



# Kajian Integratif mengenai Peran Teknologi Digital dan Analitik dalam Standarisasi dan Pengendalian Mutu Sediaan Herbal

Antonius Padua Ratu<sup>1\*</sup>, Liandhajani<sup>2</sup>, Guntoro Halim<sup>3</sup>, Paskalis Pertomo Lidun Nunang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sekolah Tinggi Teknologi Industri dan Farmasi Bogor

<sup>2,3</sup> Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta

<sup>4</sup> Universitas Bunda Mulia

DOI:

<https://doi.org/10.47134/scpr.v2i3.5081>

\*Correspondence: Antonius Padua Ratu

Email:

[apotekerantoniuspaduaratu@gmail.com](mailto:apotekerantoniuspaduaratu@gmail.com)

Received: 30-08-2025

Accepted: 30-09-2025

Published: 30-10-2025



**Copyright:** © 2025 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike (CC BY SA) license (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

**Abstrak:** Kajian ini bertujuan menganalisis peran teknologi digital dan analitik dalam proses standarisasi serta pengendalian mutu sediaan herbal dengan fokus pada kontribusinya terhadap efisiensi industri dan peningkatan kepercayaan konsumen. Metode yang digunakan adalah studi pustaka dengan pendekatan kualitatif terhadap sepuluh publikasi ilmiah periode terkini yang membahas penerapan *machine learning*, *big data analytics*, *DNA barcoding*, *chemometrics*, dan sistem informasi mutu digital dalam industri herbal. Analisis dilakukan secara tematik untuk menilai sejauh mana teknologi tersebut meningkatkan akurasi identifikasi bahan, konsistensi formulasi, dan integritas data mutu produk. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi teknologi digital dan analitik mampu memperkuat validitas proses kontrol mutu melalui deteksi cepat terhadap penyimpangan bahan baku, optimasi parameter produksi, serta pelacakan rantai pasok secara *real-time*. Penerapan teknologi ini juga mendukung efisiensi biaya dan mempercepat proses validasi mutu tanpa mengurangi aspek keamanan produk. Seluruh sistem tersebut konsisten dengan prinsip *Quality by Design* dan kerangka Pharma 4.0, yang menempatkan pengendalian mutu sebagai proses dinamis berbasis data dan prediksi. Temuan ini menegaskan bahwa transformasi digital merupakan kunci untuk mewujudkan standarisasi sediaan herbal yang objektif, transparan, dan berkelanjutan. Kajian ini merekomendasikan pengembangan model implementasi lintas-sektor yang menghubungkan industri, akademisi, dan regulator untuk memperkuat ekosistem mutu herbal di tingkat nasional maupun global.

**Kata kunci:** Teknologi Digital, Analitik Data, Sediaan Herbal, Standarisasi Mutu, *Quality By Design*

## Pendahuluan

Penggunaan obat dan sediaan herbal secara global menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Hal ini didorong oleh faktor seperti meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap pengobatan alami, preferensi terhadap produk berbahan tumbuhan karena dianggap lebih “alami”, serta perkembangan regulasi yang memungkinkan akses lebih luas terhadap sediaan herbal (Balekundri & Mannur, 2020). Namun demikian, peningkatan kuantitas tidak selalu dibarengi dengan peningkatan

kualitas. Oleh karena itu, standarisasi dan pengendalian mutu sediaan herbal menjadi aspek krusial dalam menjamin keamanan, efektivitas, dan konsistensi produk. Sebagai contoh, tinjauan menunjukkan bahwa sekitar 90% negara anggota World Health Organization (WHO) telah memiliki regulasi terkait obat herbal, namun banyak tantangan masih tersisa dalam implementasi dan pemenuhan kualitas (Noviana et al, 2022).

