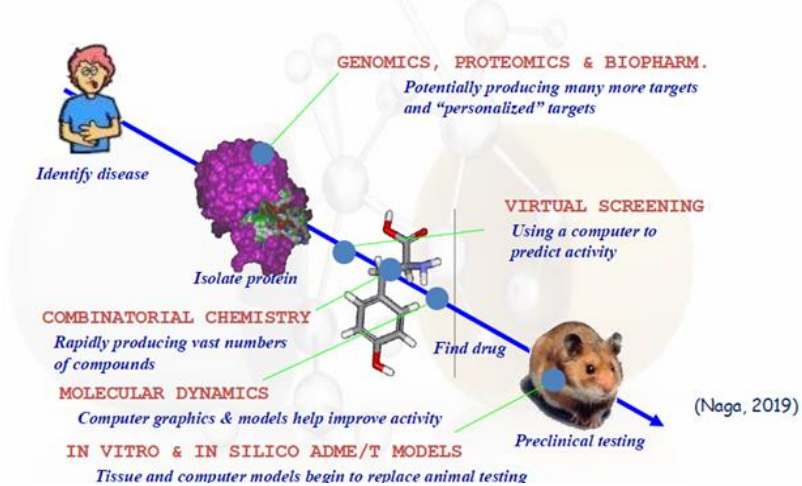
Pendekatan ini memanfaatkan informasi tiga dimensi (3D) dari protein target untuk merancang senyawa yang dapat berikatan secara optimal dengan protein tersebut, misalnya melalui teknik *molecular docking* (Gaudêncio & Pereira, 2020; Kurniawan dkk., 2024).

Keunggulan utama CADD adalah kemampuannya untuk secara signifikan mengurangi waktu dan biaya yang diperlukan dalam proses penemuan obat (Halim dkk., 2021; Kunde dkk., 2021). CADD membantu kita membuat keputusan yang lebih cerdas di awal, sehingga kita bisa memfokuskan sumber daya yang mahal hanya pada kandidat obat yang paling menjanjikan. Ini secara signifikan dapat mempercepat proses penemuan, menekan biaya, dan meningkatkan peluang keberhasilan (Godwin dkk. 2016). Dengan menggunakan model prediktif berbasis komputer, peneliti dapat memprioritaskan senyawa-senyawa yang memiliki peluang keberhasilan tertinggi sebelum melakukan sintesis dan pengujian di laboratorium (Niazi & Mariam, 2023).

Beberapa obat yang telah berhasil ditemukan dengan bantuan teknik komputasi antara lain Captopril (penghambat enzim pengubah angiotensin untuk hipertensi), Nelfinavir (penghambat protease HIV), Zanamivir (penghambat neura-minidase virus influenza), dan Dorzolamide (penghambat karbonat anhidrase) (Rosas-Jiménez dkk., 2020).

Untuk memudahkan pemahaman, bayangkan CADD seperti menggunakan GPS sebelum melakukan perjalanan. Alih-alih mencoba setiap jalan secara acak untuk mencapai tujuan (seperti metode tradisional), GPS membantu kita merencanakan rute terbaik terlebih dahulu, sehingga perjalanan menjadi lebih efisien dan hemat waktu. Demikian pula, CADD membantu peneliti "*menavigasi*" ruang kimia yang sangat luas untuk menemukan kandidat obat yang paling menjanjikan.

- Secara spesifik, CADD menggunakan kekuatan komputasi untuk:
- Memvisualisasikan interaksi: Melihat bagaimana sebuah molekul obat (kunci) berinteraksi dengan target protein (gembok) di tingkat atom.
 - Memprediksi afinitas: Memperkirakan seberapa kuat ikatan antara obat dan targetnya.
 - Menyaring jutaan senyawa: Melakukan penapisan virtual (*virtual screening*) dalam hitungan hari, bukan tahun, untuk memilih ribuan kandidat terbaik yang layak diuji di laboratorium.



Gambar 15. Penemuan obat baru dengan pendekatan secara teknologi informasi (Sonawane dkk 2023)

Konsep Kunci untuk Pemula: Analogi Sederhana

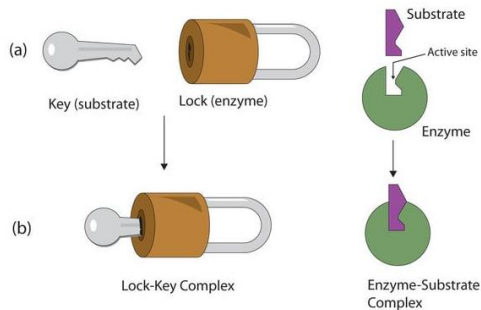
Untuk memahami cara kerja CADD, ada beberapa konsep dasar yang perlu dipahami, semuanya bisa dijelaskan dengan analogi sederhana.

Target Obat: Protein, Enzim, dan Reseptor

Dalam konteks penemuan obat, target obat adalah molekul biologis dalam tubuh yang terlibat dalam proses penyakit dan dapat dimodulasi oleh obat. Dalam analogi kita, target obat adalah gemboknya. Sebagian besar obat bekerja dengan berinteraksi dengan molekul besar dalam tubuh kita, yang umumnya adalah protein. Target obat yang paling umum adalah protein, yang mencakup enzim, reseptor, dan protein transporter.

- a. **Reseptor:** Bayangkan sebuah reseptor di permukaan sel seperti ceruk dengan bentuk tertentu. Ketika molekul sinyal alami tubuh (misalnya hormon) masuk ke ceruk ini, ia akan memicu respons, seperti menekan tombol “ON”. Obat bisa dirancang untuk masuk ke ceruk yang sama, menjadi agonis (menekan tombol ON) atau antagonis (menekan tombol OFF sehingga sinyal alami tidak bisa masuk). Sebagai contoh, reseptor histamin H₃ merupakan target yang semakin mendapat perhatian dalam farmakoterapi gangguan neurologis (Kicking dkk., 2024).
- b. **Enzim:** Enzim adalah protein yang mempercepat reaksi kimia, seperti mesin pabrik kecil. Tempat aktif (*active site*) pada enzim adalah tempat bahan baku masuk untuk diubah menjadi produk. Obat inhibitor bekerja dengan menyumbat tempat aktif ini, sehingga mesin pabrik berhenti memproduksi. Sebagai contoh, enzim siklooksigenase-2 (COX-2) merupakan target obat untuk penghambat inflamasi (Wang dkk., 2022); enzim α -glukosidase merupakan target utama untuk pengobatan diabetes melitus (Rosas-Jiménez dkk., 2020).

Bayangkan target obat seperti “gembok” pada pintu penyakit. Untuk membuka atau mengunci pintu tersebut (yaitu, menghentikan atau memodulasi proses penyakit), kita membutuhkan “kunci” yang tepat dan kunci itulah yang kita sebut sebagai obat atau ligan. Pemahaman tentang struktur tiga dimensi target obat sangat penting dalam CADD karena memungkinkan peneliti untuk merancang senyawa yang secara presisi dapat berikatan dengan target tersebut (Gaudêncio & Pereira, 2020; Takeda dkk., 2024).



Gambar 16. Comparison of the lock-and-key and induced fit model describing the binding of a substrate to the active site of an enzyme (Strube 2015)

Ligan dan Senyawa Kimia

Ligan adalah istilah untuk molekul (biasanya kecil) yang berikatan dengan target biologis (protein, enzim, atau reseptor). Dalam analogi kita, ligan adalah kuncinya. Ligan dapat menghasilkan efek biologis tertentu, bisa berupa penghambat (*inhibitor*) yang menghentikan fungsi enzim, agonis yang mengaktifkan reseptor, atau antagonis yang memblokir reseptor (Concu dkk., 2023; Hamzeh Mivehroud dkk., 2020).

Senyawa kimia yang menjadi kandidat obat bisa berasal dari berbagai sumber: tanaman (bahan alam), hasil sintesis di laboratorium, atau database komersial yang berisi jutaan struktur kimia (Irwin dkk., 2012).

Setiap ligan memiliki sifat-sifat fisikokimia tertentu seperti ukuran molekul, muatan listrik, kelarutan dalam air versus lemak (lipofilisitas), dan bentuk tiga dimensi yang menentukan kemampuannya untuk berikatan dengan target (Niazi & Mariam, 2023; Li dkk., 2020). Dalam CADD, sifat-sifat ini dinyatakan secara kuantitatif sebagai deskriptor molekuler, yaitu angka-angka yang menggambarkan karakteristik struktural dan fisikokimia suatu senyawa (Oyeneyin dkk., 2021; Yu dkk., 2021).

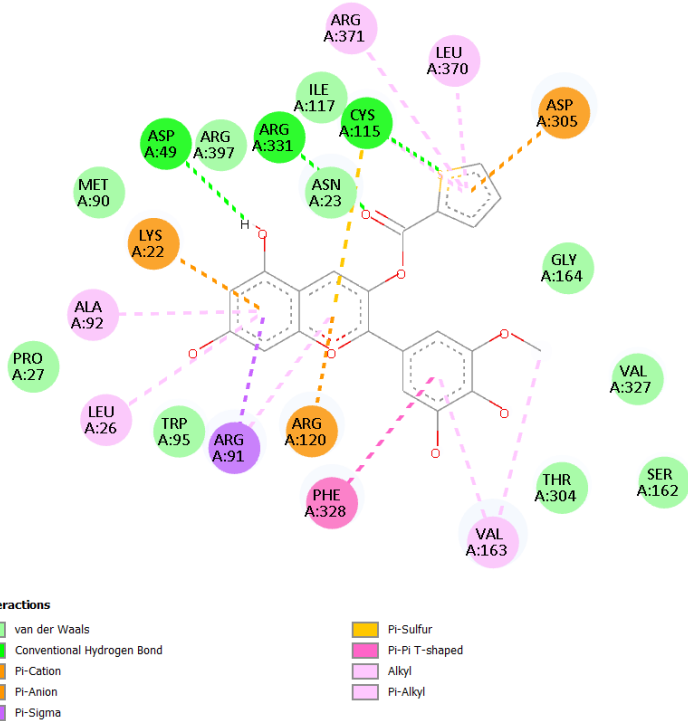
Deskriptor molekuler inilah yang menjadi “bahasa” yang digunakan komputer untuk memahami dan membandingkan berbagai senyawa kimia. Dengan menggunakan deskriptor ini, model QSAR dapat memprediksi aktivitas biologis senyawa baru berdasarkan hubungan matematis antara struktur dan aktivitas yang telah dipelajari dari senyawa-senyawa yang sudah diketahui (Li dkk., 2020; Cai dkk., 2021).

Interaksi Ligan-Protein: Memahami Kunci dan Gembok

Konsep paling fundamental dalam penemuan obat adalah interaksi ligan-protein, yang sering dijelaskan dengan analogi “kunci dan gembok” (*lock and key*). Dalam analogi ini, protein target (enzim atau reseptor) berperan sebagai gembok yang memiliki lubang kunci dengan bentuk tertentu (*binding site* atau situs pengikatan), sedangkan ligan (calon obat) berperan sebagai kunci yang harus memiliki bentuk dan sifat kimia yang tepat untuk masuk dan berikatan dengan lubang kunci tersebut (Gaudêncio & Pereira, 2022; Takeda dkk., 2024). Interaksi ini ibarat tangan yang pas dengan sarung tangan.

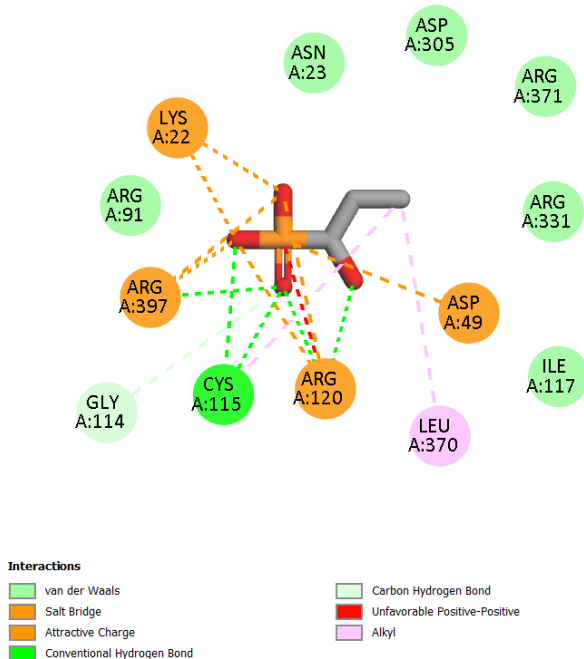
Agar sebuah kunci (obat) bisa masuk dan bekerja pada gembok (protein), ia harus memiliki bentuk dan "*sifat*" yang sesuai. Inilah yang disebut dengan interaksi molekuler. Ada beberapa jenis interaksi utama yang "*dirasakan*" oleh protein dan ligan:

- a. **Interaksi Hidrofobik:** Area pada protein yang bersifat seperti minyak (hidrofobik) akan lebih suka berinteraksi dengan bagian ligan yang juga bersifat seperti minyak. Interaksi ini sangat penting, menyumbang sekitar sepertiga dari total kekuatan ikatan obat-protein (Kellogg dkk., 2016).
- b. **Ikatan Hidrogen:** Ini seperti tarik-menarik magnet yang lebih spesifik. Area protein yang memiliki muatan parsial positif akan tertarik pada area ligan yang memiliki muatan parsial negatif, dan sebaliknya. Ikatan ini menentukan arah dan posisi obat secara tepat, seperti kunci yang hanya bisa masuk dalam satu orientasi.
- c. **Interaksi "Asam-Basa" (Elektrostatik):** Bayangkan seperti dua magnet yang saling tarik-menarik karena muatan yang berlawanan. Interaksi ini sangat kuat dan penting untuk pengikatan yang erat.



Gambar 17. Contoh interaksi yang mungkin terjadi antara ligand dan reseptor dalam penemuan obat baru secara simulasi komputasi (Kurniawan 2026)

Kegagalan dalam salah satu interaksi ini, misalnya ada bagian obat yang bersifat “minyak” tetapi ditempatkan di area protein yang basah (polar), akan menghasilkan interaksi yang tidak menguntungkan dan melemahkan ikatan (Kellogg dkk., 2016).



