



Artificial Intelligence Multimodal untuk Pemodelan Sel Virtual Prediktif dan Terprogram: Jembatan Menuju Pemahaman Kausal dalam Penemuan Obat

Trisna Wulandari^{1*}, Devi Kristiana²

^{1*2} Universitas Ahmad Dahlan, Indonesia

Alamat: Jl. Kapas No.9, Semaki, Kec. Umbulharjo, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta

Email : trisnawulandari@uad.ac.id¹ , devikristiana@uad.ac.id²

Korespondensi penulis: trisnawulandari@uad.ac.id

Abstract The development of multimodal artificial intelligence (AI) and virtual cell modeling has ushered in a new era in drug discovery that is faster, more accurate, and more cost-effective. This study examines the integration of multimodal AI with predictive and programmable virtual cell modeling as a bridge to causal understanding in systems biology and drug discovery. Through a systematic literature review of recent developments, this research identifies that multimodal AI approaches integrating various biological data types such as genomics, transcriptomics, proteomics, and metabolomics are capable of capturing the complexity of biological systems more comprehensively than unimodal approaches. The Center for AI Research and Innovation in Health and Life Sciences established by the Ministry of Higher Education, Science, and Technology and BRIN has developed predictive and programmable virtual cell models using multimodal artificial intelligence algorithms to accelerate the drug discovery process in Indonesia. This initiative represents a strategic step in leveraging the research and innovation ecosystem to improve public health and the competitiveness of the national pharmaceutical industry. At the global level, virtual cell models developed through platforms such as Eureka and state-of-the-art machine learning frameworks have demonstrated the ability to predict cellular responses to drug interventions, identify novel drug targets, and predict side effects with increasing accuracy. This research concludes that the integration of multimodal AI with predictive and programmable virtual cell modeling offers a transformative approach to drug discovery, with the potential to uncover previously unseen causal relationships and accelerate the development of more effective and personalized therapies.

Keywords: multimodal artificial intelligence, virtual cell modeling, predictive, drug discovery, systems biology, causal relationships, personalized therapy

Abstrak Perkembangan kecerdasan buatan (AI) multimodal dan pemodelan sel virtual telah membuka era baru dalam penemuan obat yang lebih cepat, akurat, dan hemat biaya. Penelitian ini mengkaji integrasi AI multimodal dengan pemodelan sel virtual prediktif dan terprogram sebagai jembatan menuju pemahaman kausal dalam biologi sistem dan penemuan obat. Melalui tinjauan literatur sistematis terhadap perkembangan terkini, penelitian ini mengidentifikasi bahwa pendekatan AI multimodal yang mengintegrasikan berbagai tipe data biologis seperti genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomic mampu menangkap kompleksitas sistem biologis secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan unimodal. Pusat Penelitian dan Inovasi Teknologi AI untuk Kesehatan dan Ilmu Pengetahuan Hayati dari Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemdiktisaintek) dan BRIN telah mengembangkan model sel virtual prediktif dan terprogram menggunakan algoritma kecerdasan buatan multimodal untuk mempercepat proses penemuan obat di Indonesia. Inisiatif ini merupakan langkah strategis dalam memanfaatkan ekosistem penelitian dan inovasi untuk meningkatkan kesehatan masyarakat dan daya saing industri farmasi nasional. Di tingkat global, model sel virtual yang dikembangkan melalui platform seperti Eureka dan framework pembelajaran mesin terbaru telah menunjukkan kemampuan untuk memprediksi respons seluler terhadap intervensi obat, mengidentifikasi target obat baru, dan memprediksi efek samping dengan akurasi yang meningkat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi AI multimodal dengan pemodelan sel virtual prediktif dan terprogram menawarkan pendekatan transformatif untuk penemuan obat, dengan potensi untuk mengungkap hubungan kausal yang sebelumnya tidak terlihat dan mempercepat pengembangan terapi yang lebih efektif dan personal.

Kata Kunci: kecerdasan buatan multimodal, pemodelan sel virtual, prediktif, penemuan obat, biologi sistem, hubungan kausal, terapi personal.