Terlebih lagi, teknologi digital dan analitik data membuka peluang baru dalam meningkatkan sistem standarisasi dan kontrol mutu. Teknologi seperti *spektroskopi*, kromatografi yang dipadukan dengan analisis multivariat serta pemanfaatan *machine learning* telah mulai diaplikasikan dalam kualitas sediaan herbal; misalnya *fingerprinting* kimia dengan *chemometrics* dalam analisis kompleksitas sediaan tanaman (Noviana et al, 2022). Selain itu, aplikasi *digital-intelligence* dalam pengobatan tradisional memfasilitasi pengumpulan dan pengolahan data besar (*big data*) yang dapat meningkatkan akurasi, kecepatan, dan *traceability* dalam manufaktur herbal (Zhang, 2023). Dengan demikian, konvergensi antara teknologi digital/analitik dengan produksi herbal memberi relevansi tinggi untuk dibahas secara integratif.

Walaupun demikian, permasalahan utama yang melatarbelakangi topik ini cukup kompleks. Pertama, sediaan herbal sering mengalami variabilitas tinggi akibat asal bahan baku, kondisi lingkungan, proses panen dan pasca-panen, hingga formulasi akhir — yang berdampak pada konsistensi kandungan aktif dan keamanan produk (Edo et al, 2024). Kedua, metode standarisasi tradisional banyak bergantung pada beberapa *marker* saja atau teknik konvensional, sehingga kurang mampu menangkap kompleksitas matriks tumbuhan dan adanya *adulterasi* atau kontaminasi (Muyumba, 2021) (Noviana et al, 2022). Ketiga, penerapan teknologi digital dan analitik dalam konteks industri herbal masih terbatas dan belum terintegrasi secara sistematis dalam kerangka regulasi atau standar operasional industri. Variasi regional dalam regulasi dan metode membuat pemahaman tentang bagaimana teknologi digital dapat diterapkan secara optimal masih terfragmentasi (McIntyre, 2011).

Dalam konteks tersebut terdapat kesenjangan penelitian yang perlu diatasi. Meskipun ada sejumlah studi terkait metode analitik canggih untuk sediaan herbal (misalnya *metabolomik*, *fingerprinting*, *spektroskopi* NIR) dan beberapa kajian awal mengenai teknologi digital dalam pengobatan tradisional (Zhang, 2023), masih kurang studi yang secara holistik mengintegrasikan teknologi digital/analitik dengan proses standarisasi dan kontrol mutu sediaan herbal secara *end-to-end* — mulai dari bahan baku, proses produksi, monitoring mutu hingga pelaporan data. Tidak hanya itu, literatur masih sedikit yang membahas bagaimana analitik data (*big data*, *machine learning*, IoT) dan digitalisasi proses manufaktur dan pengujian dapat merevolusi standar mutu dalam sediaan herbal. Oleh karena itu, kajian integratif yang memetakan peran teknologi digital dan analitik secara sistematis dalam standarisasi dan pengendalian mutu sediaan herbal sangat diperlukan untuk mengisi celah ini.

Tujuan utama artikel ini adalah untuk melakukan kajian integratif terhadap peran teknologi digital (termasuk sistem informasi, *data analytics*, *machine learning*, *IoT*) dan teknologi analitik modern (termasuk *fingerprinting*, *spektroskopi*, *metabolomik*, *chemometrics*) dalam mendukung proses standarisasi dan pengendalian mutu sediaan herbal. Secara khusus, artikel ini akan mengeksplorasi bagaimana kedua jenis teknologi tersebut saling melengkapi dalam konteks sediaan herbal, apa tantangan implementasinya, dan bagaimana model atau kerangka kerja bisa dikembangkan untuk mengoptimalkan mutu produk herbal. Manfaat yang diharapkan mencakup dua aspek: secara teoretis, artikel ini akan memperkaya literatur di bidang *pharmaceutics* herbal dengan integrasi teknologi digital/analitik; secara praktis, artikel ini diharapkan menjadi rekomendasi bagi industri herbal, regulator, dan peneliti untuk mengadopsi dan menerapkan teknologi tersebut dengan lebih sistematis dalam rangka meningkatkan kualitas, keamanan, dan kepercayaan terhadap sediaan herbal.

Artikel ini membuka diskusi yang relevan dan kontekstual terhadap tantangan dan peluang kualitas sediaan herbal di era digital, sekaligus memberikan landasan bagi pengembangan penelitian dan praktik industri yang lebih maju dan terstandarisasi.