Gambar 18. Contoh dari interaksi yang tidak menguntungkan dalam CADD ditandai warna merah “*unfavorable*” (Kurniawan 2026)

Teknik molecular docking dalam CADD secara komputasional mensimulasikan proses “*memasukkan kunci ke dalam gembok*” ini. Komputer menghitung bagaimana suatu ligan dapat masuk ke dalam situs pengikatan protein, mengevaluasi kesesuaian bentuk (*shape complementarity*), dan menghitung kekuatan ikatan yang terbentuk berdasarkan berbagai jenis interaksi tersebut (Gaudêncio & Pereira, 2022; Nishikiori dkk., 2022). Skor pengikatan (*docking score*) yang dihasilkan memberikan estimasi seberapa kuat suatu ligan dapat berikatan dengan targetnya (Khelfa dkk., 2023; Kurniawan & Winarno, 2025).

Namun, perlu dipahami bahwa analogi kunci dan gembok ini merupakan penyederhanaan. Dalam kenyataannya, baik protein maupun ligan bersifat fleksibel keduanya dapat berubah bentuk saat berinteraksi satu sama lain, sebuah konsep yang dikenal sebagai *induced fit* (Kanan dkk., 2021).

Simulasi dinamika molekuler (*molecular dynamics/MD*) dalam CADD dapat memodelkan fleksibilitas ini untuk memberikan gambaran yang lebih realistis tentang interaksi ligan-protein (Wang dkk., 2022; Kanan dkk., 2021). Kadang, sebuah kantong tersembunyi baru muncul saat protein bergerak, yang bisa menjadi target baru yang menarik (Godwin dkk. 2016).

Tahapan CADD Secara Garis Besar

Proses penemuan obat berbasis komputer umumnya mengikuti serangkaian tahapan yang saling terkait. Berikut adalah gambaran umum tahapan-tahapan tersebut, yang banyak di antaranya akan dibahas lebih dalam di bab selanjutnya.

a. Tahap 1: Identifikasi dan Validasi Target

Langkah pertama adalah menentukan “gembok” mana yang ingin kita buka. Ini adalah mengidentifikasi target biologis (protein, enzim, atau reseptor) yang berperan penting dalam mekanisme penyakit. Informasi tentang struktur tiga dimensi target dapat diperoleh dari basis data seperti Protein Data Bank (PDB) yang menyimpan struktur kristal protein yang telah ditentukan melalui teknik seperti kristalografi sinar-X, NMR, atau *cryo-electron microscopy* (Gaudêncio & Pereira, 2020; Takeda dkk., 2024; Salsbury Jr., 2016; Shehu, 2016). Data eksperimen ini menjadi titik awal yang krusial. Pemahaman mendalam tentang struktur target ini menjadi fondasi untuk tahapan selanjutnya.

b. Tahap 2: Penentuan Bentuk Gembok (Struktur 3D)

Jika struktur 3D protein target belum diketahui dari eksperimen, kita bisa memprediksinya menggunakan teknik komputasi seperti *homology modeling*, yaitu memodelkan struktur protein berdasarkan protein lain yang sejenis dan sudah diketahui strukturnya (Wong, 2016).

c. Tahap 3: Menemukan Cekungan Kunci (Identifikasi Sisi Pengikatan).

Program komputer seperti **CAVITY** akan menganalisis permukaan protein untuk mencari cekungan atau kantong yang paling potensial untuk diikat oleh obat. CAVITY bahkan bisa memperkirakan seberapa “*dapat diobati*” (*druggable*) suatu kantong, dan seberapa kuat potensi ikatan senyawa di sana (Zhang dkk., 2016).

d. Tahap 4: Pembangunan Pustaka Senyawa dan Skrining Virtual (Virtual Screening).

Setelah target teridentifikasi, langkah berikutnya adalah melakukan skrining virtual terhadap pustaka senyawa kimia yang

sangat besar. Pustaka ini dapat berisi jutaan hingga puluhan juta senyawa yang tersedia dari basis data seperti ZINC, ChEMBL, atau pustaka senyawa internal (Matsumoto dkk., 2021; Gaudêncio & Pereira, 2020). Skrining virtual menggunakan metode CADD baik berbasis ligan (QSAR) maupun berbasis struktur (*molecular docking*) untuk menyaring senyawa-senyawa yang diprediksi memiliki aktivitas terhadap target (Rosas-Jiménez dkk., 2020; Li dkk., 2025). Ini adalah jantung dari CADD. Program seperti MDock akan menambatkan (*docking*) ribuan hingga jutaan senyawa (kunci) ke dalam sisi pengikatan protein (gembok) (Yan & Zou, 2016). Program ini menghitung dan memberi skor, kandidat mana yang paling “cocok” secara bentuk dan energi. Proses ini secara dramatis mengurangi jumlah senyawa yang perlu diuji secara eksperimental.

e. Tahap 5: Pemodelan QSAR dan Prediksi Aktivitas

Model QSAR dibangun menggunakan data aktivitas biologis dari senyawa-senyawa yang sudah diketahui (*training set*) untuk menemukan hubungan kuantitatif antara struktur kimia dan aktivitas biologis (Oyeneyin dkk., 2021; Li dkk., 2020). Model ini kemudian divalidasi secara internal (misalnya dengan metode *cross-validation*) dan eksternal (menggunakan *test set* yang tidak digunakan dalam pembangunan model) untuk memastikan keakuratan prediksinya (Famarzi dkk., 2025; Niazi & Mariam, 2023). Model QSAR yang tervalidasi dapat digunakan untuk memprediksi aktivitas senyawa-senyawa baru yang belum pernah diuji ((Kurniawan & Rohmatika, 2026; Yu dkk., 2021)

f. Tahap 6: Molecular Docking dan Analisis Interaksi Mendalam

Senyawa-senyawa yang lolos dari skrining virtual kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan *molecular docking* untuk memahami bagaimana mereka berinteraksi dengan target pada tingkat atomik (Gaudêncio & Pereira, 2022; Bhatshankar & Tapkir, 2023). Teknik ini membantu mengidentifikasi residu asam amino kunci yang terlibat dalam pengikatan, jenis interaksi yang terbentuk (ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik, interaksi π - π), dan orientasi optimal ligan di dalam situs pengikatan (Kicking dkk., 2024; Khelfa dkk., 2023). Informasi ini sangat berharga untuk mengoptimalkan struktur senyawa agar memiliki afinitas pengikatan yang lebih tinggi.

g. Tahap 7: Optimasi Senyawa Pilihan. Jika sebuah senyawa ditemukan cukup menjanjikan, ilmuwan dapat menggunakan CADD untuk “*mempersukainya*”. Misalnya, dengan menambahkan

gugus fungsi tertentu untuk memperkuat ikatan hidrogen, atau mengubah bentuknya agar lebih mudah diserap tubuh. Pendekatan *Fragment-Based Drug Design (FBDD)* secara komputasi memungkinkan peneliti untuk merakit molekul yang lebih besar dan kompleks dari fragmen-fragmen kecil yang sudah terbukti berikatan dengan baik, seperti menyusun balok Lego menjadi bangunan yang lebih rumit (Sheng, Dong, & Wang, 2016).

- h. Tahap 8: Prediksi Sifat Farmakokinetik dan Toksisitas (ADMET).** Kandidat obat yang menjanjikan tidak hanya harus efektif terhadap target, tetapi juga harus memiliki profil farmakokinetik yang baik dan toksisitas yang rendah. Oleh karena itu, prediksi sifat ADMET (*Absorption, Distribution, Metabolism, Excretion, and Toxicity*) secara *in silico* merupakan tahapan penting dalam CADD (Faria dkk., 2022; Yadav dkk., 2024). Model komputasi dapat memprediksi apakah suatu senyawa akan diserap dengan baik secara oral, apakah dapat menembus sawar darah otak, bagaimana senyawa tersebut dimetabolisme oleh enzim sitokrom P450, dan apakah berpotensi menyebabkan toksisitas terhadap organ tertentu seperti hati atau jantung (Cai dkk., 2022; Rath dkk., 2024). Prediksi ADMET ini membantu mengeliminasi kandidat obat yang berpotensi gagal pada tahap uji klinis sejak dini. CADD juga bisa membantu memprediksi apakah suatu senyawa berpotensi beracun atau menyebabkan efek samping dengan melihat kemiripannya dengan senyawa beracun yang sudah diketahui. Informasi ini didapat dari database besar dan terbuka (*open access*) yang berisi data-data molekul dan aktivitas biologisnya (Ambure, Aher, & Roy, 2016).
- i. Tahap 9: Optimasi Lanjutan dan Validasi Eksperimental** Berdasarkan hasil analisis komputasi, senyawa-senyawa terpilih kemudian dioptimasi secara struktural untuk meningkatkan aktivitas, selektivitas, dan profil ADMET-nya (Rosas-Jiménez dkk., 2020; Velmurugan dkk., 2023). Senyawa-senyawa yang telah dioptimasi kemudian disintesis di laboratorium dan diuji secara eksperimental pertama secara *in vitro* (dalam tabung reaksi atau kultur sel), kemudian *in vivo* (pada hewan model), dan akhirnya pada uji klinis manusia. Penting untuk ditekankan bahwa CADD tidak menggantikan pengujian eksperimental, melainkan memandu dan mempercepat proses tersebut dengan memprioritaskan kandidat yang paling menjanjikan (Matsumoto dkk., 2021; Li dkk., 2025).

Summary

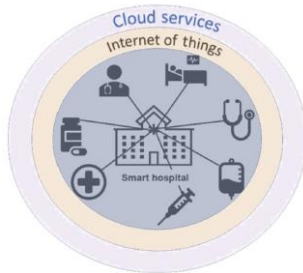
Bab ini telah memperkenalkan konsep-konsep dasar penemuan obat berbasis komputer (CADD) yang menjadi fondasi penting dalam dunia kesehatan. Krisis dalam penemuan obat tradisional yang selalu berkaitan dengan biaya tinggi, waktu lama, dan tingkat kegagalan besar telah mendorong adopsi pendekatan komputasi yang mampu mempercepat dan mengefisienkan proses tersebut. Konsep-konsep kunci seperti target obat, ligan, interaksi kunci-gembok, QSAR, *molecular docking*, dan prediksi ADMET merupakan pilar-pilar utama CADD yang perlu dipahami oleh setiap praktisi medis dan peneliti yang ingin memanfaatkan teknologi ini dalam pengembangan terapi baru. Dengan pemahaman dasar ini, pembaca akan lebih siap untuk mengeksplorasi aplikasi CADD yang lebih spesifik dan mendalam pada bab-bab selanjutnya. Dengan memahami tahapan-tahapan ini, kita bisa melihat bagaimana CADD telah merevolusi cara kita menemukan obat. Ini bukan lagi sekadar mencari secara membabi buta, tetapi sebuah proses yang lebih rasional, terarah, dan efisien.

BAB VII

Penerapan *Internet of Medical Things* (IOMT) dan *Wearable Devices*

Definisi IoMT dan Arsitekturnya: Sensor, Gateway, Cloud, Aplikasi

Internet of Medical Things (IoMT) merujuk pada ekosistem perangkat medis dan aplikasi yang saling terhubung melalui jaringan komputer daring untuk mengumpulkan, mentransmisikan, dan menganalisis data kesehatan secara real-time. IoMT merupakan subdomain spesifik dari *Internet of Things* (IoT) yang difokuskan pada semua perangkat medis dan aplikasi yang terhubung ke sistem informasi kesehatan melalui jaringan komputer daring (Debauche dkk., 2022). Dalam konteks klinis, IoMT memungkinkan pemantauan pasien secara kontinu, diagnosis jarak jauh, serta intervensi terapeutik yang lebih responsif, sehingga mengurangi beban finansial dan organisasional yang berdampak pada organisasi dan profesional kesehatan (Debauche dkk., 2022). Ekosistem ini tidak hanya mencakup perangkat yang dikenakan pasien, tetapi juga infrastruktur pendukung yang memungkinkan data mengalir dari tubuh pasien hingga ke tangan tenaga kesehatan (Parrington dkk., 2021; Godfrey dkk., 2018).



Gambar 19. Block diagram of Internet of Things enabled and cloud computing based smart healthcare system (Godfrey dan Stuart 2021).