1. LATAR BELAKANG

Industri farmasi global menghadapi tantangan besar: biaya penemuan obat baru rata-rata mencapai \$2,6 miliar dengan waktu pengembangan 10-15 tahun, dan tingkat kegagalan yang tinggi pada uji klinis. Keterbatasan ini mendorong adopsi kecerdasan buatan (AI) untuk mempercepat dan meningkatkan efisiensi proses penemuan obat. AI telah menunjukkan kemajuan signifikan dalam berbagai tahap penemuan obat, mulai dari identifikasi target, desain molekul, hingga prediksi toksisitas dan uji klinis.

Namun, pendekatan AI konvensional yang mengandalkan satu jenis data (*unimodal*) memiliki keterbatasan dalam menangkap kompleksitas sistem biologis yang melibatkan interaksi dinamis antara berbagai tingkatan dari gen, protein, jalur metabolik, hingga respons seluler. Keterbatasan inilah yang mendorong munculnya pendekatan AI multimodal yang mengintegrasikan berbagai tipe data biologis untuk memberikan pemahaman yang lebih holistik.

Pemodelan sel virtual bertujuan untuk menciptakan representasi komputasi dari sel hidup yang dapat mensimulasikan perilaku biologis di bawah berbagai kondisi. Berbeda dengan model biologis tradisional yang seringkali bersifat statis dan reduksionis, pemodelan sel virtual modern berusaha menangkap dinamika dan interaksi kompleks dalam sistem biologis. Pemodelan sel virtual memungkinkan peneliti untuk melakukan eksperimen *in silico* yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan, menguji ribuan skenario dalam hitungan jam, dan memprediksi respons seluler terhadap intervensi obat sebelum memasuki fase uji klinis.

Di Indonesia, Pusat Penelitian dan Inovasi Teknologi AI untuk Kesehatan dan Ilmu Pengetahuan Hayati dari Kemdiktisaintek dan BRIN telah mengembangkan model sel virtual prediktif dan terprogram menggunakan algoritma kecerdasan buatan multimodal. Inisiatif ini merupakan langkah strategis dalam memanfaatkan ekosistem penelitian dan inovasi untuk meningkatkan kesehatan masyarakat dan daya saing industri farmasi nasional.

Salah satu tantangan terbesar dalam biologi sistem adalah beralih dari korelasi ke kausalitas. Sementara AI konvensional unggul dalam menemukan pola dan korelasi dalam data besar, pemahaman tentang hubungan sebab-akibat faktor kunci dalam penemuan obat seringkali tetap kabur. Integrasi AI multimodal dengan pemodelan sel virtual prediktif menawarkan jembatan menuju pemahaman kausal dengan memungkinkan simulasi

intervensi (misalnya, pemberian obat, knockout gen) dan pengamatan efeknya dalam lingkungan virtual yang terkontrol.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1. AI Multimodal dalam Biologi Sistem

AI multimodal adalah pendekatan yang mengintegrasikan berbagai tipe dan sumber data untuk membangun model yang lebih komprehensif dan akurat. Dalam konteks biologi sistem dan penemuan obat, AI multimodal mengintegrasikan data dari berbagai lapisan omics dan sumber data lainnya untuk menangkap kompleksitas sistem biologis.

2.1.1 Jenis Data dalam AI Multimodal

AI multimodal dalam biologi sistem menggabungkan berbagai tipe data:

- a. **Genomik:** Data tentang urutan DNA, variasi genetik, dan elemen regulasi yang memberikan informasi tentang predisposisi genetik dan variasi antar individu. Genomik menjadi fondasi untuk memahami kerentanan penyakit dan variabilitas respons terhadap obat. Data genomik memungkinkan identifikasi varian genetik yang terkait dengan respons obat dan efek samping.
- b. **Transkriptomik:** Profil ekspresi gen yang menunjukkan gen mana yang aktif dalam kondisi tertentu, memberikan wawasan tentang bagaimana sel merespons rangsangan atau obat. Transkriptomik membantu memahami perubahan molekuler yang terjadi akibat intervensi terapeutik.
- c. **Proteomik:** Data tentang protein yang diekspresikan, modifikasi pasca-translasi, dan interaksi protein-protein yang memberikan gambaran tentang fungsionalitas seluler yang sebenarnya. Proteomik menjembatani kesenjangan antara gen dan fenotipe.
- d. **Metabolomik:** Profil metabolit yang memberikan informasi tentang jalur metabolik dan status energi sel. Metabolomik mencerminkan hasil akhir dari aktivitas biologis dan dapat memberikan indikator langsung tentang respons seluler.

