

Penerapan Kecerdasan Buatan dalam Pengembangan Formulasi Farmasi: Tren, Tantangan, dan Prospek Masa Depan (Tinjauan Literatur)

Muhammad Faisal¹, Shinta Puspitasari², Eryona Azizun Rosyida³

^{1,2,3}Farmasi, Universitas Muhammadiyah Mataram, Indonesia

¹muhfaisal@ummat.ac.id, ²sinthapuspita@ummat.ac.id, ³eryonarosyida@ummat.ac.id

ABSTRACT

Keywords:

Artificial Intelligence,
Pharmaceutical Formulation,
Machine Learning,
Drug Delivery System

Abstract: The development of digital technology and the increasing complexity of drug development have encouraged the use of artificial intelligence as an innovative approach in modern pharmacy. This study aims to conduct a systematic analysis of scientific literature to identify key trends, evaluate implementation challenges, and formulate future prospects for the application of artificial intelligence (AI) in pharmaceutical formulation development in a comprehensive and evidence-based manner. The study uses a qualitative approach through the Systematic Literature Review method with literature sources obtained from the DOAJ, Scopus, and Google Scholar databases for publications published between 2017 and 2026. The selection process was carried out in stages based on topic relevance, methodological quality, and suitability to the research objectives. The results of the study show a paradigmatic shift from a conventional experimental (trial-and-error) approach to a data-driven formulation system that is predictive, precise, and digitally integrated. The application of AI has been proven to improve the efficiency of formulation design, accelerate the optimization of excipient composition, and support the development of drug delivery systems and quality-based pharmaceutical manufacturing through integration with the concepts of Quality by Design and digital formulation. However, the implementation of AI still faces challenges related to data standardization, model validation in real conditions, as well as regulatory requirements and the readiness of the technology ecosystem. Overall, AI has the potential to become the main foundation for the transformation of pharmaceutical formulation development that is more efficient, adaptive, and patient-oriented in the future.

Kata Kunci:

Kecerdasan Buatan;
Formulasi Farmasi,
Machine Learning,
Sistem Penghantaran Obat

Abstrak: Perkembangan teknologi digital dan meningkatnya kompleksitas pengembangan obat mendorong pemanfaatan kecerdasan buatan sebagai pendekatan inovatif dalam bidang farmasi modern. Penelitian ini bertujuan melakukan analisis sistematis terhadap literatur ilmiah untuk mengidentifikasi tren utama, mengevaluasi tantangan implementasi, serta merumuskan prospek masa depan penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam pengembangan formulasi farmasi secara komprehensif dan berbasis bukti ilmiah. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif melalui metode *Systematic Literature Review* dengan sumber literatur yang diperoleh dari basis data DOAJ, Scopus, dan Google Scholar pada rentang publikasi tahun 2017–2026. Proses seleksi dilakukan secara bertahap berdasarkan relevansi topik, kualitas metodologis, serta kesesuaian dengan tujuan penelitian. Hasil kajian menunjukkan adanya pergeseran paradigmatik dari pendekatan eksperimental konvensional (*trial-and-error*) menuju sistem formulasi berbasis data yang bersifat prediktif, presisi, dan terintegrasi secara digital. Penerapan AI terbukti meningkatkan efisiensi desain formulasi, mempercepat optimasi komposisi excipien, serta mendukung pengembangan sistem penghantaran obat dan manufaktur farmasi berbasis kualitas melalui integrasi dengan konsep *Quality by Design* dan *digital formulation*. Namun demikian, implementasi AI masih menghadapi tantangan terkait standarisasi data, validasi model pada kondisi nyata, serta tuntutan regulatori dan kesiapan ekosistem teknologi. Secara keseluruhan, AI berpotensi menjadi fondasi utama transformasi pengembangan formulasi farmasi yang lebih efisien, adaptif, dan berorientasi pada kebutuhan pasien di masa depan.

Article History:

Received : D-M-20XX

Accepted : D-M-20XX



This is an open access article under the **CC-BY-SA** license

A. LATAR BELAKANG

Pengembangan formulasi farmasi merupakan tahapan fundamental dalam proses penelitian dan pengembangan obat karena berperan langsung dalam menentukan stabilitas fisikokimia, bioavailabilitas, keamanan, serta efektivitas terapeutik suatu produk farmasi. Kompleksitas formulasi semakin meningkat seiring berkembangnya molekul obat modern yang memiliki kelarutan rendah dan karakteristik biopharmaceutics yang menantang, sehingga membutuhkan strategi formulasi yang lebih inovatif (Maheswari, 2024). Pendekatan formulasi konvensional yang masih mengandalkan metode trial-and-error sering kali membutuhkan waktu penelitian yang panjang serta biaya eksperimen yang besar (Purba et al., 2025). Kondisi tersebut menyebabkan tingginya risiko kegagalan pada tahap pengembangan produk dan memperlambat proses translasi inovasi farmasi ke tahap klinis. Hal ini terlihat pada berbagai penelitian formulasi topikal modern yang masih memerlukan tahapan optimasi berulang untuk memperoleh stabilitas fisik dan termodinamik yang optimal, sebagaimana dilaporkan pada pengembangan emulgel berbasis minyak cengkeh (Suryani et al., 2025).