Secara arsitektural, IoMT terdiri atas empat lapisan utama (Debauche dkk., 2022):

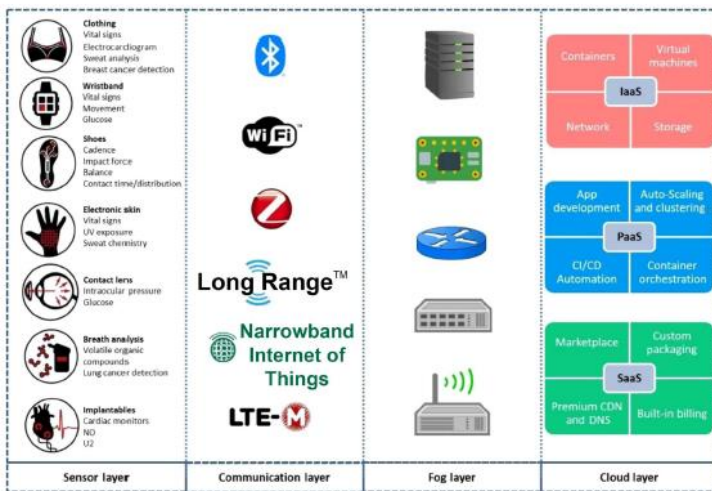
- a. **Lapisan Perangkat (Sensor Layer):** Ini adalah titik kontak pertama dengan pasien. Lapisan pertama merupakan fondasi dari seluruh ekosistem IoMT, terdiri dari sensor, aktuator, dan perangkat medis yang mengumpulkan data fisiologis dari tubuh pasien. Lapisan ini mencakup sensor wearable, perangkat implan, serta rekam medis elektronik (Debauche dkk., 2022). Perangkat dapat berupa sensor yang ditempel di kulit (seperti *patch*), dikenakan (*wearable*), ditanam (*implantable*), atau diletakkan di lingkungan (*ambient*). Sensor ini mengukur berbagai parameter fisiologis: accelerometer untuk gerakan (Godfrey dkk., 2021), sensor optik untuk detak jantung (Allen dkk., 2021), elektroda untuk EKG (Biswas dkk., 2021), hingga sensor kimia untuk analisis keringat (Hosseini dkk., 2021; Kim, 2021). Contoh nyata adalah sensor Myoware yang dikombinasikan dengan mikrokontroler Artemis Nano untuk membuat sistem EMG nirkabel berbiaya rendah (Clark dkk., 2021). Data mentah dari perangkat-perangkat ini kemudian dikirimkan ke lapisan berikutnya untuk diproses.
- b. **Lapisan Fog/Gateway:** Lapisan kedua berfungsi sebagai jembatan antara perangkat sensor dan infrastruktur cloud. Gateway dapat berupa smartphone, tablet, atau hub khusus yang menerima data melalui berbagai protokol komunikasi nirkabel seperti *Bluetooth Low Energy* (BLE), Wi-Fi, Zigbee, atau *Near-Field Communication* (NFC) (Kim, 2021; Raza dkk., 2021). BLE banyak digunakan karena konsumsi dayanya rendah, sementara NFC memungkinkan transfer data instan dengan menempelkan smartphone ke perangkat seperti pada sensor suhu telinga buatan

Kim dkk. (2015) yang diaktifkan cukup dengan menyentuh smartphone (Kim, 2021). Arsitektur RAMi yang diusulkan oleh Debauche dkk. menunjukkan bahwa lapisan Fog dibangun di atas *smart gateway* dan *Mobile Edge Computing* (MEC), di mana data diproses pada tingkat Fog, MEC, atau cloud tergantung pada beban kerja, kebutuhan sumber daya, dan tingkat kerahasiaan (Debauche dkk., 2022). Pendekatan ini sangat penting dalam konteks medis karena memungkinkan respons real-time terhadap kondisi darurat pasien tanpa harus menunggu pemrosesan di cloud.

- c. **Lapisan Cloud:** Data yang telah dikumpulkan dikirim ke server cloud untuk penyimpanan jangka panjang dan analisis mendalam. Lapisan cloud menyediakan kapasitas penyimpanan dan komputasi berskala besar untuk analisis data yang lebih mendalam. Di sinilah kekuatan komputasi skala besar diaktifkan. Platform seperti AWS IoT, Microsoft Azure IoT, atau IBM Watson menyediakan infrastruktur untuk menerima jutaan data poin dari ribuan pasien secara simultan (Raza dkk., 2021; Coulby & Young, 2021). Pada lapisan ini, data dari berbagai perangkat dan pasien diintegrasikan, disimpan, dan dianalisis menggunakan algoritma kecerdasan buatan (AI) (Debauche dkk., 2022). Di cloud, algoritma machine learning dapat dijalankan untuk mendeteksi anomali, memprediksi risiko, atau menghasilkan ringkasan klinis. Teknologi blockchain juga dapat diintegrasikan untuk mengamankan pertukaran dan berbagi data melalui smart contract, sementara federated learning memungkinkan pelatihan algoritma AI dengan tetap menghormati privasi dan kerahasiaan data (Debauche dkk., 2022).
- d. **Lapisan Aplikasi:** Lapisan teratas menyediakan antarmuka bagi pengguna akhir baik klinisi, pasien, maupun sistem otomatis untuk mengakses informasi kesehatan yang telah diproses. Data yang telah diproses disajikan kepada pengguna akhir melalui dashboard web atau aplikasi seluler. Aplikasi ini harus dirancang dengan prinsip *user-centered design* agar informasinya mudah dipahami dan dapat ditindaklanjuti (Kettley, 2021). Aplikasi pada lapisan ini dapat berupa dashboard pemantauan pasien, sistem peringatan dini, maupun platform telemedis. Contohnya adalah platform Fitabase yang memungkinkan peneliti mengelola data dari ribuan partisipan yang menggunakan Fitbit, atau aplikasi untuk pemantauan pasien COVID-19 yang dikembangkan oleh tim UNSW (Biswas, 2025). Arsitektur ini dirancang agar sangat dapat

dikonfigurasi dan modular, mendukung pembuatan aplikasi yang sepenuhnya dapat disesuaikan dengan menggunakan kembali layanan dan perangkat yang ada.

Keempat lapisan ini bekerja secara sinergis menciptakan ekosistem yang oleh Godfrey dkk. (2021) disebut sebagai “*laboratorium hidup*” di mana pemantauan kesehatan tidak lagi terbatas di klinik, tetapi berlangsung terus-menerus dalam keseharian pasien. Tantangan utama dalam arsitektur loMT meliputi keamanan, interoperabilitas, dan keterbukaan. Edge-cloud computing memang sangat cocok untuk jaringan 5G, namun membawa banyak masalah keamanan, ancaman, dan isu privasi (Debauche dkk., 2022). Oleh karena itu, pendekatan keamanan *by design* menjadi sangat krusial, di mana akses ke layanan hanya diberikan kepada pengguna yang berwenang berdasarkan peran pengguna dan kebijakan akses



Gambar 20. Cloud computing and its role in Internet of Things-based smart healthcare system.

Jenis-jenis Perangkat

Perangkat dalam ekosistem loMT dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama berdasarkan cara interaksinya dengan tubuh pasien: wearable, implantable, dan ambient.

Wearable Devices (Perangkat yang Dikenakan)

Kategori ini adalah yang paling dikenal masyarakat dan paling mudah diakses oleh konsumen dan pasien. Wearable dirancang untuk dikenakan di permukaan tubuh, biasanya dalam waktu lama, dan mampu mengumpulkan data fisiologis secara kontinu tanpa prosedur invasif.

Smartwatch dan Fitness Tracker

Apple Watch, Fitbit, Garmin, dan Samsung Galaxy Watch telah mengintegrasikan berbagai sensor canggih. Smartwatch dengan kemampuan perekaman elektrokardiogram (EKG) telah merevolusi pemantauan jantung di luar lingkungan klinis. Akses tak terbatas ke EKG menggunakan smartwatch yang dijual bebas merupakan revolusi nyata dalam disiplin kardiologi, dan aplikasinya berkembang pesat hingga mencakup pasien dengan perangkat elektronik jantung implan seperti pacemaker dan implantable cardioverter defibrillator (ICD) (Strik dkk., 2024). Apple Watch Series 4 dan selanjutnya memiliki sensor EKG yang telah mendapatkan izin FDA untuk mendeteksi fibrilasi atrium (Harte dkk., 2021).

Studi oleh Strik dkk. menunjukkan bahwa EKG smartwatch dapat mengungkapkan informasi tentang fungsi perangkat implan, mengonfirmasi fungsi normal perangkat, atau membantu dalam *troubleshooting* perangkat (Strik dkk., 2024). Sebagai contoh, terdapat kasus seorang pria berusia 32 tahun dengan pacemaker dual-chamber yang mengalami intoleransi latihan, di mana diagnosis blok upaya 2:1 berhasil ditegakkan melalui smartwatchnya yang menunjukkan penurunan mendadak denyut jantung dari 150 ke 75 bpm menggunakan sensor photoplethysmography (Strik dkk., 2024). Selain EKG, perangkat ini juga mengukur detak jantung optik (photoplethysmography/PPG), langkah, kualitas tidur, dan bahkan mendeteksi jatuh. Meski demikian, akurasi sensor ini bervariasi dan perlu divalidasi untuk penggunaan klinis (Harte dkk., 2021).

Dari sisi keamanan, studi oleh Lacour dkk. dan Tzeis dkk. mengevaluasi interferensi elektromagnetik yang dihasilkan smartwatch pada pasien dengan perangkat jantung implan transvenous dan melaporkan tidak ada bukti interaksi perangkat ke perangkat, bahkan dalam kondisi “*worst-case*” dengan penempatan wearable langsung di atas perangkat implan (Strik dkk., 2024). Namun, penelitian lain menunjukkan bahwa medan magnet statis dari iPhone 12 dan Apple Watch 6 secara signifikan lebih besar dari 10 Gauss pada jarak sangat dekat (1-11 mm), yang berpotensi memicu mode magnet pada *pacemaker* dan ICD (Seidman dkk., 2021).

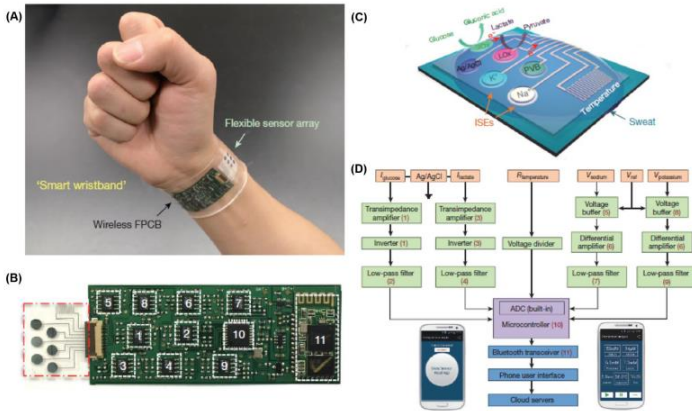
Temuan ini mendukung rekomendasi FDA agar pasien menjaga jarak minimal 6 inci antara perangkat elektronik konsumen dan perangkat medis implan (Seidman dkk., 2021).

Continuous Glucose Monitor (CGM)

Perangkat seperti FreeStyle Libre dari Abbott telah merevolusi manajemen diabetes. Sistem pemantauan glukosa kontinu (CGM) telah merevolusi manajemen glukosa pada pasien diabetes. Perangkat implan kulit yang mampu mengintegrasikan pemantauan glukosa kontinu dan sistem pengiriman insulin otomatis telah mengubah paradigma pengelolaan diabetes (Lee dkk., 2025).

Sensor kecil ditanam di bawah kulit lengan atas dan mengukur glukosa interstitial setiap 1-15 menit. Data dibaca dengan menempelkan pembaca atau smartphone menggunakan NFC (Kim, 2021). Pasien tidak perlu lagi menusuk jari berkali-kali. CGM bekerja dengan sensor subkutan kecil yang mengukur kadar glukosa dalam cairan interstitial secara real-time dan mengirimkan data ke perangkat penerima atau smartphone. FreeStyle Libre mendapatkan persetujuan FDA melalui jalur *Premarket Approval* (PMA) yang ketat, menunjukkan komitmen terhadap validasi klinis (Harte dkk., 2021). Sensor antenna microwave juga telah dikembangkan untuk pemantauan glukosa kontinu sebagai bagian dari perangkat medis implan (Patil & Rufus, 2022).

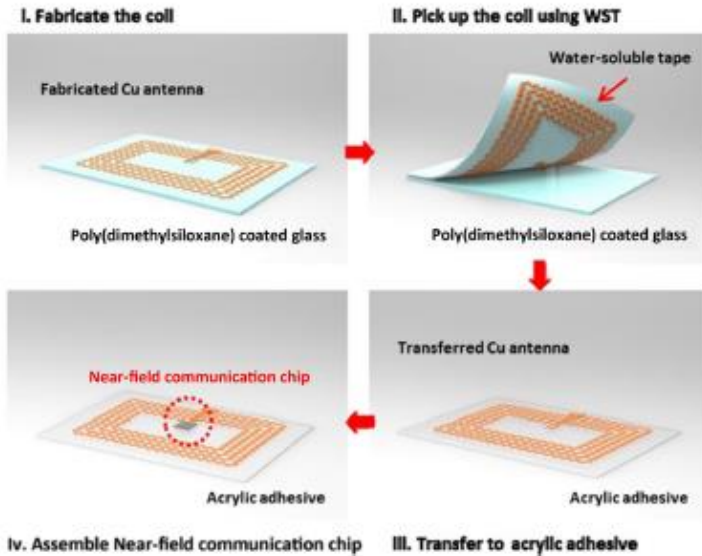




Gambar 21. FreeStyle Libre dan Smart Wristband untuk memonitor kadar glukosa dan asam laktat pasien

Patch Sensor

Berbeda dengan smartwatch yang kaku, *patch sensor* dirancang sangat fleksibel dan tipis sehingga nyaman dipakai 24/7. Contohnya adalah VitalPatch yang mengukur EKG, detak jantung, suhu, dan langkah (Harte dkk., 2021). Peneliti dari Northwestern University dan University of Glasgow mengembangkan berbagai patch fleksibel untuk pengukuran suhu, EKG, hingga analisis keringat yang terintegrasi dengan NFC (Kim, 2021; Hosseini dkk., 2021). Bahkan ada patch yang dapat larut dalam tubuh (*bioresorbable*) setelah masa pakainya habis, cocok untuk pemantauan pasca operasi tanpa perlu operasi pengangkatan (Kim, 2021).