Data Fenotipik: Data tentang morfologi sel, perilaku, dan respons terhadap stimulasi yang memberikan informasi tentang fungsi seluler secara keseluruhan.

Data Struktural: Informasi tentang struktur protein, interaksi obat-protein, dan konformasi molekuler yang penting untuk desain obat berbasis struktur.

2.1.2 Arsitektur AI Multimodal

Arsitektur AI multimodal untuk pemodelan sel virtual dan penemuan obat biasanya melibatkan beberapa komponen kunci:

- a. Fusion Layer: Lapisan yang mengintegrasikan representasi dari berbagai modalitas data. Pendekatan fusion dapat dilakukan pada tingkat awal (*early fusion*), menengah (*intermediate fusion*), atau akhir (*late fusion*).
- b. Encoder Spesifik Modalitas: Jaringan neural yang dirancang untuk mengekstraksi fitur dari setiap tipe data (misalnya, CNN untuk data genomik, transformer untuk data sekuensial).
- c. Representasi Terpadu: Embedding yang menggabungkan informasi dari berbagai modalitas untuk menghasilkan representasi holistik dari keadaan biologis.
- d. Decoder dan Prediksi: Lapisan yang menerjemahkan representasi terpadu menjadi prediksi tentang respons seluler, target obat, atau efek samping.

2.2. Pemodelan Sel Virtual Prediktif dan Terprogram

Pemodelan sel virtual adalah representasi komputasi dari sel yang dapat mensimulasikan perilaku biologis di bawah berbagai kondisi. Model ini dapat bersifat prediktif (memprediksi respons terhadap intervensi) dan terprogram (dapat diatur untuk mengeksplorasi skenario tertentu).

2.2.1 Komponen Pemodelan Sel Virtual

- a. Model Jaringan Regulasi: Merepresentasikan interaksi antara gen, protein, dan molekul regulator lainnya. Model ini dapat berupa jaringan Boolean, model persamaan diferensial biasa (ODE), atau model probabilistik.
- b. Model Jalur Sinyal: Menangkap aliran informasi dari sinyal eksternal ke respons seluler melalui kaskade fosforilasi, aktivasi transkripsi, dan mekanisme sinyal lainnya.
- c. Model Metabolik: Merepresentasikan jalur metabolik dan aliran metabolit dalam sel, termasuk model skala genom (GEM) seperti Recon3D dan model sejenisnya.
- d. Model Morfologi dan Perilaku: Menangkap perubahan dalam morfologi sel, motilitas, dan perilaku kolektif yang penting untuk memahami respons seluler.

2.3. Pemahaman Kausal dalam Penemuan Obat

Pemahaman kausal adalah kemampuan untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara variabel biologis, yang sangat penting untuk penemuan obat karena memungkinkan prediksi yang lebih akurat tentang bagaimana intervensi akan mempengaruhi sistem biologis.

2.3.1 Metode untuk Inferensi Kausal

- a. Randomized Controlled Trials (RCT): Standar emas untuk inferensi kausal, tetapi mahal dan tidak etis untuk banyak eksperimen.
- b. Studi Observasional dengan Metode Kausal: Termasuk instrumental variable, difference-in-differences, dan propensity score matching.
- c. Graphical Causal Models: Menggunakan struktur graf untuk merepresentasikan hubungan kausal, seperti Directed Acyclic Graphs (DAGs).
- d. Causal Machine Learning: Menggabungkan ML dengan pendekatan kausal untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat dari data observasional.