Peningkatan penggunaan obat herbal di berbagai belahan dunia tidak hanya mencerminkan perubahan perilaku kesehatan masyarakat, tetapi juga menandai pergeseran paradigma menuju sistem pengobatan yang lebih berorientasi pada alam (Knöss, 2014). Dalam beberapa dekade terakhir, masyarakat global semakin menyadari pentingnya kesehatan yang holistik—yang tidak hanya berfokus pada penyembuhan penyakit, tetapi juga pada pencegahan dan keseimbangan tubuh. Gaya hidup modern yang sering menimbulkan stres, paparan bahan kimia sintetis, serta meningkatnya kasus penyakit degeneratif telah mendorong banyak individu untuk mencari alternatif pengobatan yang lebih aman dan alami (Nelson & Perrone, 2000). Dalam konteks inilah, sediaan herbal kembali mendapat tempat terhormat dalam praktik kesehatan kontemporer, baik di negara maju maupun berkembang.

Namun, meningkatnya permintaan tidak selalu diikuti dengan peningkatan kualitas. Masih banyak produk herbal yang beredar tanpa standarisasi yang memadai, sehingga menimbulkan kekhawatiran akan keamanan, efektivitas, dan konsistensi hasil. Variabilitas yang tinggi pada bahan baku, perbedaan iklim dan kondisi tanah, hingga proses pengolahan yang tidak terkontrol sering kali membuat sediaan herbal sulit dijamin mutu dan kestabilannya. Ketika produk herbal dikonsumsi oleh masyarakat luas tanpa pengawasan yang ketat, potensi terjadinya kontaminasi, pemalsuan, atau interaksi obat menjadi ancaman nyata (Pinn & Pallett, 2002). Di sinilah kebutuhan akan sistem pengendalian mutu yang berbasis teknologi menjadi sangat mendesak, tidak hanya untuk memenuhi standar keamanan, tetapi juga untuk menjaga kredibilitas industri herbal di mata konsumen global.

Perkembangan teknologi digital dan analitik modern telah membuka peluang transformasi besar dalam sistem kontrol mutu dan standarisasi herbal. Teknologi seperti *chemometrics*, *spectroscopy*, dan *metabolomics* memungkinkan analisis yang lebih presisi

terhadap kandungan kimia tanaman. Lebih dari itu, integrasi *machine learning*, *big data*, dan *internet of Things* (IoT) memungkinkan pengawasan mutu yang berlangsung secara real-time, mulai dari proses budidaya, ekstraksi bahan aktif, hingga distribusi produk akhir. Sistem berbasis data ini tidak hanya mampu mendeteksi penyimpangan mutu lebih cepat, tetapi juga membantu merumuskan keputusan yang berbasis bukti, meningkatkan efisiensi produksi, dan mengurangi risiko kesalahan manusia dalam proses manufaktur.

Meskipun begitu, penerapan teknologi digital dalam industri herbal masih menghadapi sejumlah kendala. Salah satunya adalah keterbatasan infrastruktur dan sumber daya manusia yang memahami baik aspek teknologi maupun farmakognosi. Selain itu, regulasi di banyak negara masih belum sepenuhnya menyesuaikan diri dengan kecepatan perkembangan teknologi. Standar mutu yang ada sering kali masih berbasis konvensional dan belum mengakomodasi pendekatan analitik digital yang lebih kompleks. Akibatnya, banyak industri kecil dan menengah di bidang herbal yang belum dapat mengakses atau mengimplementasikan teknologi tersebut secara optimal. Di sisi lain, keberagaman regulasi antarnegara menimbulkan fragmentasi dalam sistem penjaminan mutu global, sehingga menyulitkan proses harmonisasi standar internasional.

Dalam kerangka inilah, penting untuk membangun suatu pendekatan integratif yang menghubungkan aspek tradisional dan modern dalam pengembangan sediaan herbal. Pendekatan ini tidak hanya menitikberatkan pada peningkatan mutu produk, tetapi juga pada penciptaan sistem produksi yang transparan, berkelanjutan, dan berbasis sains. Penggunaan teknologi digital bukan dimaksudkan untuk menggantikan nilai-nilai kearifan lokal dalam pengobatan tradisional, melainkan untuk memperkuat dan memvalidasinya melalui bukti ilmiah yang dapat diterima secara global. Dengan integrasi tersebut, produk herbal tidak lagi dipandang sekadar alternatif, tetapi sebagai bagian sah dari sistem kesehatan modern yang berorientasi pada keselamatan dan efektivitas.