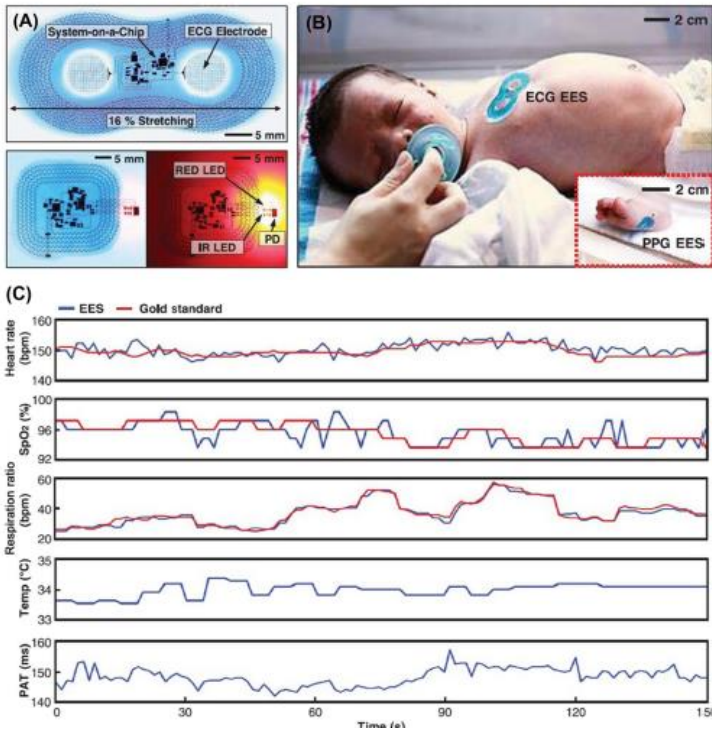
Gambar 22. Pacht sensor digunakan dalam berbagai monitoring kesehatan pasien (Godfrey dan Stuart 2021)

Smart shirt

Sensor juga dapat ditenun langsung ke dalam pakaian. “*Smart shirt*” seperti Hexoskin atau produk dari Cityzen Sciences dapat memonitor detak jantung, frekuensi napas, dan aktivitas tanpa terasa sebagai perangkat asing (Allen dkk., 2021). Untuk olahraga, pakaian ini sangat berharga karena tidak mengganggu performa atlet (Stuart dkk., 2021).

Wearable Cardioverter-Defibrillator (WCD)

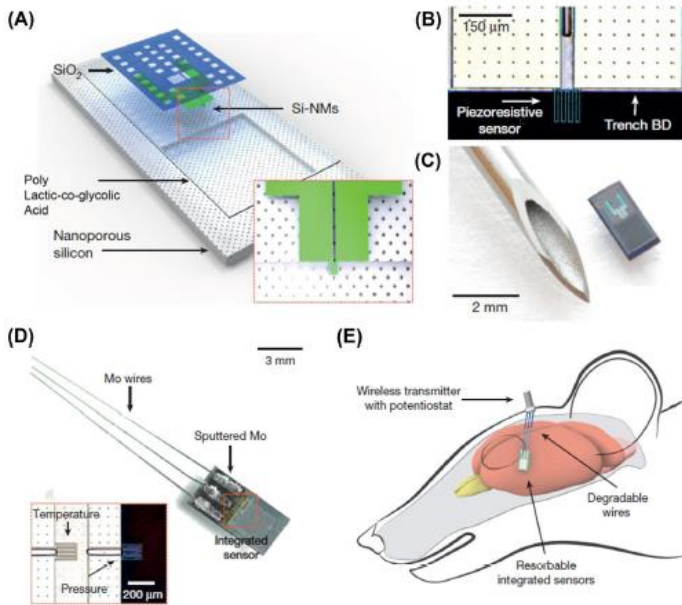
Selain smartwatch, terdapat pula *wearable cardioverter-defibrillator* yang berfungsi sebagai jembatan perlindungan bagi pasien yang menunggu evaluasi akhir untuk penempatan permanen perangkat ICD implan (Tobb dkk., 2020). WCD merupakan contoh perangkat wearable tingkat medis yang mampu mendeteksi aritmia dan memberikan terapi defibrilasi tanpa memerlukan implantasi.



Gambar 23. Elektrokardiogram sensor

Implantable Devices (Perangkat yang Ditanam)

Perangkat implan elektronik mendorong inovasi dalam teknologi medis modern dan telah secara signifikan meningkatkan kualitas hidup pasien (Lee dkk., 2025). Kategori ini mencakup berbagai perangkat yang ditanamkan di dalam tubuh untuk fungsi terapeutik dan diagnostik. Karena berada di dalam tubuh, tantangannya adalah biokompatibilitas, daya tahan, dan pasokan daya.



Gambar 24. Sensor yang dipasang kedalam tubuh manusia untuk memonitoring keadaan tertentu dari pasien

Smart Pacemaker dan Leadless Pacemaker

Pacemaker jantung merupakan salah satu perangkat jantung implan yang paling sering dijumpai (Kuang dkk., 2021). Evolusi teknologi pacemaker telah menghasilkan berbagai jenis, termasuk pacemaker kamar tunggal, kamar gkita, pacemaker untuk terapi resinkronisasi jantung (CRT), CRT nirkabel, pacemaker tanpa kabel (leadless), dan ICD subkutan (Kuang dkk., 2021). Pacemaker modern tidak hanya mengatur irama jantung, tetapi juga dapat mengirimkan data telemetri secara nirkabel ke klinisi. Pasien dengan ICD dapat dipantau jarak jauh; jika terjadi aritmia atau gangguan perangkat, dokter segera mendapat notifikasi (Biswas dkk., 2021). Ini mengurangi kunjungan rumah sakit yang tidak perlu.

Pacemaker leadless merupakan inovasi signifikan yang mengurangi risiko infeksi terkait kabel transvenous. Studi menunjukkan bahwa implantasi pacemaker leadless pada pasien pasca-ekstraksi perangkat terbukti menjadi pilihan efektif dalam mengurangi kekambuhan reinfeksi (Dentico dkk., 2022). Kemajuan terbaru

mencakup sistem pacemaker leadless dual-chamber, seperti perangkat Abbott AVEIR DR, yang merupakan satu-satunya sistem pacemaker leadless dual-chamber yang tersedia, melibatkan dua perangkat leadless terpisah satu ditanamkan di atrium dan satu lagi di ventrikel kanan yang berkomunikasi secara lokal untuk memungkinkan pacing dan sensing dual-chamber (Wan dkk., 2024).

Implantable Cardioverter-Defibrillator (ICD)

ICD melakukan kardioversi, defibrilasi, dan pacing jantung, serta mengoreksi sebagian besar aritmia jantung yang mengancam jiwa (Chan dkk., 2021). Sekitar 3 juta orang di Amerika Serikat hidup dengan perangkat pacemaker/defibrillator implan, dengan rata-rata 600.000 perangkat baru ditanamkan setiap tahun (Calavia dkk., 2022). Studi Modular ATP merupakan uji klinis pertama yang mengevaluasi keamanan dan efektivitas sistem manajemen irama jantung modular yang menggabungkan pacemaker leadless nirkabel dan ICD subkutan, memverifikasi efektivitas anti-tachycardia pacing untuk aritmia ventrikel (Lee dkk., 2025). Di antara 151 pasien yang dianalisis, tingkat terminasi aritmia akibat terapi ATP adalah 61,3%, tingkat keberhasilan komunikasi perangkat ke perangkat sangat tinggi yaitu 98,8%, dan tidak ada kasus ketidaknyamanan terkait efek pacing yang dilaporkan (Lee dkk., 2025).

Sensor Tekanan Arteri Pulmonal

Perangkat implan yang paling efektif untuk pemantauan gagal jantung jarak jauh adalah sensor tekanan arteri pulmonal, seperti *CardioMEMS*, yang telah terbukti aman dan menunjukkan pengurangan rawat inap akibat gagal jantung (Gill, 2022). Sistem sensor arteri pulmonal untuk pemantauan tekanan dievaluasi dalam uji klinis multisenter acak untuk menilai efektivitas teknologi ini dalam mengurangi rawat inap gagal jantung dan meningkatkan luaran pasien melalui pemantauan hemodinamik kontinu (Lee dkk., 2025).

Implan Bioresorbable

Inovasi menarik dari Kim dkk. (2021) adalah sensor tekanan dan suhu yang terbuat dari silikon dan molibdenum yang dapat larut dalam cairan tubuh. Implan ini dirancang untuk dipasang di otak pasien cedera kepala traumatik. Setelah masa kritis berlalu (misalnya 3-4 minggu), sensor larut dengan sendirinya, menghindari operasi kedua untuk mengambilnya. Teknologi ini menjanjikan untuk pemantauan tekanan intrakranial atau penyembuhan luka dalam.

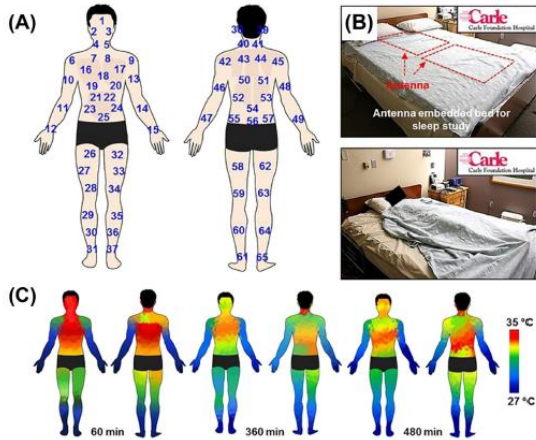
Sensor Terintegrasi pada Implan

Integrasi sensor dengan implan memungkinkan pemantauan *real-time* dan mengarah pada peningkatan fungsi implan. Integrasi sensor telah banyak diterapkan pada implan kardiovaskular, neural, dan ortopedi, dan kemajuan dalam perangkat gabungan implan-sensor telah signifikan. Namun, tantangan spesifik tetap ada; misalnya, sensor akselerometer pada pacemaker mungkin tidak merespons selama latihan sangat intens yang melibatkan sedikit gerakan tubuh, dan sensor volume mungkin tidak dapat dikitalkan pada pasien dengan hiperventilasi dan penyakit paru obstruktif (Veletić dkk., 2022).

Ambient Devices (Perangkat Lingkungan)

Tidak semua sensor harus menempel di tubuh. Perangkat ambient merupakan komponen IoMT yang ditempatkan di lingkungan tempat tinggal pasien, khususnya untuk mendukung kemandirian lansia. Penuaan populasi dunia, keinginan lansia untuk tetap mandiri, dan pandemi COVID-19 telah menunjukkan kebutuhan mendesak akan sistem diagnostik dan pemantauan pasien berbasis rumah. Arsitektur IoMT seperti RAMi dirancang khusus untuk memungkinkan pemantauan orang lanjut usia dan pasien selama dan setelah rawat inap mereka (Debauche dkk., 2022).

- a. **Sensor Gerak dan Kontak Pintu:** Dipasang di ruangan, lemari es, atau tempat tidur, sensor ini dapat mendeteksi pola aktivitas harian. Jika lansia tidak keluar kamar pada jam biasanya, atau lemari es tidak dibuka seharian, sistem dapat mengirimkan peringatan ke keluarga atau petugas (Biswas dkk., 2021). Ini membantu deteksi dini penurunan fungsi atau kejadian seperti jatuh. Sensor ambient di rumah pintar dapat mencakup sensor gerak, sensor jatuh, sensor kualitas udara, dan sensor aktivitas harian yang terintegrasi dengan platform IoMT. Data dari sensor-sensor ini dikirimkan melalui gateway ke cloud untuk dianalisis, memungkinkan deteksi dini perubahan pola aktivitas yang mungkin mengindikasikan penurunan kondisi kesehatan.
- b. **Sistem Pemantau Tidur:** Matras khusus dengan sensor tekanan dapat memonitor gerakan, detak jantung, dan napas tanpa kontak langsung. Data ini sangat berguna untuk manajemen pasien dengan gangguan tidur atau risiko luka tekan (Allen dkk., 2021). Pemantauan jarak jauh dengan perangkat implan menyediakan data esensial yang dapat digunakan bersama dengan manajemen pasien standar untuk mengurangi rawat inap (Gill, 2022).



Gambar 25. Sensor yang digunakan untuk memonitoring tidur (*sleep monitoring*)

Aplikasi Klinis

Kombinasi perangkat di atas membuka berbagai kemungkinan aplikasi klinis yang sebelumnya sulit diwujudkan.

Manajemen Penyakit Kronis

a. **Diabetes Mellitus (DM):** Manajemen diabetes telah mengalami transformasi signifikan berkat IoMT. CGM seperti FreeStyle Libre memungkinkan pasien dan dokter melihat profil glukosa 24 jam. Perangkat implan kulit telah merevolusi manajemen glukosa pada pasien diabetes dengan meng-integrasikan pemantauan glukosa kontinu dan sistem pengiriman insulin otomatis (Lee dkk., 2025). Fluktuasi yang tidak terdeteksi oleh pengukuran sesekali dapat diketahui, sehingga penyesuaian dosis insulin atau pola makan lebih tepat. Studi IMPACT dan REPLACE menunjukkan efektivitasnya dalam menurunkan HbA1c dan mengurangi hipoglikemia (Harte dkk., 2021). Sensor antena microwave dapat digunakan untuk pemantauan glukosa kontinu sebagai bagian dari perangkat medis implan (Patil & Rufus, 2022). Sistem CGM modern terhubung ke smartphone dan platform cloud, memungkinkan pasien dan klinisi memantau tren glukosa secara real-time, mengidentifikasi pola, dan menyesuaikan terapi insulin secara proaktif. Integrasi CGM dengan pompa insulin otomatis sering disebut sebagai sistem “*closed-loop*” atau “*pankreas*”

buatan” merepresentasikan puncak penerapan IoMT dalam manajemen diabetes, di mana sistem secara otomatis menyesuaikan pengiriman insulin berdasarkan pembacaan glukosa real-time.