Perkembangan teknologi digital, khususnya kecerdasan buatan atau Artificial Intelligence (AI), telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai bidang ilmu kesehatan, termasuk farmasi dan teknologi formulasi obat. AI memungkinkan analisis data berskala besar melalui algoritma machine learning yang mampu mengidentifikasi hubungan kompleks antarvariabel formulasi yang sulit dianalisis secara manual (Rokhman et al., 2025). Dalam konteks farmasi, teknologi ini digunakan untuk memprediksi kompatibilitas bahan aktif dengan eksipien serta memperkirakan stabilitas produk secara komputasional sebelum dilakukan pengujian laboratorium (Yadav et al., 2025). Integrasi AI juga mendukung pendekatan Quality by Design yang menekankan pemahaman proses berbasis data guna meningkatkan konsistensi mutu produk farmasi (Azali et al., 2025). Kebutuhan optimasi formulasi berbasis pendekatan ilmiah juga terlihat pada penelitian pengembangan nanoemulgel ekstrak bahan alam untuk penyembuhan luka yang memerlukan evaluasi parameter formulasi secara kompleks dan multidimensi (Faisal et al., 2024).

Dalam satu dekade terakhir, penggunaan kecerdasan buatan dalam penelitian farmasi menunjukkan peningkatan signifikan yang tercermin dari pertumbuhan publikasi ilmiah dan adopsi teknologi digital oleh industri farmasi global (Bashirynejad et al., 2024). AI telah diaplikasikan dalam berbagai aspek formulasi, termasuk optimasi nanopartikel dan desain sistem penghantaran obat bertarget untuk meningkatkan efisiensi terapi (Fitriani et al., 2025). Selain itu, model prediktif berbasis machine learning digunakan untuk memperkirakan profil disolusi dan performa biofarmasetika suatu sediaan obat sebelum tahap eksperimen dilakukan (Yadav et al., 2025). Implementasi pendekatan formulasi berbasis inovasi teknologi juga berkembang pada penelitian formulasi nanoemulgel herbal yang menunjukkan peningkatan efektivitas terapeutik melalui rekayasa sistem penghantaran obat (Fitriana et al., 2025). Meskipun memiliki potensi besar dalam mempercepat pengembangan obat, implementasi AI masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan dataset, kebutuhan validasi model, serta isu regulatori yang belum sepenuhnya terstandarisasi (Tiwari et al., 2023).

Berbagai penelitian terdahulu telah melaporkan potensi kecerdasan buatan dalam meningkatkan efisiensi pengembangan formulasi farmasi melalui pendekatan prediktif berbasis data. Algoritma machine learning mampu memprediksi sifat fisikokimia obat secara akurat sehingga mengurangi eksperimen berulang. Studi (Venkataraman, M., Rao, G. C., Madavareddi, J. K., & Maddi, 2025) menggunakan model ANN dan RF berbasis indeks topologi untuk memprediksi 12 sifat fisikokimia pada 15 obat antimalaria, termasuk densitas, titik didih, dan logP, dengan R^2 hingga 0,9999 (MSE 0,0432) serta RMSE 0,0008, menunjukkan akurasi tinggi dan efisiensi pengujian laboratorium. Penelitian lain menekankan peran AI dalam optimasi komposisi eksipien untuk menghasilkan profil pelepasan obat yang lebih terkendali (Elvano et al., 2024). Selain itu, pendekatan deep learning telah digunakan untuk mendukung desain sistem penghantaran obat yang kompleks dan adaptif (Prihantini et al., 2025). Beberapa artikel tinjauan juga menyimpulkan bahwa AI berkontribusi terhadap percepatan proses pengembangan obat secara keseluruhan (Marlina, 2025). Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aplikasi spesifik sehingga belum memberikan sintesis komprehensif mengenai tren, tantangan implementasi, dan arah masa depan AI dalam formulasi farmasi (Bhabad et al., 2023).

Meskipun literatur mengenai penerapan kecerdasan buatan dalam formulasi farmasi terus berkembang, kajian yang tersedia masih bersifat terfragmentasi dan belum menyediakan pemetaan sistematis yang mengintegrasikan perkembangan teknologi, tantangan implementasi, serta peluang inovasi di masa depan. Kurangnya sintesis berbasis pendekatan Systematic Literature Review menyebabkan keterbatasan dalam memahami pola penelitian global, kesiapan industri farmasi, serta implikasi ilmiah dan regulatori dari penggunaan AI dalam pengembangan formulasi obat. Selain itu, belum banyak penelitian yang secara khusus mengkaji hubungan antara tren penelitian, hambatan teknis, dan prospek transformasi teknologi formulasi berbasis data. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis sistematis terhadap literatur ilmiah guna mengidentifikasi tren utama, mengevaluasi tantangan implementasi, serta merumuskan prospek masa depan penerapan kecerdasan buatan dalam pengembangan formulasi farmasi secara komprehensif dan berbasis bukti ilmiah.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang dilaksanakan melalui tahapan pelaksanaan secara sistematis dan berurutan. Tahap awal adalah problem formulation, yaitu merumuskan fokus penelitian terkait perkembangan penerapan kecerdasan buatan dalam pengembangan formulasi farmasi, meliputi identifikasi tren penelitian, tantangan implementasi, serta prospek pengembangannya di masa depan. Tahap berikutnya adalah determination of inclusion and exclusion criteria untuk menetapkan batasan studi yang relevan, mencakup artikel penelitian asli maupun artikel tinjauan yang dipublikasikan pada periode 2015–2025, tersedia dalam teks lengkap, menggunakan bahasa Indonesia atau Inggris, serta secara langsung membahas aspek formulasi farmasi berbasis kecerdasan buatan. Setelah kriteria ditetapkan, dilakukan tahap literature search and data selection melalui penelusuran terstruktur pada basis data Google Scholar, DOAJ, dan Scopus menggunakan kombinasi kata kunci berbahasa Indonesia dan Inggris dengan operator Boolean (AND/OR). Artikel yang diperoleh kemudian dikelola menggunakan perangkat manajemen referensi digital untuk menghapus duplikasi dan diseleksi mengikuti alur PRISMA yang meliputi tahap identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi.