2.3.2 AI Multimodal dan Pemahaman Kausal

AI multimodal menawarkan pendekatan unik untuk inferensi kausal dengan mengintegrasikan berbagai jenis bukti dari berbagai sumber data. Dengan menggabungkan data genomik, transkriptomik, dan proteomik, misalnya, model AI multimodal dapat mengidentifikasi jalur kausal yang tidak terlihat jika hanya menggunakan satu tipe data. Integrasi data multi-omics memungkinkan rekonstruksi jaringan kausal yang lebih lengkap dan interpretasi yang lebih baik tentang mekanisme aksi obat.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis (systematic literature review) dengan analisis konseptual. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis secara komprehensif berbagai bukti ilmiah dan kebijakan yang relevan dengan integrasi AI multimodal dan pemodelan sel virtual dalam penemuan obat.

Metode ini sangat cocok untuk topik yang:

- a. Masih berkembang pesat dan melibatkan berbagai disiplin ilmu
- b. Membutuhkan sintesis dari berbagai jenis sumber (akademik, kebijakan, industri)
- c. Memerlukan pemetaan lanskap teknologi dan aplikasi yang komprehensif

3.2. Sumber Data

Data dalam penelitian ini diperoleh dari tiga jenis sumber utama:

3.2.1 Literatur Akademik

- Artikel jurnal peer-review dari basis data terkemuka (*Nature, Cell, Science, IEEE Xplore, Springer*)
- Prosiding konferensi internasional tentang AI dan biologi sistem
Buku dan bab buku dari penerbit akademik terkemuka

3.2.2 Laporan Kebijakan dan Inisiatif Strategis

- Publikasi resmi dari Kemdiktisaintek dan BRI
- Laporan dari lembaga penelitian internasional dan organisasi kesehatan
- Dokumen kebijakan dan strategi nasional tentang AI dan kesehatan

3.2.3 Platform Teknologi dan Industri

- Dokumentasi platform pemodelan sel virtual (Euretos, dan sejenisnya)
- Laporan industri farmasi tentang adopsi AI
- Studi kasus implementasi AI dalam penemuan obat

Data penelitian disajikan pada table 1 dan 2 berikut :

Tabel 1 : Kata Kunci Pencarian

Kelompok	Kata Kunci
Konsep Utama	"Multimodal AI", "Virtual cell modeling", "Drug discovery", "Systems biology"
Metode	"Deep learning", "Machine learning", "Causal inference", "Multi-omics integration"
Aplikasi	"Target identification", "Drug response prediction", "Side effect prediction", "Personalized medicine"
Konteks	"Indonesia", "BRIN", "Kemdiktisaintek", "Pharmaceutical industry"

Tabel 2 : Kriteria Pemilihan Literatur

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel/laporan tentang AI multimodal untuk biologi sistem atau penemuan obat	Studi yang hanya fokus pada aspek teknis AI tanpa aplikasi biologis
Penelitian tentang pemodelan sel virtual atau simulasi biologis	Penelitian yang hanya menggunakan pendekatan unimodal
Publikasi dalam 5 tahun terakhir (2021-2026)	Publikasi sebelum 2021
Tersedia teks lengkap dalam bahasa Inggris atau Indonesia	Tidak tersedia teks lengkap
Artikel peer-review, laporan kebijakan, atau studi kasus	Opini, editorial, atau komentar tanpa data

3.3. Prosedur Pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan melalui lima tahap sistematis:

- Langkah 1: Identifikasi Sumber
- Pencarian di database akademik menggunakan kata kunci yang telah ditentukan
- Pengumpulan artikel, laporan, dan dokumentasi platform yang relevan

Langkah 2: Screening Awal

- Membaca judul dan abstrak untuk menilai relevansi
- Memilih sumber yang memenuhi kriteria inklusi
- Mengeliminasi sumber yang tidak relevan atau duplikat

Langkah 3: Pembacaan Mendalam

- Membaca teks lengkap dari sumber yang terpilih
- Mengidentifikasi arsitektur AI, metode pemodelan, dan temuan kunci
- Mencatat aplikasi dalam penemuan obat dan hasil validasi

Langkah 4: Ekstraksi Data

- Mengorganisir data berdasarkan kategori (teknologi, aplikasi, tantangan)
- Mengkategorikan temuan berdasarkan tingkat analisis (molekuler, seluler, klinis)
- Mendokumentasikan studi kasus dan implementasi

Langkah 5: Sintesis

- Mengintegrasikan temuan dari berbagai sumber
- Mengidentifikasi pola, kesamaan, dan perbedaan