- b. Hipertensi dan Gagal Jantung:** Omron HeartGuide adalah smartwatch pertama dengan manset terintegrasi yang dapat mengukur tekanan darah secara akurat (Harte dkk., 2021). Pasien dapat melakukan pengukuran terjadwal, dan data otomatis tersinkronisasi ke aplikasi. Dokter dapat melihat tren tekanan darah di antara kunjungan, membantu evaluasi efektivitas terapi. Pemantauan hemodinamik jarak jauh dengan perangkat implan juga telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam manajemen gagal jantung. Perangkat elektronik jantung implan kardiovaskular, yaitu ICD dan perangkat CRT dengan defibrillator (CRT-D), telah berevolusi melampaui fungsi resinkronisasi semata dan saat ini dapat menyampaikan hemodinamik jantung real-time (Gill, 2022). Uji klinis landmark telah menunjukkan bahwa perangkat ini meningkatkan mortalitas semua penyebab dan mengurangi rawat inap serta kematian mendadak pada pasien gagal jantung akibat disfungsi sistolik (Gill, 2022). Pemantauan berat badan harian dan detak jantung melalui perangkat wearable juga dapat mendeteksi tdkita-tkita dekompensasi lebih awal. Kenaikan berat badan mendadak karena retensi cairan dapat segera direspons dengan penyesuaian diuretik, mencegah perawatan ulang di rumah sakit (Biswas dkk., 2021). Sensor tekanan arteri pulmonal CardioMEMS telah terbukti aman dan menunjukkan pengurangan rawat inap akibat gagal jantung, menjadikannya perangkat implan paling efektif untuk pemantauan gagal jantung jarak jauh (Gill, 2022). Selain itu, beberapa perangkat baru yang dikembangkan saat ini sedang dalam investigasi setelah studi *first-in-man* yang berhasil (Gill, 2022). Pemantauan jarak jauh perangkat jantung implan juga telah dikaitkan dengan pengurangan rawat inap, masa rawat yang lebih pendek, dan biaya rumah sakit yang lebih rendah (Lehmann dkk., 2023). Sejak implantasi pacemaker jantung pertama pada Oktober 1958, penggunaan perangkat elektronik jantung implan telah berkembang secara dramatis, dengan antara satu hingga dua juta implan tahunan dipasang di seluruh dunia (Lappegård & Moe, 2021).
- c. Aritmia Jantung:** Implantasi pacemaker pada pasien dengan *sick sinus syndrome* dan blok atrioventrikular derajat tinggi menunjukkan efek positif yang signifikan dan sangat kital terhadap

kualitas hidup terkait mobilitas, perawatan diri, dan aktivitas biasa (Kuridze dkk., 2024). Demikian pula, implantasi perangkat resinkronisasi jantung pada individu dengan gagal jantung berat dengan fraksi ejeksi ventrikel kiri yang berkurang dan QRS lebar menunjukkan efek positif yang signifikan (Kuridze dkk., 2024). Perangkat elektronik jantung implan memainkan peran krusial tidak hanya dalam menyelamatkan nyawa tetapi juga dalam berdampak positif pada kualitas hidup pasien ketika dipilih secara tepat (Kuridze dkk., 2024).

Rehabilitasi Jarak Jauh

Rehabilitasi pasca cedera, seperti setelah stroke atau operasi lutut, seringkali terhambat oleh akses ke fisioterapis. IoMT memungkinkan paradigma baru dalam rehabilitasi jarak jauh (*telerehabilitation*). Sensor inersia (IMU) yang ditempel di tungkai dapat mengukur kualitas gerakan selama pasien melakukan latihan di rumah (Godfrey dkk., 2021; Clark dkk., 2021). Aplikasi memberikan umpan balik visual atau audio jika gerakan salah, dan data perkembangan dikirim ke fisioterapis. Proyek "*Connexyle*" oleh Jessica Smarsch (Kettley, 2021) bahkan merancang lengan sensorik yang estetik, dengan konsep filosofis Jepang *kintsugi*, untuk rehabilitasi stroke, sehingga pasien merasa lebih percaya diri.

Smartwatch dengan EKG memberdayakan pasien untuk secara proaktif memantau kesehatan jantung mereka dan mendeteksi potensi kelainan atau iregularitas dengan cepat (Strik dkk., 2024). Dengan kemampuan menyimpan dan berbagi data EKG, pasien dapat berpartisipasi aktif dalam perjalanan perawatan kesehatan mereka dengan memberikan informasi akurat kepada penyedia layanan kesehatan, yang mengarah pada pengambilan keputusan yang lebih terinformasi dan rencana perawatan yang dipersonalisasi (Strik dkk., 2024). Dalam konteks rehabilitasi jantung, aktivitas fisik reguler telah mulai dipahami sebagai bagian dari terapi dan oleh karena itu "*diresepan*" (Sciarra dkk., 2020). Rekomendasi telah ada untuk pasien dengan penyakit arteri koroner yang sudah mapan, di mana bukti mengonfirmasi manfaat aktivitas fisik reguler dan hati-hati (Sciarra dkk., 2020). Pemantauan jarak jauh memungkinkan klinisi untuk mengawasi parameter aktivitas fisik pasien selama program rehabilitasi, menyesuaikan intensitas latihan berdasarkan data real-time, dan mendeteksi dini tkita-tkita komplikasi.

Dalam olahraga, sistem seperti Output Sports menggunakan satu sensor untuk mengukur berbagai parameter performa (lompatan, kekuatan, kecepatan), menggantikan beberapa alat mahal dan rumit

(Hickey, 2021). Atlet yang cedera dapat menjalani rehabilitasi dengan panduan jarak jauh, dengan data obyektif memastikan mereka siap kembali bertanding. Arsitektur IoMT yang dirancang untuk pemantauan lansia memungkinkan tindak lanjut pasien selama dan setelah rawat inap mereka (Debauche dkk., 2022), yang sangat relevan untuk program rehabilitasi pasca-stroke, pasca-operasi jantung, atau pasca-fraktur pada populasi geriatri.

Pemantauan Pasien Pasca Operasi

Pasien yang dipulangkan lebih awal setelah operasi tetap berisiko mengalami komplikasi seperti infeksi luka, perdarahan, atau dehidrasi. Perangkat wearable dapat memantau kita vital di rumah. Contohnya adalah penggunaan patch suhu pada neonatus untuk mendeteksi demam dini (Ridgers & Drehlich, 2021). Sistem telemedicine yang dikembangkan selama pandemi COVID-19 oleh tim UNSW memungkinkan pasien isolasi mandiri dipantau oksimetrianya dari jarak jauh (Biswas dkk., 2021). Jika saturasi oksigen turun, tim medis segera dihubungi.

Pemantauan pasca operasi merupakan salah satu aplikasi IoMT yang paling kritis. Setelah implantasi perangkat jantung, pemantauan parameter *lead* termasuk impedansi, *sensing*, dan *threshold pacing* sangat penting untuk memastikan fungsi perangkat yang optimal (Karalük, 2026). Studi menunjukkan bahwa penurunan impedansi *lead* yang signifikan terjadi dalam 12 jam pertama setelah implantasi pacemaker, sementara *threshold sensing* dan *pacing* tetap stabil, mengonfirmasi kekitalan jangka pendek *lead pacing* dan defibrilasi modern (Karalük, 2026).

Pemantauan jarak jauh perangkat jantung implan telah menjadi standar perawatan pasca operasi. Semua responden dalam survei internasional melakukan evaluasi tatap muka setidaknya sekali setahun, dan pemantauan jarak jauh dilakukan setiap 3 bulan untuk pacemaker dan ICD oleh 71% dan 75% responden (Olen dkk., 2021). Panduan pemantauan jarak jauh yang terstandarisasi dapat memaksimalkan peluang untuk deteksi dini dan intervensi masalah sistem perangkat, memperpanjang umur baterai perangkat, memungkinkan deteksi dini kejadian hemodinamik dan merugikan, serta meminimalkan evaluasi tatap muka dan pengujian yang berlebihan (Olen dkk., 2021).

Di NICU, prematuritas membutuhkan pemantauan ketat tetapi kabel dan elektroda konvensional dapat melukai kulit rapuh mereka. Solusi NFC tanpa baterai yang ditempel di dada dan kaki bayi memungkinkan pemantauan EKG dan PPG tanpa kabel, mengurangi

trauma dan memudahkan perawatan (Kim, 2021). Dalam konteks pasca operasi non-jantung pada pasien dengan perangkat implan, manajemen periprocedural yang tepat sangat penting. Kemajuan teknologi yang cepat dalam perangkat elektronik jantung implan, ditambah dengan peningkatan jumlah pasien dengan perangkat ini, memerlukan kerangka klinis yang diperbarui untuk manajemen periprocedural (Wan dkk., 2024). Pengenalan pacemaker leadless, defibrillator subkutan dan ekstrasvaskular, serta protokol komunikasi perangkat baru menggarisbawahi keharusan untuk pembaruan klinis (Wan dkk., 2024).

Tantangan dalam Implementasi IoMT

Meskipun potensinya luar biasa, penerapan IoMT secara luas masih menghadapi tantangan signifikan.

- a. **Akurasi Sensor dan Validasi Klinis:** Akurasi sensor merupakan tantangan fundamental dalam IoMT. Tidak semua perangkat wearable diciptakan sama. Banyak perangkat konsumen yang belum divalidasi secara independen untuk populasi atau kondisi tertentu (Harte dkk., 2021; Hickey, 2021). Pengukuran detak jantung dari pergelangan tangan bisa akurat saat istirahat, tetapi error saat intensitas olahraga tinggi karena gerakan (Stuart dkk., 2021). Algoritma yang digunakan juga sering menjadi “kotak hitam” tanpa transparansi. Kerangka kerja seperti V3 (*Verification, Analytical Validation, Clinical Validation*) diperlukan untuk memastikan perangkat layak pakai untuk tujuan klinis (Harte dkk., 2021).

Pada perangkat implan jantung, sensor akselerometer mungkin tidak merespons selama latihan sangat intens yang melibatkan sedikit gerakan tubuh atau dalam momen stres emosional, dan sensor volume mungkin tidak dapat dikaitkan pada pasien dengan hiperventilasi dan penyakit paru obstruktif. Kegagalan insulasi *lead* yang terlihat pada *lead sensing* endokardial ICD merepresentasikan tantangan signifikan dan merupakan penyebab yang mungkin dari kejutan tidak tepat yang terlihat pada pasien (Veletić dkk., 2022). Pada smartwatch, meskipun EKG yang direkam dapat memberikan informasi berharga tentang fungsi perangkat implan, terdapat keterbatasan dalam interpretasi, terutama pada pasien dengan ritme pacing yang kompleks (Strik dkk., 2024).

Diagnostik perangkat mungkin mendeteksi kegagalan *lead* yang akan datang pada hampir 50% kasus, di mana pemantauan jarak jauh berbasis sensor dapat menjadi solusi potensial dan mencegah kejadian merugikan terkait kegagalan (Veletić dkk., 2022). Untuk CGM, akurasi pengukuran glukosa interstisial versus glukosa darah tetap menjadi area yang memerlukan perbaikan berkelanjutan, dengan faktor-faktor seperti tekanan pada sensor, perubahan suhu, dan variasi individual dalam respons jaringan yang dapat mempengaruhi akurasi pembacaan.

- b. **Masa Pakai Baterai dan Sumber Daya:** Masa pakai baterai merupakan salah satu tantangan paling kritis dalam perangkat medis implan. Perangkat yang harus dicharge setiap hari akan sulit diadopsi, terutama oleh lansia. Trade-off antara ukuran kecil, fungsionalitas, dan daya tahan baterai selalu ada. Perangkat biomedis implan seperti stimulator otak dalam, ICD, dan pacemaker jantung sangat penting untuk mengobati penyakit jantung dan otak, namun bergantung pada baterai untuk operasinya (Upendra dkk., 2023). Baterai konvensional hanya bertahan beberapa tahun, dan operasi tambahan diperlukan untuk penggantian (Xü dkk., 2020). Umur pacemaker diharapkan antara 10 hingga 12 tahun, yang menunjukkan pentingnya teknik desain daya ultra-rendah untuk meningkatkan ketahanan dan umur baterai sistem (Aneesh dkk., 2022).

Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai pendekatan pemanenan energi (*energy harvesting*) telah dikembangkan. Solusi seperti NFC dan pengumpulan energi dari gerakan atau panas tubuh sedang dikembangkan, tetapi belum matang untuk semua aplikasi (Kim, 2021; Clark dkk., 2021). Pemanenan energi langsung dari tubuh manusia memungkinkan paradigma baru sumber daya mandiri untuk perangkat medis implan tanpa dibatasi oleh umur baterai yang terbatas (Xü dkk., 2020). Penelitian terkini menunjukkan pengembangan pemanenan energi jantung multibeam menggunakan film komposit piezoelektrik yang dapat dipasang pada *lead* pacemaker untuk memanen energi dari gerakan kompleks *lead* yang digerakkan oleh detak jantung (Xü dkk., 2020). Hal ini dapat memperpanjang umur kerja pacemaker dan mengurangi risiko serta biaya operasi penggantian baterai (Xü dkk., 2020). Pengembangan baterai Li-ion baru untuk generasi baru defibrillator/pacemaker dengan umur lebih dari 10 kali lebih lama dan lebih aman dari teknologi saat ini juga sedang dilakukan

(“*Ultrananocrystalline Diamond Coatings for Next-Generation High-Tech and Medical Devices*”, 2022). Sistem implan biodegradable dan *closed-loop* untuk elektroterapi otonom juga sedang dikembangkan, yang dapat mencapai pemantauan ritme jantung dan elektroterapi otonom (Zhang & Zhang, 2023).

- c. **Interoperabilitas Data:** Interoperabilitas data merupakan tantangan sistemik dalam ekosistem IoMT. Ekosistem IoMT saat ini sangat terfragmentasi. Data dari Fitbit tidak otomatis masuk ke rekam medis elektronik rumah sakit. Standar data yang berbeda, API yang tertutup, dan kurangnya kemauan berbagi dari perusahaan komersial menghambat integrasi (Coulby & Young, 2021; Parrington dkk., 2021). Platform agregator seperti Fitabase dan Human API mencoba menjembatani kesenjangan ini, tetapi adopsi masih terbatas. Inisiatif seperti *Health Level Seven International (HL7)* dan *Fast Healthcare Interoperability Resources (FHIR)* terus didorong untuk menciptakan bahasa universal data kesehatan.

Dengan berbagai produsen perangkat, protokol komunikasi, dan format data yang berbeda, integrasi data dari berbagai sumber menjadi sangat kompleks. Sistem perangkat jantung implan campuran merek (*mixed-brand*), yang terdiri dari generator dari satu produsen dan setidaknya satu *lead* dari produsen lain, tidak bersertifikat untuk MRI (Saporito dkk., 2024). Prevalensi implan campuran merek menunjukkan fluktuasi temporal yang signifikan, pertama menurun dari 6,6% (2012-2014) menjadi 1,3% (2019), kemudian meningkat menjadi 5,1% (2022) (Saporito dkk., 2024).