Tahap selanjutnya adalah extraction process and analysis, yaitu mengekstraksi informasi utama dari setiap artikel terpilih, seperti metode kecerdasan buatan yang digunakan, jenis formulasi, tujuan penelitian, serta hasil utama studi. Data yang terkumpul kemudian dianalisis secara kualitatif pada tahap data interpretation and synthesis melalui analisis tematik untuk mengidentifikasi pola tren penelitian, tantangan teknis dan regulatori, serta peluang pengembangan di masa depan. Tahap akhir adalah conclusions, yaitu merumuskan sintesis komprehensif berbasis bukti ilmiah yang menggambarkan perkembangan penelitian, hambatan implementasi, serta arah inovasi penerapan kecerdasan buatan dalam pengembangan formulasi farmasi.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan proses penelusuran literatur secara sistematis terhadap 70 artikel ilmiah yang diperoleh dari berbagai basis data akademik bereputasi, dilakukan tahap seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan sesuai dengan fokus serta tujuan penelitian. Proses penyaringan meliputi evaluasi kesesuaian topik, kualitas metodologis, relevansi konteks kajian, serta kelengkapan data empiris yang dilaporkan. Hasilnya, sebanyak 19 studi dinyatakan memenuhi seluruh kriteria dan memiliki keterkaitan substansial dengan tema penelitian, sehingga dipilih sebagai sumber utama analisis. Rincian karakteristik, pendekatan penelitian, serta kontribusi masing-masing studi yang terpilih selanjutnya disajikan sebagai dasar sintesis dan pembahasan lebih lanjut seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Penelitian yang Dibahas dalam Artikel

No	Bidang atau Fokus	Nama-nama Penulis	Insight / Variabel Riset yang Dibahas
1	Tren penerapan AI dalam formulasi farmasi	Noorain et al. (2023); Vora et al. (2023); Selvaraj et al. (2022)	Peningkatan publikasi AI farmasetika, transformasi dari trial-and-error ke data-driven formulation, pemanfaatan cloud computing dan big dataset, efisiensi waktu serta biaya pengembangan obat

2	Teknologi AI dan metode komputasi formulasi	Gholap et al. (2024); Gormley (2024); Serrano et al. (2024)	Penggunaan machine learning, deep learning, predictive modeling; analisis hubungan bahan aktif-eksipien; simulasi formulasi; desain drug delivery system berbasis AI
3	Optimasi formulasi dan performa sediaan	Gormley (2024); Gholap et al. (2024); Serrano et al. (2024)	Optimasi komposisi eksipien, prediksi stabilitas fisikokimia, peningkatan bioavailabilitas obat kelarutan rendah, pemodelan pelepasan obat
4	Keterbatasan dataset dan validasi model	Hernandez et al. (2017); Bin Rafiq et al. (2020); Krzywanski et al. (2024)	Kualitas dan standardisasi data formulasi, generalisasi model, kesenjangan antara simulasi dan real-world formulation, integrasi data eksperimen dan komputasi
5	Tantangan regulatori dan explainable AI	Pawar et al. (2026); Kirana et al. (2025); Suriyaamporn et al. (2026); Pradana et al. (2025)	Transparansi algoritma, kebutuhan explainable AI, validasi industri farmasi, kesiapan SDM, adaptasi regulasi terhadap teknologi AI
6	Integrasi AI dengan Quality by Design (QbD)	Duarte et al. (2025); Saini et al. (2025)	Identifikasi critical quality attributes (CQA), kontrol proses berbasis data, konsistensi mutu produk, manufaktur farmasi digital
7	Digital formulation dan manufaktur berbasis data	Zaborenko et al. (2019); Saini et al. (2025)	Simulasi formulasi virtual, pengurangan eksperimen fisik, monitoring real-time berbasis AI, efisiensi produksi
8	Formulasi presisi dan personalized medicine	Pranidhi et al. (2023); Tanvir et al. (2020)	Integrasi data biologis pasien, terapi individual, pemanfaatan big data kesehatan, pendekatan farmasi presisi
9	Otomatisasi laboratorium dan ekosistem riset masa depan	Kandhare et al. (2025); Tanvir et al. (2020)	Laboratorium cerdas berbasis AI, robotika formulasi, kolaborasi multidisipliner, akselerasi siklus inovasi farmasi

Tabel 1 menyajikan ringkasan karakteristik utama dari 19 studi terpilih yang telah memenuhi kriteria inklusi penelitian, meliputi aspek penulis dan tahun publikasi, tujuan penelitian, pendekatan atau metode yang digunakan, serta temuan utama yang relevan dengan fokus kajian. Penyajian ini bertujuan memberikan gambaran komprehensif mengenai kecenderungan penelitian, variasi desain metodologis, serta kontribusi empiris masing-masing studi, sehingga memudahkan proses perbandingan, identifikasi pola temuan, dan penyusunan sintesis analitis pada tahap pembahasan selanjutnya, secara detail akan dibahas pada pembahasan berikut.