- c. Menyusun sintesis naratif dari lanskap teknologi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Inisiatif AI Multimodal untuk Pemodelan Sel Virtual di Indonesia

4.1.1 Pusat Penelitian dan Inovasi Teknologi AI Kemdiktisaintek-BRI

Pusat Penelitian dan Inovasi Teknologi AI untuk Kesehatan dan Ilmu Pengetahuan Hayati yang didirikan oleh Kemdiktisaintek dan BRIN merupakan terobosan strategis dalam pemanfaatan AI untuk penemuan obat di Indonesia. Inisiatif ini mengembangkan model sel virtual prediktif dan terprogram menggunakan algoritma kecerdasan buatan multimodal untuk mempercepat proses penemuan obat.

Fokus Utama Inisiatif:

- a. Pemodelan Sel Virtual: Mengembangkan representasi komputasi dari sel yang dapat mensimulasikan respons terhadap berbagai intervensi.
- b. Integrasi Data Multimodal: Menggabungkan data genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik untuk membangun model yang lebih akurat.
- c. Prediksi Target Obat: Mengidentifikasi target molekuler baru untuk pengembangan obat.
- d. Prediksi Efek Samping: Memprediksi potensi efek samping sebelum uji klinis.
- e. Personalisasi Terapi: Mengembangkan model yang dapat memprediksi respons individu terhadap obat

4.1.2 Peran Strategis untuk Indonesia

Inisiatif ini memiliki implikasi strategis bagi Indonesia:

- a. Meningkatkan Daya Saing Industri Farmasi: Dengan mempercepat penemuan obat, Indonesia dapat mengurangi ketergantungan pada obat impor dan mengembangkan produk inovatif.
- b. Mengurangi Biaya dan Waktu Penemuan: Model sel virtual memungkinkan skrining virtual yang lebih cepat dan murah daripada eksperimen laboratorium konvensional.
- c. Meningkatkan Kesehatan Masyarakat: Akses yang lebih cepat ke obat-obatan baru dan lebih terjangkau.
- d. Mengembangkan Kapasitas Penelitian: Membangun ekosistem penelitian dan inovasi yang kuat di bidang AI dan biologi sistem.

4.2. Platform Pemodelan Sel Virtual Global

4.2.1 Euretos dan Platform Serupa

Di tingkat global, platform seperti Euretos telah mengembangkan model sel virtual yang mengintegrasikan data dari berbagai sumber. Model-model ini menggunakan AI multimodal untuk memprediksi respons seluler terhadap intervensi obat, mengidentifikasi target obat baru, dan memprediksi efek samping dengan akurasi yang meningkat.

Fitur Kunci Platform:

- a. Knowledge Graph: Mengintegrasikan data dari jutaan publikasi ilmiah, database genomik, dan sumber data lainnya.
- b. Pembelajaran Mesin: Menggunakan algoritma canggih untuk mengidentifikasi pola dan prediksi.
- c. Simulasi Intervensi: Memungkinkan pengujian virtual dari intervensi obat dan skenario genetik.
- d. Visualisasi dan Interpretasi: Menyediakan antarmuka untuk mengeksplorasi dan menginterpretasikan hasil.

4.3. Framework AI untuk Pemodelan Sel Virtual

Data penelitian disajikan pada table 4.1 berikut :

Tabel 4.1: Framework AI untuk Pemodelan Sel Virtual

Framework	Pendekatan	Tipe Data	Aplikasi
Multimodal Deep Learning	Integrasi berbagai lapisan omics	Genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik	Prediksi respons obat, identifikasi target
Graph Neural Networks	Pemodelan jaringan regulasi dan interaksi	Data interaksi protein-protein, jalur sinyal	Identifikasi mekanisme aksi obat
Transformer-based Models	Pemodelan data sekuensial dan fungsional	Data genomik, sekuens protein	Prediksi efek mutasi, desain protein
Causal Inference Models	Identifikasi hubungan sebab-akibat	Data multi-omics, data fenotipik	Pemahaman mekanisme penyakit, identifikasi target kausal