Tantangan interoperabilitas juga muncul dalam konteks arsitektur IoMT itu sendiri. Mengamankan jaringan IoT dan mengatasi tantangan keamanan, keterbukaan, dan interoperabilitas merupakan prioritas utama. Arsitektur yang sangat dapat dikonfigurasi dan modular diperlukan untuk mendukung keragaman perangkat IoT yang luas. Solusi seperti blockchain lokal untuk orkestrasi beban kerja antara Fog, MEC, dan Cloud, serta blockchain global untuk mengamankan pertukaran dan berbagi data, telah diusulkan (Debauche dkk., 2022).

Variasi internasional dalam praktik klinis juga menambah kompleksitas interoperabilitas. Studi perbandingan antara Jepang dan Amerika Serikat menunjukkan variasi internasional dalam karakteristik pasien, praktik, dan luaran terapi perangkat jantung implan. Lama rawat inap setelah implantasi perangkat secara signifikan lebih lama di Jepang dibandingkan di Amerika Serikat untuk semua jenis perangkat (Tonegawa-Kuji dkk., 2023), yang mencerminkan perbedaan dalam protokol dan sistem kesehatan yang mempersulit standarisasi data lintas negara.

Selain itu, interferensi elektromagnetik (EMI) dari peralatan medis dan perangkat konsumen tetap menjadi perhatian. Elektrokauter yang umum digunakan selama berbagai operasi dapat menyebabkan EMI dengan perangkat elektronik jantung implan, yang mencegah fungsi normal perangkat (Guglietta dkk., 2024). Kerusakan pada generator, inhibisi pacing, aktivasi pacing asinkron, dan fibrilasi ventrikel semuanya dapat diinduksi oleh elektrokauter. Rencana manajemen aktif untuk perangkat selama elektrokauter sangat penting untuk meminimalkan efek merugikan EMI ini.

- d. **Keamanan dan Privasi:** Keamanan siber dan privasi data merupakan tantangan yang semakin mendesak seiring dengan meningkatnya konektivitas perangkat medis. Data kesehatan adalah data paling sensitif. Perangkat yang terhubung ke internet rentan terhadap peretasan. Kasus peretasan pacemaker secara teoretis telah dibuktikan. Edge-cloud computing membawa banyak masalah keamanan, ancaman, dan isu privasi (Debauche dkk., 2022). Regulasi seperti GDPR di Eropa dan HIPAA di Amerika Serikat mewajibkan enkripsi dan perlindungan data, tetapi implementasi teknisnya tetap menjadi tantangan (Raza dkk., 2021). Selain itu, aspek etika tentang kepemilikan data dan persetujuan pasien harus dikelola dengan hati-hati.

Penggunaan federated learning untuk melatih algoritma AI sambil menghormati privasi dan kerahasiaan data merupakan salah satu pendekatan yang menjanjikan. AI juga digunakan untuk mendeteksi pola intrusi yang dapat mengancam keamanan sistem IoMT (Debauche dkk., 2022). Kompatibilitas elektromagnetik (EMC) dalam perangkat medis implan seperti pacemaker jantung dan stimulator saraf vagus sangat penting untuk mempertahankan fungsi yang stabil dan normal. Kerentanan elektromagnetik (EMS) sering digunakan untuk mendefinisikan imunitas terhadap EMI, yang menyiratkan tingkat malfungsi sistem elektronik di bawah berbagai tingkat EMI (Wang & Lin, 2022).

Dengan mengatasi tantangan-tantangan ini melalui kolaborasi antara teknolog, klinisi, regulator, dan pasien, IoMT berpotensi menjadi fondasi sistem kesehatan masa depan yang lebih proaktif, personal, dan efisien. Kolaborasi interdisipliner antara insinyur, klinisi, dan ilmuwan data akan menjadi kunci untuk mengakselerasi translasi teknologi IoMT ke dalam praktik klinis yang lebih luas dan inklusif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramov, A. V., & Макушкин, Е. В. (2024). Neurodevelopmental Disorders Caused by Genetic Defects in Structure of Glutamatergic Receptors. *Psikhiatriya*, 22(1), 90–98. <https://doi.org/10.30629/2618-6667-2024-22-1-90-98>
- Adirim T. 2025. . Cham (CH): Springer Nature
- Albuquerque, B. H. D. R. de, & Lanza, D. C. F. (2025). Optimizing Gene Prioritization for Clinical Diagnosis of Metabolic Genetic Disorders. *Plos One*, 20(8), e0331038. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331038>
- Almarwani, M. S. (2024). The Role of Integrated Health Informatics in Streamlining Patient Flow From Emergency Department to Admission: A Review of Administrative and Clinical Synergies. *Saudi Journal of Medicine and Public Health*, 1(2), 1927–1934. <https://doi.org/10.64483/202412551>
- Alum, E. U., Ikpozu, E. N., Offor, C. E., Igwenyi, I. O., Obaroh, I. O., Ibiam, U. A., & Ukaidi, C. U. A. (2025). RNA-based Diagnostic Innovations: A New Frontier in Diabetes Diagnosis and Management. *Diabetes and Vascular Disease Research*, 22(2). <https://doi.org/10.1177/14791641251334726>
- Aneesh, K., Govindaraj, M., & Sam, S. (2022). Design Approaches of Ultra-Low Power SAR ADC for Biomedical Systems — A Review. *Journal of Circuits Systems and Computers*, 31(12). <https://doi.org/10.1142/s0218126622300094>
- Applegate, C., Schiettecatte, F., Hamosh, A., & Amberger, J. (2022). Exploring Genes and Phenotypes Within Chromosomal Regions Using OMIM's GeneScout. *Current Protocols*, 2(9). <https://doi.org/10.1002/cpz1.530>

- Ariani, Y., & Rachmadi, R. A. (2022). Profil Aberasi Kromosom Pasien Malformasi Kongenital Multipel Non-Sindromik. *Ejournal Kedokteran Indonesia*, 10(2), 114–120. <https://doi.org/10.23886/ejki.10.179.114-20>
- Badreddine, J., Tay, K., Lin, H.-T., Rhodes, S., Schumacher, F. R., Bodner, D. R., & Wu, C. W. (2023). Beyond the Kidney: Extra-Renal Manifestations of Monogenic Nephrolithiasis and Their Significance. <https://doi.org/10.1101/2023.05.16.23289588>
- Birgmeier, J., Haeussler, M., Deisseroth, C. A., Steinberg, E., Jagadeesh, K. A., Ratner, A., Guturu, H., Wenger, A. M., Diekhans, M., Stenson, P. D., Cooper, D. N., Ré, C., Beggs, A. H., Bernstein, J. A., & Bejerano, G. (2020). AMELIE Speeds Mendelian Diagnosis by Matching Patient Phenotype and Genotype to Primary Literature. *Science Translational Medicine*, 12(544). <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aau9113>
- Biswas, I. (2025). Relational Accountability in AI-driven Pharmaceutical Practices: An Ethics Approach to Bias, Inequity and Structural Harm. *Journal of Medical Ethics*, jme-2025-110913. <https://doi.org/10.1136/jme-2025-110913>
- Brahimi, S., & Elhoussein, M. (2023). Measuring the Effect of Fraud on Data-Quality Dimensions. *Data*, 8(8), 124. <https://doi.org/10.3390/data8080124>
- Cacheiro, P., Lawson, S., Veyver, I. B. Van den, Marengo, G., Zocche, D., Murray, S. A., Duyzend, M., Robinson, P. N., & Smedley, D. (2024). Lethal Phenotypes in Mendelian Disorders. <https://doi.org/10.1101/2024.01.12.24301168>
- Cai, Z., Zafferani, M., & Hargrove, A. E. (2021). Ensemble Learning-Based Quantitative Structure-Activity Relationship Platform Predicts Binding Behavior of RNA-targeted Small Molecules. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2021-cz19p>
- Calavia, H. L., Awadalla, M., Nasir, S. A., & Hammel, J. (2022). An Atypical Presentation of Twiddler's Syndrome: A Case Report. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.27207>

- Chaari L. 2019. Digital Health Approach for Predictive, Preventive, Personalised and Participatory Medicine. Cham (CH): Springer Nature
- Chan, M. F., Young, C. F., Gelblum, D., Shi, C., Rincón, C. M., Hipp, E., Li, J., & Wang, D. (2021). A Review and Analysis of Managing Commonly Seen Implanted Devices for Patients Undergoing Radiation Therapy. *Advances in Radiation Oncology*, 6(4), 100732. <https://doi.org/10.1016/j.adro.2021.100732>
- Chen, S. (2025). Reframing EHR Policy in China: Towards Balanced Implementation and Ethical Foundations. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 31(7). <https://doi.org/10.1111/jep.70273>
- Chiu, F. P., Doolan, B. J., McGrath, J. A., & Onoufriadis, A. (2021). A Decade of Next-generation Sequencing in Genodermatoses: The Impact on Gene Discovery and Clinical Diagnostics*. *British Journal of Dermatology*, 184(4), 606–616. <https://doi.org/10.1111/bjd.19384>
- Colin, E., Duffourd, Y., Chevarin, M., Tisserant, É., Verdez, S., Paccaud, J., Bruel, A., Mau-Them, F. T., Denommé-Pichon, A., Thévenon, J., Safraou, H., Besnard, T., Goldenberg, A., Cogné, B., Isidor, B., Delanne, J., Sorlin, A., Moutton, S., Fradin, M., ... Vitobello, A. (2023). Stepwise Use of Genomics and Transcriptomics Technologies Increases Diagnostic Yield in Mendelian Disorders. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fcell.2023.1021920>
- Concu, R., Cordeiro, M. N. D. S., Pérez-Pérez, M., & Fdez-Riverola, F. (2023). MOZART, a QSAR Multi-Target Web-Based Tool to Predict Multiple Drug–Enzyme Interactions. *Molecules*, 28(3), 1182. <https://doi.org/10.3390/molecules28031182>

- Corsten-Janssen, N., Bouman, K., Diphooorn, J. C. D., Scheper, A. J., Kinds, R., Mecky, J. e., Breet, H., Verheij, J., Suijkerbuijk, R. F., Duin, L., Manten, G. T. R., Langen, I. M. v., Sijmons, R. H., Sikkema-Raddatz, B., Westers, H., & Diemen, C. C. v. (2020). A Prospective Study on Rapid Exome Sequencing as a Diagnostic Test for Multiple Congenital Anomalies on Fetal Ultrasound. *Prenatal Diagnosis*, 40(10), 1300–1309. <https://doi.org/10.1002/pd.5781>
- Debauche, O., Penka, J. B. N., Mahmoudi, S., Lessage, X., Hani, M., Manneback, P., Lufuluabu, U. K., Bert, N., Messaoudi, D., & Guttadauria, A. (2022). RAMi: A New Real-Time Internet of Medical Things Architecture for Elderly Patient Monitoring. *Information*, 13(9), 423. <https://doi.org/10.3390/info13090423>
- Dentico, A., Ferrieri, A., Epicoco, G., Troccoli, R., Carretta, F., D'Agostino, C., & Carretta, D. (2022). P382 follow-up of Patients Submitted to Transvenous Lead Extraction for Endocarditis or Septic Shock and Then Re-implanted With Leadless Pacemaker: Single Center's Experience. *European Heart Journal Supplements*, 24(Supplement_C). <https://doi.org/10.1093/eurheartj/suac012.368>
- Faida, E. W., Supriyanto, S., Haksama, S., Markam, H., & Ali, A. (2022). The Acceptance and Use of Electronic Medical Records in Developing Countries Within the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology Framework. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 10(E), 326–336. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2022.8409>
- Fan, C., Chen, M., Wang, X., Wang, J., & Huang, B. (2021). A Review on Data Preprocessing Techniques Toward Efficient and Reliable Knowledge Discovery From Building Operational Data. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.652801>

- Faria, A. C. d., Daré, J. K., Cunha, E. F. F. da, & Freitas, M. P. (2022). Computer-Assisted Improvement of Sulfonylureas With Antifungal Properties and Limited Herbicidal Activity: Potential Application in Forage Conservation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(10), 3321–3330. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07352>
- Fong, B., Fong, A. C. M., & Li, C. K. (2020). *Telemedicine Technologies Information Technologies in Medicine and Digital Health* (2nd ed.). John Wiley and Sons Ltd.
- Gamba, A., Salmona, M., & Bazzoni, G. (2021). The Similarity of Inherited Diseases (I): Clinical Similarity Within the Phenotypic Series. *BMC Medical Genomics*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12920-021-00900-7>
- Gaonkar, A., Rath, S., S, R., Jain, M., Swathy Vaman, R., Das, A., Manal, S., Singh Lamba, D., Kaur, P., YADAV, S., Dave, S., Ashok Tawde, A., Misra, S., BM, S., Goyal, C., Bharti, S., & Chaitanya Amereni, K. (2025). Transforming medical diagnosis: a comprehensive review of AI and ML technologies. *Evidence Public Health*, 1(1). <https://doi.org/10.61505/evipubh.2025.1.1.10>
- Gaudêncio, S. P., & Pereira, F. (2020). A Computer-Aided Drug Design Approach to Predict Marine Drug-Like Leads for SARS-CoV-2 Main Protease Inhibition. *Marine Drugs*, 18(12), 633. <https://doi.org/10.3390/md18120633>
- Gaudêncio, S. P., & Pereira, F. (2022). Predicting Antifouling Activity and Acetylcholinesterase Inhibition of Marine-Derived Compounds Using a Computer-Aided Drug Design Approach. *Marine Drugs*, 20(2), 129. <https://doi.org/10.3390/md20020129>
- Gill, J. (2022). Implantable Cardiovascular Devices: Current and Emerging Technologies for Remote Heart Failure Monitoring. *Cardiology in Review*, 31(3), 128–138. <https://doi.org/10.1097/crd.0000000000000432>
- Godfrey A, Stuart S. 2021. *Digital Health Exploring Use and Integration of Wearables*. Chennai (IN): Elsevier