1. Tren penerapan kecerdasan buatan dalam pengembangan formulasi farmasi

Perkembangan penerapan kecerdasan buatan dalam formulasi farmasi menunjukkan peningkatan signifikan dalam satu dekade terakhir, terutama melalui pemanfaatan machine learning, deep learning, dan berbagai pendekatan predictive modeling yang mampu mengolah data formulasi dalam jumlah besar secara cepat dan akurat. Teknologi ini memungkinkan proses pengembangan sediaan obat beralih dari pendekatan trial-and-error menuju pendekatan berbasis data (data-driven formulation), sehingga waktu penelitian dan biaya eksperimen dapat ditekan secara substansial. Studi tinjauan menunjukkan bahwa algoritma AI mampu memprediksi hubungan kompleks antara bahan aktif, eksipien, serta parameter proses yang sebelumnya sulit dianalisis secara konvensional. Selain itu, peningkatan jumlah publikasi ilmiah terkait AI dalam bidang farmasetika juga mencerminkan transformasi paradigma penelitian menuju formulasi presisi dan personalisasi terapi. Tren tersebut semakin menguat seiring berkembangnya komputasi berbasis cloud dan ketersediaan dataset farmasi berskala besar yang mendukung model pembelajaran mesin modern (Noorain et al., 2023). Integrasi AI juga dilaporkan mempercepat proses desain sistem penghantaran obat cerdas serta meningkatkan efisiensi pengembangan produk farmasi modern (Vora et al., 2023). Bahkan, pemanfaatan algoritma lanjutan dalam industri farmasi dinilai mampu mengatasi keterbatasan

metode eksperimen tradisional yang memerlukan waktu panjang dan sumber daya besar (Selvaraj et al., 2022).

Dari sisi aplikasi, kecerdasan buatan paling dominan digunakan pada optimasi komposisi eksipien, prediksi stabilitas sediaan, desain sistem penghantaran obat, serta peningkatan bioavailabilitas senyawa obat yang memiliki kelarutan rendah. Model AI mampu mengevaluasi berbagai kombinasi formulasi secara simultan sehingga menghasilkan rekomendasi formulasi optimal dengan tingkat keberhasilan lebih tinggi dibandingkan pendekatan empiris. Dalam konteks sistem penghantaran obat, machine learning membantu memahami interaksi kompleks antara material pembawa dan profil pelepasan obat, yang sebelumnya sulit dimodelkan secara matematis konvensional (Gormley, 2024). Selain itu, integrasi AI dengan teknologi nano dan sistem penghantaran pintar membuka peluang pengembangan terapi yang lebih terarah dan responsif terhadap kondisi biologis pasien (Serrano et al., 2024). Kajian komprehensif lainnya juga menegaskan bahwa AI berperan penting dalam simulasi formulasi, optimasi proses manufaktur, serta peningkatan performa farmasetik melalui analisis prediktif berbasis data multidimensional (Gholap et al., 2024). Dengan demikian, penerapan AI tidak hanya mempercepat inovasi formulasi, tetapi juga mengarahkan perkembangan farmasi menuju sistem pengembangan obat yang lebih efisien, presisi, dan berkelanjutan.

Temuan literatur menunjukkan bahwa kecerdasan buatan (AI) berperan sebagai katalis transformasi paradigma penelitian farmasi menuju pendekatan formulasi presisi berbasis data, terutama melalui kemampuannya mengenali pola nonlinier dan menganalisis interaksi multivariat yang sulit dijelaskan oleh metode statistik konvensional. Penerapan AI terbukti meningkatkan efisiensi eksperimen sekaligus memperdalam pemahaman mekanisme formulasi, khususnya pada bidang dengan kompleksitas tinggi seperti optimasi komposisi dan desain sistem penghantaran obat, termasuk pengembangan sistem nano yang mengintegrasikan ilmu farmasi, material, dan komputasi cerdas. Namun, perkembangan tersebut masih menghadapi keterbatasan penting, terutama terkait kualitas dan ketersediaan dataset yang heterogen, tantangan validasi model pada kondisi manufaktur nyata, serta dominasi penelitian pada skala simulasi atau laboratorium. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun AI memiliki potensi besar dalam mempercepat inovasi formulasi farmasi, tingkat kesiapan teknologi untuk implementasi industri dan regulatori secara luas masih memerlukan penguatan melalui standarisasi data, validasi eksperimental, dan pengembangan ekosistem teknologi yang lebih matang.

2. Tantangan utama dalam implementasi kecerdasan buatan pada formulasi farmasi

Kendala teknis dan ilmiah dalam penerapan kecerdasan buatan pada pengembangan formulasi farmasi terutama berkaitan dengan keterbatasan kualitas dan ketersediaan dataset yang representatif. Data formulasi farmasi umumnya bersifat heterogen, tidak terstandarisasi, serta berasal dari eksperimen berskala terbatas sehingga menyulitkan pelatihan model berbasis machine learning yang membutuhkan data besar dan konsisten. Hernandez et al. (2017) menegaskan bahwa kualitas data menjadi faktor paling menentukan dalam keberhasilan model prediktif farmasi. Selain itu, validasi model masih menjadi tantangan karena akurasi tinggi pada data pelatihan sering kali tidak sepenuhnya dapat direplikasi pada kondisi eksperimen nyata (real-world formulation) (Bin Rafiq et al., 2020). Kompleksitas integrasi antara data eksperimental dan simulasi komputasional juga menimbulkan kesenjangan metodologis, terutama dalam memastikan bahwa hasil prediksi tetap memiliki dasar mekanistik yang dapat dijelaskan secara ilmiah (Krzywanski et al., 2024).

Di sisi lain, tantangan regulatori dan praktis turut memengaruhi implementasi AI dalam industri farmasi, khususnya terkait standar validasi yang ketat serta kebutuhan dokumentasi ilmiah yang dapat diaudit. Pawar et al. (2026) menjelaskan bahwa otoritas regulasi menuntut sistem AI yang tidak hanya akurat, tetapi juga transparan dan dapat dipertanggungjawabkan secara klinis maupun industri. Permasalahan transparansi algoritma menjadi krusial karena banyak model deep learning masih bersifat black box, sehingga menimbulkan hambatan dalam proses persetujuan regulatori (Kirana et al., 2025). Selain itu, kesiapan sumber daya manusia dan infrastruktur teknologi menjadi faktor pembatas penting, karena implementasi AI memerlukan kolaborasi multidisipliner serta sistem data yang terstandarisasi (Pradana et al., 2025). Suriyaamporn et al. (2026) menekankan bahwa transformasi digital farmasi membutuhkan kerangka regulasi adaptif dan peningkatan kapasitas SDM agar inovasi berbasis AI dapat diterapkan secara aman dan berkelanjutan.