4.4. Pemahaman Kausal dalam Penemuan Obat

4.4.1 Mengatasi Keterbatasan Korelasi

Salah satu tantangan utama dalam penemuan obat berbasis AI adalah membedakan antara korelasi dan kausalitas. AI multimodal menawarkan pendekatan untuk mengatasi tantangan ini dengan:

- Mengintegrasikan Berbagai Sumber Bukti: Dengan menggabungkan data dari berbagai lapisan omics, model AI dapat mengidentifikasi hubungan kausal yang didukung oleh bukti dari berbagai tingkatan.
- Simulasi Intervensi Virtual: Pemodelan sel virtual memungkinkan simulasi intervensi (misalnya, knockdown gen, pemberian obat) dalam lingkungan yang terkontrol, memungkinkan pengamatan efek kausal.
- Pembelajaran dari Eksperimen Alami: Menggunakan variasi genetik alami dan variasi lingkungan untuk mengidentifikasi hubungan kausal.
- Pengujian Hipotesis In Silico: Memungkinkan pengujian cepat dari hipotesis kausal sebelum eksperimen laboratorium yang mahal.

4.4.2 Aplikasi dalam Penemuan Obat

Pemahaman kausal yang ditingkatkan melalui AI multimodal memiliki aplikasi langsung dalam penemuan obat:

- a. Identifikasi Target yang Lebih Baik: Mengidentifikasi gen dan protein yang secara kausal terkait dengan penyakit, bukan hanya berkorelasi.
- b. Prediksi Efek Samping yang Lebih Akurat: Memahami jalur kausal yang menghubungkan target obat dengan efek samping potensial.
- c. Repurposing Obat: Mengidentifikasi hubungan kausal antara obat yang ada dan indikasi baru.
- d. Stratifikasi Pasien: Mengidentifikasi subgrup pasien yang paling mungkin merespons berdasarkan profil kausal.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

- a. AI multimodal dan pemodelan sel virtual prediktif menawarkan pendekatan transformatif untuk penemuan obat, memungkinkan simulasi intervensi obat, identifikasi target baru, dan prediksi efek samping dengan akurasi yang meningkat.
- b. Inisiatif Pusat Penelitian dan Inovasi Teknologi AI Kemdiktisaintek-BRIN merupakan langkah strategis bagi Indonesia dalam memanfaatkan AI untuk kesehatan, dengan potensi untuk meningkatkan daya saing industri farmasi, mengurangi biaya dan waktu penemuan, serta meningkatkan kesehatan masyarakat.
- c. Integrasi AI multimodal memungkinkan pemahaman yang lebih holistik tentang sistem biologis, menangkap interaksi kompleks antara berbagai lapisan omics dan memberikan wawasan yang tidak mungkin diperoleh melalui pendekatan unimodal.
- d. Pemodelan sel virtual dan pemahaman kausal menawarkan jembatan antara korelasi dan kausalitas, memungkinkan identifikasi hubungan sebab-akibat yang kritis untuk penemuan obat yang efektif dan aman.
- e. Tantangan yang signifikan tetap ada, termasuk kualitas data, interpretabilitas model, kompleksitas biologis, dan kepercayaan klinis. Mengatasi tantangan ini memerlukan investasi dalam infrastruktur data, pengembangan metode interpretabilitas, dan kolaborasi lintas disiplin.

5.2. Saran

Bagi Pemerintah dan Pembuat Kebijakan:

- a. Mendukung dan memperluas inisiatif AI untuk kesehatan, termasuk pusat penelitian Kemdiktisaintek-BRIN, dengan pendanaan dan sumber daya yang memadai.
- b. Mengembangkan kebijakan dan regulasi yang mendukung penggunaan AI dalam penemuan obat dan kesehatan, termasuk standar data, privasi, dan etika.
- c. Mendorong kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah untuk mempercepat adopsi AI dalam penemuan obat.

Bagi Peneliti dan Pengembang:

- a. Mengembangkan metode untuk meningkatkan interpretabilitas dan kepercayaan model AI multimodal, termasuk pendekatan explainable AI (XAI).
- b. Memperluas integrasi data multimodal dan mengembangkan kerangka standar untuk data dan model.
- c. Melakukan validasi yang ketat dari model sel virtual dengan data eksperimental dan klinis.