- Goel, H., Yu, W., & MacKerell, A. D. (2022). hERG Blockade Prediction by Combining Site Identification by Ligand Competitive Saturation and Physicochemical Properties. <https://doi.org/10.20944/preprints202205.0255.v1>
- Görükmez, Ö., Görükmez, O., & Topak, A. (2023). Clinical Exome Sequencing Findings in 1589 Patients. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 191(6), 1557–1564. <https://doi.org/10.1002/ajmg.a.63190>
- Grishin, S. M., & Odintsov, S. V. (2023). Main trends in development and law regulation of electronic health in the European Union. *CARDIOMETRY*, 25, 25–30. <https://doi.org/10.18137/cardiometry.2022.25.2530>
- Guglietta, E., Denekamp, S., Sinclair, S., Harris, L., Bishop, P. D., Naidoo, N., Holliday, T., Chacko, M., Downey, R., Swanapillai, J., Martin, A., & Webber, M. (2024). Heart Rhythm New Zealand Consensus Statement on the Practical Management of Cardiac Implanted Electronic Devices in the Peri-Operative Environment. *NZMJ*, 137(1590), 77–92. <https://doi.org/10.26635/6965.6363>
- Gumber, V., Salibi, G., & Tzenios, N. (2025). Modern Approaches to the Management of Patients With Diabetic Nephropathy. *Special Journal of the Medical Academy and Other Life Sciences*, 3(5). <https://doi.org/10.58676/sjmas.v3i5.124>
- Halim, S. A., Jabeen, S., Khan, A., & Al-Harrasi, A. (2021). Rational Design of Novel Inhibitors of A-Glucosidase: An Application of Quantitative Structure Activity Relationship and Structure-Based Virtual Screening. *Pharmaceuticals*, 14(5), 482. <https://doi.org/10.3390/ph14050482>
- Hamosh, A., Amberger, J., Bocchini, C., Scott, A. F., & Rasmussen, S. A. (2021). Online Mendelian Inheritance in Man (<sc>OMIM</Sc>®): Victor <sc>McKusick</Sc>'s Magnum Opus. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 185(11), 3259–3265. <https://doi.org/10.1002/ajmg.a.62407>

- Hamzeh-Mivehroud, M., Khoshnavan-Azar, Z., & Dastmalchi, S. (2020). QSAR and Molecular Docking Studies on Non-Imidazole-Based Histamine H₃ Receptor Antagonists. *Pharmaceutical Sciences*, 26(2), 165–174. <https://doi.org/10.34172/ps.2019.64>
- Hassan, E. M., & Omenogor, C. E. (2025). AI Powered Predictive Healthcare: *Deep learning* for Early Diagnosis, Personalized Treatment, and Disease Prevention. *International Journal of Science and Research Archive*, 14(3), 806–823. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.3.0731>
- Hidayat, A. D. (2022). Integrasi Data Pada Dashboard Sistem Kesehatan (DaSK) Untuk Mendukung Analisa & Visualisasi Sistem Rujukan. *Journal of Information Systems for Public Health*, 7(1), 25. <https://doi.org/10.22146/jisph.71333>
- Hidayat, N. A., Sebayang, A. N. O., Shofia, A., & Aldharma, S. A. (2022). Development of Telemedicine Application Based on Artificial Intelligence in the Handling of Diabet Foot. *Jurnal Layanan Masyarakat (Journal of Public Services)*, 6(1), 205–211. <https://doi.org/10.20473/jlm.v6i1.2022.205-211>
- Indriyajati, F., Jawa, M. M. S. D., & Utomo, H. (2023). Analisis Keamanan Data Electronic Medical Record Digital Transformation Office (DTO) Kementerian Kesehatan Indonesia. *Sanskara Manajemen Dan Bisnis*, 2(01), 59–66. <https://doi.org/10.58812/smb.v2i01.130>
- Jeevarathinam, S., Balasubramanian, P., & Babu, A. B. K. A. (2025). Deep Neuro-Fuzzy Systems for Diabetes Prediction Using Siddha Healthcare Practices With Algorithm Comparison. *Indian Journal of Science and Technology*, 18(33), 2656–2668. <https://doi.org/10.17485/ijst/v18i33.259>
- Kanan, T., Kanan, D., Shardoub, E. J. A., & Durdağı, S. (2021). Transcription Factor NF-κB as Target for SARS-CoV-2 Drug Discovery Efforts Using Inflammation-Based QSAR Screening Model. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 108, 107968. <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2021.107968>

- Karalük, S. (2026). Evaluation of Electrode Impedance, Sensing, and Pacing Threshold Changes at 12 Hours After Pacemaker Implantation. *Kocaeli Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 12(1), 21–26. <https://doi.org/10.30934/kusbed.1690782>
- Khelfa, N., Belaidi, S., Zerroug, E., Soualmia, F., & Chtita, S. (2023). *In Silico*-Based Identification of New Anti-PFDHFR Drug Candidates via 1,3,5-Triazine Derivatives. *Main Group Chemistry*, 22(4), 521–539. <https://doi.org/10.3233/mgc-220111>
- Koçak, H., & Çetin, G. (2023). The Diagnosis of Diabetes Mellitus With Boosting Methods. *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.1242207>
- Kristanto, B. K., Listio, S. W. P., & Palandi, J. F. (2024). Perancangan Integrasi Sistem Informasi Rumah Sakit Kristen Mojowarno Modul Instalasi Gawat Darurat Dengan Satu Sehat Kementerian Kesehatan Indonesia Menggunakan Metode Scrum. *Jurnal Nasional Komputasi Dan Teknologi Informasi (Jnkti)*, 7(6). <https://doi.org/10.32672/jnkti.v7i6.8429>
- Kuang, R., Pirakalathanan, J., Lau, T., Koh, D., Kotschet, E., Ko, B., & Lau, K. K. (2021). An Up-to-date Review of Cardiac Pacemakers and Implantable Cardioverter Defibrillators. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, 65(7), 896–903. <https://doi.org/10.1111/1754-9485.13319>
- Kunde, P. D., Ramkumar, S., Kamble, S. P., RaviKumar, A., Kulkarni, B. D., & Kumar, V. R. (2021). On the Use of Electronegativity and Electron Affinity Based Pseudo-molecular Field Descriptors in Developing Correlations for Quantitative Structure-activity Relationship Modeling of Drug Activities. *Chemical Biology & Drug Design*, 98(2), 258–269. <https://doi.org/10.1111/cbdd.13895>
- Kurniawan, I., Ambarsari, L., Kurniatin, P. A., & Wahyudi, S. T. (2024). Novel Compounds Design of Acertannin, Hamamelitannin, and Petunidin-3-Glucoside Typical Compounds of African Leaves (*Vernonia amygdalina* Del) as Antibacterial Based on QSAR and Molecular Docking. *Jurnal Jamu Indonesia*, 8(2), 29–38. <https://doi.org/10.29244/jji.v8i2.326>

- Kurniawan, I., & Rohmatika, A. U. (2026). Molecular Docking, QSAR, and Bioactivity Prediction of Uncaria gambir Flavonoids as Antibacterial Agents Targeting MurA Enzyme. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 16(1), 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.33263/BRIAC161.032>
- Kurniawan, I., & Winarno, N. S. (2025). Unlocking Antibacterial Potential: Thiophene-2-carbaldehyde Modification of Acertannin from African Leaves as MurA Enzyme Inhibitors. *Jurnal Ners*, 9(4), 7602–7612. <https://doi.org/10.31004/jn.v9i4.49392>
- Lee PC, Wang JTH, Chen TY, Peng CH. 2022. Digital Heal Care in Taiwan Innovations of National Health Insurance. Taiwan: Springer Nature
- Lee, J., Han, S. Y., & Kwon, Y. W. (2025). Technological Advances and Medical Applications of Implantable Electronic Devices: From the Heart, Brain, and Skin to Gastrointestinal Organs. *Biosensors*, 15(8), 543. <https://doi.org/10.3390/bios15080543>
- Lee, K.-S., Chung, Y., & Kim, J. (2024). Research Trends on Metabolic Syndrome in Digital Health Care Using Topic Modeling: Systematic Search of Abstracts. *Journal of Medical Internet Research*, 26, e53873. <https://doi.org/10.2196/53873>
- Lee, Y., Park, S., Lee, J. S., Kim, S. Y., Cho, J., Yoo, Y., Lee, S., Yoo, T., Lee, M., Seo, J., Lee, J., Kneissl, J., Lee, J., Jeon, H., Jeon, E. Y., Hong, S. E., Kim, E., Kim, H., Kim, W. J., ... Chae, J. (2020). Genomic Profiling of 553 Uncharacterized Neurodevelopment Patients Reveals a High Proportion of Recessive Pathogenic Variant Carriers in an Outbred Population. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58101-8>
- Li, F., Li, X., Yang, Y., Xu, Y., & Zhang, Y. (2021). Collaborative Production Task Decomposition and Allocation Among Multiple Manufacturing Enterprises in a Big Data Environment. *Symmetry*, 13(12), 2268. <https://doi.org/10.3390/sym13122268>

- Liu, J., Wang, Q., & Chen, J. (2024). Case Report: A De Novo Variant of CRMP1 in an Individual With a Neurodevelopmental Disorder. *Frontiers in Neuroscience*, 18. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1490731>
- Lupski, J. R. (2021). Clan Genomics: From <scp>OMIM</Scp> Phenotypic Traits to Genes and Biology. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 185(11), 3294–3313. <https://doi.org/10.1002/ajmg.a.62434>
- Lusiana, D., & Nilogiri, A. (2023). Model Hot Fit (Human, Organization, Technology Fit) Untuk Evaluasi Penerapan Aplikasi SATUSEHAT. *Jsai (Journal Scientific and Applied Informatics)*, 6(3), 291–302. <https://doi.org/10.36085/jsai.v6i3.5795>
- Mahendra, F. R., Prakoso, I., Marzelino, A., Rizqy Fadhillah, M., Syukriyansyah, Hasibuan, M. M. A., Suparningtyas, J. F., Kristiadi, M., Setiawan, A. G., Rahman, F. I., Sari, A. N., Raysendria, N. R., Kurniawan, I., Arozal, W., & Kusmardi, K. (2025). Optimisation of peptides targeting reverse transcriptase HIV-1 using QSAR, machine learning, and computational approaches. *Frontiers in Pharmacology*, Volume 16. <https://www.frontiersin.org/journals/pharmacology/articles/10.3389/fphar.2025.1707377>
- Matsumoto, K., Miyao, T., & Funatsu, K. (2021). Ranking-Oriented Quantitative Structure–Activity Relationship Modeling Combined With Assay-Wise Data Integration. *Acs Omega*, 6(18), 11964–11973. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00463>
- Mehta, V. (2023). Artificial Intelligence in Medicine: Revolutionizing Healthcare for Improved Patient Outcomes. *Journal of Medical Research and Innovation*, 7(2), e000292. <https://doi.org/10.32892/jmri.292>
- Memon, Q. Z., Iqbal, H., Haider, S., Devi, R., & Maheen, M. (2025). Innovative Approaches in Pediatric Medicine: Emerging Trends and Future Perspectives. *Journal of Medical & Health Sciences Review*, 2(2). <https://doi.org/10.62019/yt7jq302>

- Moon, Y., Lee, Y., Hwang, Y., & Jeong, J. (2024). Long Short-Term Memory Autoencoder and Extreme Gradient Boosting-Based Factory Energy Management Framework for Power Consumption Forecasting. *Energies*, 17(15), 3666. <https://doi.org/10.3390/en17153666>
- Muhammad, M. (2025). Diabetes Virtual Assistant “Divistant”: Asisten Digital Berbasis Chatbot Untuk Hidup Lebih Baik Dengan Diabetes. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3S1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3s1.7712>
- Mwogosi, A. (2025). Leveraging AI to Enhance Healthcare Delivery in Tanzania: Innovations and Ethical Imperatives. *Sage Open*, 15(3). <https://doi.org/10.1177/21582440251378162>
- Naurah, G., Simarmata, M., & Jambak, R. S. (2024). Hak Dan Privasi Pasien Rumah Sakit Di Era Digitalisasi. *Comserva Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat*, 3(12), 4798–4805. <https://doi.org/10.59141/comserva.v3i12.1295>
- Nazir, A. (2025). Wearable Technology and Its Potential Role in Cardiovascular Health Monitoring and Disease Management. *Health Science Reports*, 8(11). <https://doi.org/10.1002/hsr2.71486>
- Nguyen, D. C., Pathirana, P. N., Ding, M., & Seneviratne, A. (2021). BEdgeHealth: A Decentralized Architecture for Edge-Based IoMT Networks Using Blockchain. *Ieee Internet of Things Journal*, 8(14), 11743–11757. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3058953>
- Niazi, S. K., & Mariam, Z. (2023). Recent Advances in Machine Learning-Based Chemoinformatics: A Comprehensive Review. <https://doi.org/10.20944/preprints202306.0803.v1>
- Nishikiori, K., Tanaka, K., & Uesawa, Y. (2022). Construction of a Prediction Model for Drug Removal Rate in Hemodialysis Based on Chemical Structures. *Molecular Diversity*, 26(5), 2647–2657. <https://doi.org/10.1007/s11030-021-10348-7>