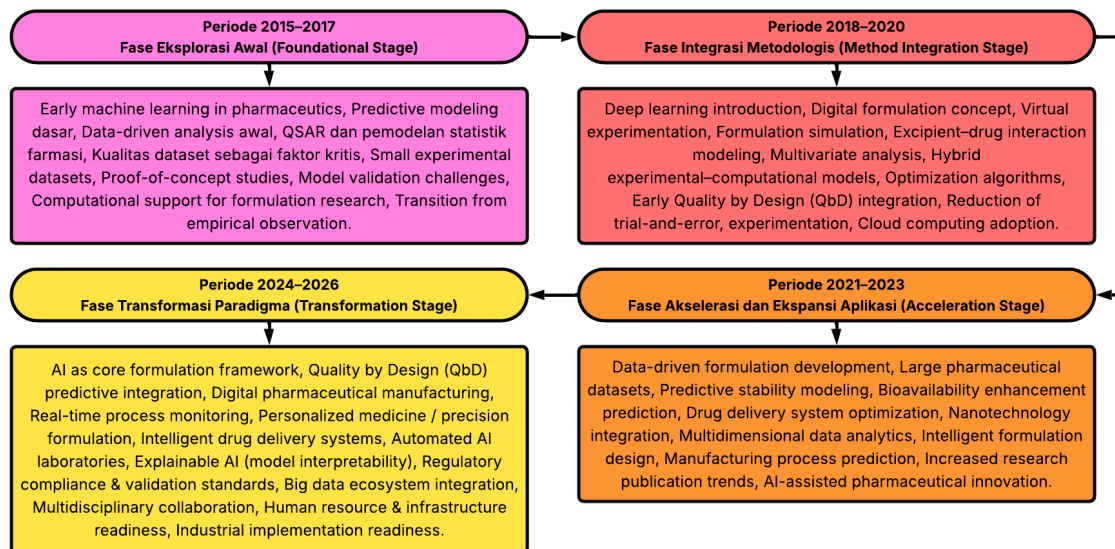
Temuan kajian menunjukkan bahwa tantangan implementasi kecerdasan buatan (AI) dalam formulasi farmasi tidak hanya bersifat teknologis, tetapi juga berkaitan erat dengan karakteristik ilmu farmasi yang menuntut validitas ilmiah, keamanan produk, dan akuntabilitas regulatori. Keberhasilan model AI sangat bergantung pada ketersediaan dataset yang berkualitas dan terstandarisasi, karena data yang tidak representatif berisiko menghasilkan prediksi bias serta sulit direplikasi pada kondisi nyata. Selain itu, kebutuhan terhadap *explainable AI* menegaskan bahwa akurasi statistik saja belum cukup tanpa kemampuan menjelaskan dasar keputusan algoritma secara ilmiah. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa hambatan yang ada bersifat struktural, meliputi keterbatasan standardisasi data eksperimen, validasi model yang masih dominan pada skala laboratorium, serta isu *black box* pada *deep learning* yang memperlambat penerimaan regulatori. Di samping itu, keterbatasan sumber daya manusia yang menguasai farmasi sekaligus kecerdasan buatan menegaskan bahwa transformasi digital dalam formulasi farmasi memerlukan penguatan ekosistem pengetahuan, kompetensi multidisipliner, dan perubahan sistem organisasi, bukan sekadar adopsi teknologi semata.

3. Prospek masa depan penggunaan kecerdasan buatan dalam pengembangan formulasi farmasi

Potensi integrasi kecerdasan buatan dengan konsep Quality by Design (QbD) membuka peluang besar dalam meningkatkan efisiensi dan ketepatan pengembangan formulasi farmasi berbasis data. Pendekatan QbD menekankan pemahaman menyeluruh terhadap hubungan antara variabel formulasi dan kualitas produk, sehingga penggunaan algoritma AI mampu mempercepat identifikasi parameter kritis secara prediktif. Duarte et al. (2025) menjelaskan bahwa integrasi analitik berbasis data dalam QbD dapat meningkatkan kontrol proses dan konsistensi mutu produk farmasi. Perkembangan konsep digital formulation juga memungkinkan simulasi formulasi secara virtual sebelum tahap eksperimen laboratorium dilakukan, sehingga mengurangi biaya dan waktu pengembangan (Zaborenko et al., 2019). Selain itu, pendekatan manufaktur farmasi berbasis data mendorong penggunaan sistem pemantauan real-time yang terintegrasi dengan AI untuk mengoptimalkan proses produksi dan meminimalkan variasi kualitas, suatu transformasi yang turut dibahas oleh Saini et al. (2025) dalam konteks industri farmasi digital.

Arah inovasi masa depan menunjukkan bahwa kecerdasan buatan berpotensi mendukung pengembangan formulasi presisi yang selaras dengan konsep *personalized medicine*, di mana desain sediaan obat dapat disesuaikan dengan karakteristik individu pasien. Pranidhi et al. (2023) menekankan bahwa analisis data biologis skala besar memungkinkan perancangan terapi yang lebih spesifik dan efektif dibandingkan pendekatan konvensional. Di sisi lain, otomatisasi proses formulasi melalui sistem robotik dan laboratorium cerdas berbasis AI mulai dikembangkan untuk meningkatkan reproduktibilitas eksperimen serta mempercepat siklus inovasi farmasi (Kandhare et al., 2025). Integrasi AI dengan big data dan sistem laboratorium digital juga mendorong kolaborasi multidisipliner antara ilmu farmasi, ilmu komputer, dan rekayasa proses, sehingga menciptakan ekosistem penelitian yang lebih adaptif dan berorientasi pada inovasi berkelanjutan (Tanvir et al., 2020).