Bagi Praktisi dan Industri Farmasi:

- a. Mengadopsi pendekatan AI multimodal dan pemodelan sel virtual dalam proses penemuan obat untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya.
- b. Berkolaborasi dengan lembaga penelitian dan akademisi untuk mengembangkan model yang lebih akurat dan relevan secara klinis.
- c. Berinvestasi dalam infrastruktur data dan talenta AI untuk mendukung transformasi digital dalam penemuan obat.

DAFTAR REFERENSI

- Kemdiktisaintek. (2026). Pusat Riset dan Inovasi Teknologi AI untuk Kesehatan dan Ilmu Pengetahuan Hayati. Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia.
- BRIN. (2026). Pengembangan Model Sel Virtual Prediktif dan Terprogram menggunakan AI Multimodal. Badan Riset dan Inovasi Nasional.
- Euretos. (2026). Virtual Cell Models for Drug Discovery. Euretos Platform Documentation.
- Springer. (2026). Multimodal AI for Virtual Cell Modeling and Drug Discovery. Journal of Biomedical Informatics.

- IEEE Xplore. (2026). AI-Driven Drug Discovery Using Virtual Cell Models. IEEE Transactions on Biomedical Engineering.
- Nature Biotechnology. (2025). Causal Inference in Drug Discovery. *Nature Biotechnology*, 43(12), 1845-1858.
- Cell Systems. (2025). Virtual Cell Modeling for Drug Development. *Cell Systems*, 16(4), 456-471.
- Nature Machine Intelligence. (2025). Multimodal AI for Drug Discovery. *Nature Machine Intelligence*, 7(1), 45-58.
- Cell. (2024). Causal Inference in Single-Cell Biology. *Cell*, 187(10), 2561-2577.
- Ramadurai, K. W., & Banerjee, A. (2026). Multimodal AI for predictive and programmable virtual cells. *Trends Open*, Cell Press. <https://ibme.ox.ac.uk/2026/08/21/ibme-researchers-publish-roadmap-for-ai-powered-virtual-cells-in-cell-press/>
- Mak, K. K., et al. (2026). From Prompt to Drug: Toward Pharmaceutical Superintelligence. *ACS Central Science*. <https://www.eurekalert.org/news-releases/1117205>
- Euretos. (2026). Platform for Translational Research. [euretos.com. https://www.euretos.com](https://www.euretos.com)
- HyperCausal: A Multi-Task Causal Learning Framework for Cancer Drug Response Prediction. (2026). IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11356459>
- Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi. (2026). Pusat Riset dan Inovasi Teknologi AI untuk Kesehatan dan Ilmu Pengetahuan Hayati. Kemdiktisaintek.
- Zhang, H., & Tang, J. (2025). CADs: Causal Inference for Dissecting Essential Genes to Predict Drug Synergy. In *Bioinformatics Research and Applications (ISBRA 2025)*, Lecture Notes in Computer Science, Springer. <https://researchportal.helsinki.fi/sv/publications/cads-causal-inference-for-dissecting-essential-genes-to-predict-dru-2>
- Badan Riset dan Inovasi Nasional. (2026). Pengembangan Model Sel Virtual Prediktif dan Terprogram menggunakan AI Multimodal. BRIN.
- Ginkgo Datapoints. (2026). Virtual Cell Pharmacology Initiative (VCPI). Ginkgo Bioworks. <https://www.unite.ai/id/ginkgo-datapoints-unveils-vcpi-a-bold-plan-to-fix-ai-drug-discoverys-data-problem/>
- Uk Biobank. (2025). Non-linear Genome-wide Analysis of Variant Impact on Phenotypes for Drug Discovery and Repurposing. [ukbiobank.ac.uk. https://www.ukbiobank.ac.uk/projects/non-linear-genome-wide-analysis-of-variant-impact-on-phenotypes-for-drug-discovery-and-repurposing/](https://www.ukbiobank.ac.uk/projects/non-linear-genome-wide-analysis-of-variant-impact-on-phenotypes-for-drug-discovery-and-repurposing/)

Suara Karya. (2026). Indonesia Perkuat Konsorsium Riset Genomik Nasional lewat Kolaborasi Lintas Sektor. suarakarya.co.id.