- Nyavor, H. (2025). AI Powered Disease, Prevention: Predicting Health Risks Through Machine Learning for Proactive Care Approaches. *International Journal of Science and Research Archive*, 15(1), 479–495. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.15.1.1018>
- Olen, M., Dechert, B. E., Foster, A., Kanter, R. J., Silka, M. J., & Shah, M. J. (2021). Variations in Cardiac Implantable Electronic Device Surveillance and Ancillary Testing in the Paediatric and Congenital Heart Disease Population: An International Multi-Centre Survey From the Paediatric and Congenital Electrophysiology Society. *Cardiology in the Young*, 32(1), 101–105. <https://doi.org/10.1017/s104795112100425x>
- Patil, K. S., & Rufus, E. (2022). Microwave Antennas Suggested for Biomedical Implantation. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101060>
- Pividori, M., Rajagopal, P. S., Barbeira, A., Liang, Y., Melia, O., Bastarache, L., Park, Y., Consortium, Gte., Wen, X., & Im, H. K. (2020). PhenomeXcan: Mapping the Genome to the Phenome Through the Transcriptome. *Science Advances*, 6(37). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2083>
- Pradita, R., & Fitriana, S. M. (2024). Implementasi Standar Interoperabilitas HL7-FHIR Pada Pertukaran Rekam Kesehatan Elektronik Di Puskesmas. *Jurnal Ilmiah Perekam Dan Informasi Kesehatan Imelda (Jipiki)*, 9(1), 20–30. <https://doi.org/10.52943/jipiki.v9i1.1334>
- Prakash, A. (2024). Pre-Processing Techniques for Preparing Clean and High-Quality Data for Diabetes Prediction. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(2), 458–465. <https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0224.0412>
- R, J., Aqid, B., Salsabula, A. P., & Nurfiyanti, K. (2025). Implementation of EMR System in Indonesian Health Facilities: Benefits and Constraints. *Journal of Indonesian Health Policy and Administration*, 10(1). <https://doi.org/10.7454/ihpa.v10i1.1140>

- Rezha, D. K., & Ismah, Z. (2024). Analisis Pengaruh Paparan Asap Rokok Terhadap Kejadian Osteoporosis Pada Wanita Usia 50-59. *Media Kesehatan Masyarakat Indonesia*, 23(2), 134–140. <https://doi.org/10.14710/mkmi.23.2.134-140>
- Rim, J. H., Choi, Y. J., & Gee, H. Y. (2020). Genomic Landscape and Mutational Spectrum of ADAMTS Family Genes in Mendelian Disorders Based on Gene Evidence Review for Variant Interpretation. *Biomolecules*, 10(3), 449. <https://doi.org/10.3390/biom10030449>
- Riska, P., Retno, K., & Rhuccy, N. (2024). Upaya Pengelolaan Penyakit Diabetes Mellitus Melalui Interoperabilitas Personal Health Record. *Infokes Jurnal Ilmiah Rekam Medis Dan Informatika Kesehatan*, 14(1), 50–57. <https://doi.org/10.47701/infokes.v14i1.3668>
- Rosas-Jiménez, J. G., García-Revilla, M. A., Madariaga-Mazón, A., & Martínez-Mayorga, K. (2020). A Validated and Interpretable Predictive Model of Cruzain Inhibitors. <https://doi.org/10.1101/2020.06.02.129411>
- Rubiyanti, N. S. (2023). Penerapan Rekam Medis Elektronik Di Rumah Sakit Di Indonesia: Kajian Yuridis. *Aladalah*, 1(1), 179–187. <https://doi.org/10.59246/aladalah.v1i1.163>
- Samajdar, S. S., Saboo, B., Joshi, S., Makkar, B., Narwaria, M., Kapoor, N., Deshpande, N., Mehta, R., Mukherjee, S., & Saboo, B. (2025). Unraveling the Dual Burden of Diabetes and Obesity: Precision Strategies for South Asian Populations. *International Journal of Diabetes and Technology*, 4(3), 55–66. https://doi.org/10.4103/ijdt.ijdt_15_25
- Sandhe, D. S. K., Krisnana, I., & Pradanie, R. (2025). Innovations for Successful Electronic Medical Records (EMR) Implementation in Hospitals. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 26(2). <https://doi.org/10.21070/ijins.v26i2.1360>

- Saporito, D., Celentano, E., Amellone, C., Zanotto, G., Baroni, M., Miracapillo, G., Biffi, M., Calvi, V., Spighi, L., Curnis, A., Pisanò, E., Rovaris, G., Senatore, G., Caravati, F., Notarangelo, F. M., Marini, M., Solimene, F., Piacenti, M., Tomasi, L., ... Giammaria, M. (2024). Magnetic Resonance-Conditional Cardiac Implantable Electronic Devices: An Italian Perspective on the Prevalence of Mixed-Brand Systems Over Time. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73403-x>
- Savai, S., Hasan, M. K., Kamano, J., Misoi, L., Wakholi, P., & Were, M. C. (2022). Data Cleaning Process for mHealth Log Data to Inform Health Worker Performance. <https://doi.org/10.3233/shti220664>
- Sciarra, L., Salustri, E., Petroni, R., Calò, L., Delise, P., Penco, M., & Romano, S. (2020). Sport Activity in Patients With Cardiac Implantable Electronic Devices: Evidence and Perspectives. *Journal of Cardiovascular Medicine*, 22(5), 335–343. <https://doi.org/10.2459/jcm.0000000000001093>
- Sharma D, Singh S, Mittal M. 2022. *Bioinformatics and RNAA practice Based Approach: Boca Raton (US): CRC Press Taylor and Francis Group*
- Shayanfar, S., & Shayanfar, A. (2022). Comparison of Various Methods for Validity Evaluation of QSAR Models. *BMC Chemistry*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13065-022-00856-4>
- Shuja, N. (2024). The Future of Personalized Medicine. *Dev. Med. Life Sci.*, 1(7), 1–3. <https://doi.org/10.69750/dmls.01.07.084>
- Sobreira, N., Repetto, G. M., Temtamy, S. A., & Pérez, A. B. A. (2021). Using Online Mendelian Inheritance in Man in Low- and Middle-income Countries. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 185(11), 3284–3286. <https://doi.org/10.1002/ajmg.a.62467>
- Songma, S., Sathuphan, T., & Pamutha, T. (2023). Optimizing Intrusion Detection Systems in Three Phases on the CSE-CIC-IDS-2018 Dataset. *Computers*, 12(12), 245. <https://doi.org/10.3390/computers12120245>

- Strik, M., Ploux, S., Zande, J. v. d., Velraeds, A., Fontagne, L., Haïssaguerre, M., & Bordachar, P. (2024). The Use of Electrocardiogram Smartwatches in Patients With Cardiac Implantable Electrical Devices. *Sensors*, 24(2), 527. <https://doi.org/10.3390/s24020527>
- Susanti, S., & Maulana, A. (2024). Evaluasi Kinerja Pada Aplikasi SatuSehat Menggunakan Metode Pieces. *Ijcit (Indonesian Journal on Computer and Information Technology)*, 9(1). <https://doi.org/10.31294/ijcit.v9i1.17637>
- Susanto, E., & Sugiharto. (2017). *Manajemen Informasi Kesehatan IV: Etika Profesi dan Hukum Kesehatan (Edisi Tahu)*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Takeda, K., Takeuchi, K., Sakuratani, Y., & Kimbara, K. (2024). Improvement of Biodegradability Prediction QSAR System Through Optimal Combination of Algorithms. *Iop Conference Series Materials Science and Engineering*, 1318(1), 12003. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1318/1/012003>
- Tobb, K., Corbisiero, R., Fish, F. A., Kazemian, P., & Muller, D. (2020). An Alarming Change: What Caused an Instance of Inappropriate Detection in a Wearable Cardioverter-Defibrillator? *Journal of Innovations in Cardiac Rhythm Management*, 11(2), 3986–3988. <https://doi.org/10.19102/icrm.2020.110201>
- Tonegawa-Kuji, R., Inoue, Y., Nakai, M., Kanaoka, K., Sumita, Y., Miyazaki, Y., Wakamiya, A., Shimamoto, K., Ueda, N., Nakajima, K., Wada, M., Kamakura, T., Yamagata, K., Ishibashi, K., Miyamoto, K., Nagase, S., Aiba, T., Miyamoto, Y., Iwanaga, Y., & Kusano, K. (2023). Differences in Patient Characteristics, Clinical Practice and Outcomes of Cardiac Implantable Electric Device Therapy Between Japan and the USA: A Cross-Sectional Study Using Data From Nationally Representative Administrative Databases. *BMJ Open*, 13(1), e068124. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-068124>

- Upendra, B., Panigrahi, B. K., Singh, K., & Sabareesh, G. R. (2023). Recent Advancements in Piezoelectric Energy Harvesting for Implantable Medical Devices. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 35(2), 129–155. <https://doi.org/10.1177/1045389x231200144>
- Uzan, G. S., Yaramış, A. H., Sönmezler, E., Kurul, S. H., Yaramis, A., Yiş, U., Günay, Ç., Lochmüller, H., Horváth, R., Oktay, Y., & Yaramış, A. (2025). Pontocerebellar Hypoplasia and Periventricular Leukomalacia Associated With p.Phe262Val Homozygous Variant in TTC1 Gene: A Report of 4 Cases. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 85(5). <https://doi.org/10.1002/jdn.70031>
- Valdespino-Saldaña, E. (2026). Artificial Intelligence-Driven Transformation of Pediatric Diabetes Care: A Systematic Review and Epistemic Meta-Analysis of Diagnostic, Therapeutic, and Self-Management Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 27(2), 802. <https://doi.org/10.3390/ijms27020802>
- Veletić, M., Apu, E. H., Simić, M., Bergsland, J., Balasingham, I., Contag, C. H., & Ashammakhi, N. (2022). Implants With Sensing Capabilities. *Chemical Reviews*, 122(21), 16329–16363. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00005>
- Wan, E. Y., Rogers, A. J., Lavelle, M. P., Marcus, M., Stone, S., Ottoboni, L., Srivatsa, U. N., Leal, M. A., Russo, A. M., Jackson, L. R., & Crossley, G. H. (2024). Periprocedural Management and Multidisciplinary Care Pathways for Patients With Cardiac Implantable Electronic Devices: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*, 150(8). <https://doi.org/10.1161/cir.0000000000001264>
- Wang, B., He, Y., Wen, X., & Xi, Z. (2022). Prediction and Molecular Field View of Drug Resistance in HIV-1 Protease Mutants. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07012-x>

- Wassan, S., Latif, R. M. A., Liudajun, Han, Y., Farhan, M., & Akbar, W. (2025). Advancements in Optical Glucose Sensing for Diabetes Diagnostics and Monitoring. *Microwave and Optical Technology Letters*, 67(4). <https://doi.org/10.1002/mop.70190>
- Xü, Z., Jin, C., Cabe, A., Escobedo, D., Hao, N., Trase, I., Closson, A. B., Dong, L., Nie, Y., Elliott, J., Feldman, M. D., Chen, Z., & Zhang, J. X. J. (2020). Flexible Energy Harvester on a Pacemaker Lead Using Multibeam Piezoelectric Composite Thin Films. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 12(30), 34170–34179. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c07969>
- Yadav, M., Narasimhan, B., & Kapoor, A. (2024). Development of 2-Dimensional and 3-Dimensional QSAR Models of Indazole Derivatives as TTK Inhibitors Having Anticancer Potential. *Current Chemistry Letters*, 13(1), 225–240. <https://doi.org/10.5267/j.ccl.2023.6.006>
- Yavuz, S., Elnazir, B., Amin, S., Sherif, A., Saif, S., & Francis, N. (2024). A Unique Mutation in the Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator (CFTR) Gene Causing Cystic Fibrosis in a Pakistani Child: A Case Highlighting the Need for More Awareness. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.54627>
- Yu, T.-H., Su, B., Battalora, L. C., Liu, S., & Tseng, Y. J. (2021). Ensemble Modeling With Machine Learning and *Deep learning* to Provide Interpretable Generalized Rules for Classifying CNS Drugs With High Prediction Power. *Briefings in Bioinformatics*, 23(1). <https://doi.org/10.1093/bib/bbab377>
- Zhang, J., & Zhang, Z. (2023). Ethics and Governance of Trustworthy Medical Artificial Intelligence. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12911-023-02103-9>
- Zhang W. 2016. *Computer Aided Drug Discovery*. New York (US): Humana Press Springer Nature

Zhu, Q., Nguyễn, Đ.-T., Sid, E., & Pariser, A. (2020). Leveraging the UMLS as a Data Standard for Rare Disease Data Normalization and Harmonization. *Methods of Information in Medicine*, 59(04/05), 131–139. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1718940>

Biodata Penulis



Ilham Kurniawan, S.Si., M.Si., CHCM adalah seorang peneliti dan akademisi di bidang **Computational Biochemistry, Fitokimia,** dan **Drug Design** dengan pengalaman luas dalam riset *in silico*, pengujian laboratorium, serta biologi molekuler. Ia memperoleh gelar **Magister Sains Biokimia** dari **IPB University** melalui **Program Sinergi S1–S2 FastTrack**, sebuah program percepatan yang memadukan studi sarjana dan magister, yang berhasil ia selesaikan dalam waktu **< 5 tahun**. Saat ini, Ilham aktif sebagai

Dosen Biokimia pada Program **Sarjana Kedokteran (S1 Kedokteran)**, Fakultas Kedokteran, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur. Di institusi ini, ia berkontribusi dalam pengajaran, penyusunan kurikulum, serta pendampingan mahasiswa dalam berbagai kegiatan penelitian ilmiah. Ilham juga sering terlibat dalam berbagai **riset kolaborasi nasional maupun internasional**. Aktivitas ilmiahnya berfokus pada penemuan dan pengembangan **senyawa baru sebagai antibakteri**, serta pengujian aktivitas biologis berbasis pendekatan komputasi dan eksperimental. Bidang penelitian utama Ilham mencakup **Molecular Dynamics, Quantitative Structure Activity Relationship (QSAR), Ligand-Based Drug Design, Green and Plant Biochemistry, Natural Deep Eutectic Solvents (NADES),** dan **Therapeutic Deep Eutectic Solvents (THEDES)**. Ia juga mendalami analisis senyawa alam, modifikasi molekul obat (*structure modification*), *quantum mechanics and machine learning for molecular analysis*, serta studi material untuk **orthopaedic medical devices** berdasarkan standar internasional seperti ISO dan ASTM. Selain itu, ia memiliki pengalaman profesional sebagai **Responsible Testing Quality Control** di industri perangkat medis ortopedi terbesar di Indonesia. Sebagai penulis, Ilham berkomitmen menghadirkan karya ilmiah yang informatif, mudah dipahami, dan relevan dalam mendukung perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya pada bidang biokimia pertanian, metabolisme tanaman, enzimologi, biosintesis metabolit sekunder, serta bioinformatika modern.