Temuan literatur menunjukkan bahwa kecerdasan buatan (AI) telah berkembang dari sekadar alat analisis menjadi kerangka utama dalam paradigma pengembangan formulasi farmasi masa depan, ditandai oleh integrasi dengan konsep *Quality by Design* (QbD), digitalisasi formulasi, serta pergeseran menuju pendekatan prediktif berbasis data. Pemanfaatan simulasi komputasional memungkinkan pengurangan kegagalan formulasi sejak tahap awal, sementara konsep *personalized medicine* mendorong perubahan orientasi industri dari produksi massal menuju terapi individual berbasis data pasien. Otomatisasi laboratorium dan kolaborasi multidisipliner antara farmasetika, kecerdasan buatan, dan rekayasa sistem digital semakin memperkuat arah transformasi ini. Namun, implementasi penuh masih menghadapi tantangan berupa kebutuhan standardisasi data untuk mendukung model prediktif, keharusan validasi eksperimental terhadap simulasi digital, keterbatasan ketersediaan data biologis skala besar, serta tingginya kebutuhan investasi infrastruktur dan tenaga ahli. Oleh karena itu, prospek masa depan AI dalam formulasi farmasi sangat bergantung pada kesiapan ekosistem teknologi, regulasi, dan penguatan kapasitas sumber daya manusia secara berkelanjutan.



Gambar 1. Evolusi Variabel Kecerdasan Buatan dalam Penelitian Formulasi Farmasi

Gambar 1 menunjukkan adanya perkembangan bertahap peran kecerdasan buatan dalam bidang formulasi farmasi, yang bergerak dari tahap eksplorasi metodologis menuju transformasi paradigma penelitian dan industri. Pada periode awal (2015–2017), penelitian masih berfokus pada pengujian kelayakan machine learning sebagai alat analisis prediktif dengan keterbatasan dataset dan validasi model. Memasuki fase integrasi (2018–2020), AI mulai dikombinasikan dengan simulasi formulasi dan pendekatan komputasional untuk mengurangi metode trial-and-error. Selanjutnya, periode akselerasi (2021–2023) ditandai oleh pemanfaatan dataset besar, optimasi sistem penghantaran obat, serta peningkatan efisiensi desain formulasi berbasis data multidimensional. Pada fase terbaru (2024–2026), AI berkembang menjadi kerangka utama pengembangan farmasi modern melalui integrasi Quality by Design, digitalisasi manufaktur, personalized medicine, serta otomatisasi laboratorium, meskipun implementasinya masih bergantung pada kesiapan ekosistem data, regulasi, dan kompetensi multidisipliner. Secara keseluruhan, evolusi ini mencerminkan pergeseran dari penggunaan AI sebagai alat bantu analisis menuju sistem strategis yang membentuk masa depan inovasi formulasi farmasi berbasis data.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap temuan literatur, dapat disimpulkan bahwa penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam pengembangan formulasi farmasi telah mengalami pergeseran paradigmatik dari pendekatan eksperimental konvensional menuju sistem formulasi berbasis data yang lebih prediktif, presisi, dan terintegrasi secara digital. AI terbukti mampu meningkatkan efisiensi proses desain formulasi, mempercepat optimasi komposisi, serta mendukung pengembangan sistem penghantaran obat dan manufaktur farmasi berbasis kualitas melalui integrasi dengan konsep *Quality by Design* dan digital formulation. Namun demikian, tingkat implementasi masih berada pada fase transisi, di mana kemajuan teknologi belum sepenuhnya diimbangi oleh kesiapan ekosistem ilmiah dan industri. Tantangan utama meliputi keterbatasan standardisasi dataset formulasi, kesenjangan antara performa model prediktif dan validasi pada kondisi manufaktur nyata, kebutuhan transparansi algoritma untuk kepentingan regulatori, serta keterbatasan sumber daya manusia multidisipliner. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberhasilan adopsi AI tidak hanya ditentukan oleh kemajuan komputasi, tetapi juga oleh integrasi sistem data, regulasi adaptif, dan transformasi kapasitas penelitian farmasi.

Dari analisis tersebut, terlihat adanya kesenjangan penelitian yang masih signifikan, terutama pada kurangnya studi berbasis implementasi industri (*real-world application*), minimnya dataset formulasi terbuka dan terstandarisasi secara global, serta terbatasnya penelitian yang menggabungkan pendekatan mekanistik farmasetika dengan model AI yang dapat dijelaskan (*explainable AI*). Selain itu, kajian mengenai integrasi AI dalam kerangka regulatori farmasi dan evaluasi tingkat kesiapan teknologi (*technology readiness level*) masih relatif terbatas. Oleh karena itu, topik riset yang mendesak untuk dikembangkan di masa mendatang mencakup pengembangan platform dataset formulasi farmasi terstandarisasi, model AI yang interpretable dan tervalidasi secara

eksperimental, integrasi AI dengan sistem manufaktur farmasi real-time berbasis QbD, serta pengembangan laboratorium formulasi otonom yang menggabungkan AI, robotika, dan *big data*. Penelitian pada bidang-bidang tersebut diharapkan mampu menjembatani kesenjangan antara inovasi konseptual dan implementasi industri, sekaligus mempercepat transformasi menuju ekosistem formulasi farmasi cerdas yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

REFERENSI

- Azali, A. S., Yusron, M., & Darmawan, E. (2025). Narrative review: Tantangan dan strategi pemanfaatan big data dalam farmakovigilans di Indonesia. *PHARMACY: Jurnal Farmasi Indonesia (Pharmaceutical Journal of Indonesia)*, 22(1), 50–54. <https://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/PHARMACY/article/view/26614>
- Bashirynejad, M., Soleymani, F., Nikfar, S., Kebriaeezadeh, A., Majdzadeh, R., Fatemi, B., ... & Zare, N. (2024). Trends analysis and future study of the pharmaceutical industry field: a scoping review. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 33(1), 6. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40199-024-00550-x>
- Bhabad, S., Lamkhade, D., Koyate, S., Karanjkhale, K., Kale, V., & Doke, R. (2023). Transformative trends: A comprehensive review on role of artificial intelligence in healthcare and pharmaceutical research. *IP Int J Comprehensive Adv Pharmacol*, 8(4), 210–219. <https://doi.org/10.18231/j.ijcaap.2023.034>
- Bin Rafiq, R., Modave, F., Guha, S., & Albert, M. V. (2020). Validation methods to promote real-world applicability of machine learning in medicine. In *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Digital Medicine and Image Processing*, (pp. 13–19). <https://doi.org/10.1145/3441369.3441372>
- Dolores R Serrano, Francis C Luciano, Brayan J Anaya, Baris Ongoren, Aytug Kara, Gracia Molina, Bianca I Ramirez, Sergio A Sánchez-Guiraes, Jesus A Simon, Greta Tomietto, Chrysi Rapti, Helga K Ruiz, Satyavati Rawat, Dinesh Kumar, A. L. (2024). Artificial Intelligence (AI) Applications in Drug Discovery and Drug Delivery: Revolutionizing Personalized Medicine. *Pharmaceutics*, 16(10), 1328. doi: 10.3390/pharmaceutics16101328.
- Duarte, J. G., Duarte, M. G., Piedade, A. P., & Mascarenhas-Melo, F. (2025). Rethinking pharmaceutical industry with quality by design: application in research, development, manufacturing, and quality assurance. *The AAPS Journal*, 27(4), 96. <https://link.springer.com/article/10.1208/s12248-025-01079-w>
- Elvano, D. R., & Jafar, G. (2024). Optimasi Sistem Penghantaran Obat Antidiabetes Oral Melalui Pompa Osmotik untuk Peningkatan Bioavailabilitas dan Efektivitas Terapi. *Jurnal Kesehatan Bakti Tunas Husada: Jurnal Ilmu-Ilmu Keperawatan, Analisis Kesehatan Dan Farmasi*, 24(2), 98–130. <https://doi.org/10.36465/jkbth.v24i2.1402>
- Faisal, M., Chabib, L., Dewi, M. S., Gani, M. R., & Dwistuti, R. (2024). Nanoemulgel Formulation of Eleutherine palmifolia Onion Bulb Extract and Its Effectiveness in Wound Healing. *Jurnal Farmasi Sains Dan Komunitas (Journal of Pharmaceutical Sciences and Community)*, 21(2), 200–210. <https://doi.org/10.24071/jpsc.007454>
- Fitriana, Y., Iradhatullah, S. P., Sugara, T. H., Hendriyani, I., Nurbaety, B., & Faisal, M. (2025). Antibacterial Activity Test of Ethanol Extract of Palm Leaves (*Catharantus roseus*) Against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* Bacteria. *THRIVE Health Science Journal*, 2(2), 113–119. 10.56566/thrive.v2i2.424
- Fitriani, H., & Hidayatullah, M. (2025). ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI) DALAM PENGEMBANGAN NANOPARTIKEL SEBAGAI SISTEM PENGHANTARAN OBAT. *Jurnal Farmasi IKIFA*, 4(2), 67–73. <https://orcid.org/0009-0002-1672-7442>
- Gholap, A. D., Uddin, M. J., Faiyazuddin, M., Omri, A., Gowri, S., & Khalid, M. (2024). Advances in artificial intelligence for drug delivery and development: a comprehensive review. *Computers in Biology and Medicine*, 178, 108702. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2024.108702>
- Gormley, A. J. (2024). Machine learning in drug delivery. *Journal of Controlled Release*, 373, 23–30. 10.1016/j.jconrel.2024.06.045
- Hernandez, I., & Zhang, Y. (2017). Using predictive analytics and big data to optimize pharmaceutical outcomes. *American Journal of Health-System Pharmacy*, 74(18), 1494–1500. <https://doi.org/10.2146/ajhp161011>
- Kandhare, P., Kurlekar, M., Deshpande, T., & Pawar, A. (2025). A review on revolutionizing healthcare technologies with AI and ML applications in pharmaceutical sciences. *Drugs and Drug Candidates*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/ddc4010009>
- Kirana, K. B., & Silalahi, W. (2025). Tantangan Regulasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam Perspektif Hukum Perlindungan Data Pribadi di Indonesia. *Cerdika: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 5(6), 1807. 10.59141/cerdika.v5i6.2711
- Krzywanski, J., Sosnowski, M., Grabowska, K., Zylka, A., Lasek, L., & Kijo-Kleczkowska, A. (2024). Advanced computational methods for modeling, prediction and optimization—a review. *Materials*, 17(14.), 3521. <https://doi.org/10.3390/ma17143521>
- Maheswari, N. P. D. P. (2024). Peluang dan Tantangan Inovasi Sediaan Herbal Menggunakan Nanoteknologi untuk Pengobatan Herbal Modern di Indonesia. In *Prosiding Workshop Dan Seminar Nasional Farmasi*, 3, 74–87. <https://doi.org/10.24843/WSNF.2024.v03.p08>
- Marlina, S. (2025). Artificial Intelligence sebagai Mitra Strategis dalam Revolusi Layanan Kesehatan Modern.

- Jurnal Sains Dan Teknologi*, 1(1), 1–7.
<https://jurnal.pustakabangsaindonesia.com/index.php/jstek/article/view/53>
- Noorain, Srivastava, V., Parveen, B., & Parveen, R. (2023). Artificial intelligence in drug formulation and development: applications and future prospects. *Current Drug Metabolism*, 24(9), 622–634. 10.2174/0113892002265786230921062205
- Pawar, H. B., Bhat, G. M., Srikanth, A., & Muragundi, P. M. (2026). Challenges of using artificial intelligence (Natural Language Processing) tools for regulatory documentation. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 16(2), 019–027. 10.7324/JAPS.2026.267918
- Pradana, A. E., Herawati, A. R., & Dwimawanti, I. H. (2025). Tantangan kecerdasan buatan dalam implikasi kebijakan pemerintah di Indonesia: Studi literatur. *Jurnal Good Governance*, 21(1), 51–66. <https://doi.org/10.32834/gg.v21i1.889>
- Pranidhi, D., & Abimanto, D. (2023). Integrasi Bioinformatika dan Farmakogenomik untuk Merancang Terapi Individualisasi pada Pasien dengan Resistensi Obat Tuberkulosis. *Journal of New Trends in Sciences*, 1(4), 1–10. <https://doi.org/10.59031/jnts.v1i4.768>
- Prihantini, P., Sutarto, S., Apriliyani, E. S., StaviniBELIA, S., Arsyad, M., & Mukhtar, D. (2025). Deep learning approaches in education: A literature review on their role in addressing future challenge. *TOFEDU: The Future of Education Journal*, 4(5), 1213–1220. <https://doi.org/10.61445/tofedu.v4i5.532>
- Purba, E. Y., & Manalu, D. (2025). IMPLEMENTASI METODE PENELITIAN EKSPERIMEN DALAM PENGUJIAN PERFORMA APLIKASI MOBILE. *Kohesi: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 10(2), 81–90. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16782084>
- Rokhman, N., Sumaryanto, S., Hakim, F. N., & Maulan, P. A. (2025). Integrasi Machine Learning dalam Homebase Sistem Informasi untuk Analisis Produktivitas Akademik. *Go Infotech: Jurnal Ilmiah STMIK AUB*, 31(2), 319–327. <https://doi.org/10.36309/goi.v31i2.424>
- Saini, J. P. S., Thakur, A., & Yadav, D. (2025). AI-driven innovations in pharmaceuticals: optimizing drug discovery and industry operations. *RSC Pharmaceuticals*, 2(3), 437–454. 10.1039/D4PM00323C
- Selvaraj, C., Chandra, I., & Singh, S. K. (2022). Artificial intelligence and machine learning approaches for drug design: challenges and opportunities for the pharmaceutical industries. *Molecular Diversity*, 26(3), 1893–1913. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11030-021-10326-z>
- Suriyaamporn, P., Pamornpathomkul, B., Ngawhirunpat, T., Akkaramongkolporn, P., & Opanasopit, P. (2026). The future trends of artificial intelligence and innovative technologies in the new era of pharmaceutical sciences and industry 4.0. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 52(2), 183–196. <https://doi.org/10.1080/03639045.2025.2590707>
- Suryani, A. I., Buana, K. D. M., Shantyoga, N. P. I. P., Desriati, N. L. E., & Faisal, M. (2025). Carbopol-Based Clove Oil (*Syzygium aromaticum*) Emulgel: Formulation, Physical Characterization, and Thermodynamic Stability. *Journal Syifa Sciences and Clinical Research*, 7(3), 340–350. <https://doi.org/10.37311/jsscr.v7i3.34204>
- Tanvir, A., Juie, B. J. A., Tisha, N. T., & Rahman, M. M. (2020). Synergizing big data and biotechnology for innovation in healthcare, pharmaceutical development, and fungal research. *International Journal of Biological, Physical and Chemical Studies*, 2(2), 23–32. <https://doi.org/10.32996/ijbpcs.2020.2.2.4>
- Tiwari, P. C., Pal, R., Chaudhary, M. J., & Nath, R. (2023). Artificial intelligence revolutionizing drug development: Exploring opportunities and challenges. *Drug Development Research*, 84(8), 1652–1663.
- Venkataraman, M., Rao, G. C., Madavareddi, J. K., & Maddi, S. R. (2025). Leveraging machine learning models in evaluating ADMET properties for drug discovery and development. *ADMET and DMPK*, 13(3), 1–39. <https://doi.org/10.5599/admet.2772>
- Vora, L. K., Gholap, A. D., Jetha, K., Thakur, R. R. S., Solanki, H. K., & Chavda, V. P. (2023). Artificial intelligence in pharmaceutical technology and drug delivery design. *Pharmaceutics*, 15(7), 1916. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15071916>
- Yadav, A. P., Singh, G., Singh, M. K., & Chaudhary, A. (2025). Artificial intelligence in optimizing formulations and excipients: Revolutionizing pharmaceutical product development. *Journal of Advanced Scientific Research*, 16(07), 9–18. <http://sciensage.info/index.php/JASR/article/view/2477>
- Zaborenko, N., Shi, Z., Corredor, C. C., Smith-Goettler, B. M., Zhang, L., Hermans, A., ... & Zacour, B. M. (2019). First-principles and empirical approaches to predicting in vitro dissolution for pharmaceutical formulation and process development and for product release testing. *The AAPS Journal*, 21(3), 32. <https://link.springer.com/article/10.1208/s12248-019-0297-y>