Oleh karena itu, pembahasan dalam artikel ini diarahkan untuk menyoroti bagaimana teknologi digital dan analitik dapat berperan secara sinergis dalam meningkatkan mutu sediaan herbal. Penekanan diberikan pada pentingnya membangun sistem yang mampu melacak asal-usul bahan baku, mengontrol proses produksi, dan memastikan konsistensi produk akhir melalui data yang terintegrasi. Lebih dari sekadar aspek teknis, pembahasan ini juga mencakup implikasi sosial dan ekonomi dari penerapan teknologi tersebut bagi industri herbal, regulator, dan masyarakat.

Dengan menempatkan isu standarisasi herbal dalam konteks digitalisasi global, artikel ini diharapkan dapat menjadi pijakan untuk membangun paradigma baru: bahwa teknologi dan kearifan tradisional bukanlah dua kutub yang bertentangan, melainkan dua kekuatan yang jika dipadukan secara harmonis, mampu menciptakan sistem pengobatan herbal yang berkualitas, aman, dan berdaya saing tinggi di kancah internasional.

## Metodologi

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian kualitatif dengan pendekatan studi pustaka (*literature review*). Pendekatan kualitatif dipilih karena fokus penelitian bukan pada pengumpulan data numerik atau melakukan eksperimen langsung, melainkan menggali dan memahami secara mendalam bagaimana teknologi digital dan analitik berperan dalam standarisasi dan pengendalian mutu sediaan herbal. Metode studi pustaka dipandang tepat untuk mengintegrasikan berbagai temuan penelitian sebelumnya, teori, dan praktik yang tersebar dalam literatur, untuk kemudian diolah secara sistematis menjadi suatu kerangka pemahaman yang komprehensif (Snyder, 2019).

Dalam hal sumber data, penelitian ini mengambil literatur sekunder dari artikel jurnal peer-review, buku monograf, laporan industri/regulator, dan dokumen kebijakan yang terkait dengan sediaan herbal, teknologi digital, analitik data, standarisasi, dan pengendalian mutu. Proses pengumpulan data dimulai dengan penelusuran elektronik melalui basis data seperti Scopus, *Web of Science*, PubMed, dan Google Scholar, dengan kata kunci seperti “herbal medicine quality control”, “digital analytics in pharmaceutical manufacturing”, “standardization herbal preparations”, “big data analytics herbal drug manufacturing”, serta kombinasi lainnya. Kriteria inklusi mencakup publikasi dalam bahasa Inggris atau Indonesia, diterbitkan dalam rentang waktu 2010–2025 untuk menangkap tren terkini, dan relevan dengan tema utama. Kriteria eksklusi mencakup publikasi yang hanya bersifat opini tanpa data atau analisis, atau yang tidak tersedia teks penuh. Teknik pengumpulan literatur dilakukan secara bertahap: (1) pencarian awal dengan kata kunci luas; (2) pemilihan berdasarkan judul dan abstrak; (3) pemeriksaan dokumen teks lengkap untuk relevansi dan kualitas; (4) pencatatan metadata (penulis, tahun, tujuan, metode, hasil utama) ke dalam tabel bibliografi.

Setelah data literatur terkumpul, prosedur analisis dilakukan secara sistematis. Pertama, dilakukan data *extraction* dengan menandai tema kunci, metodologi, temuan, kelebihan, dan kekurangan dari masing-masing studi. Kemudian, dilakukan *coding* tematik untuk mengategorikan konten dalam beberapa domain seperti: (a) karakteristik sediaan herbal dan tantangan mutu; (b) aplikasi teknologi digital (misalnya *IoT*, *blockchain*, sistem informasi manufaktur) dalam manufaktur herbal; (c) metode analitik dan data *analytics* (misalnya *chemometrics*, *machine learning*, *big data*) dalam pengujian mutu; (d) integrasi antara teknologi digital dan analitik dalam kerangka standarisasi; (e) hambatan dan peluang implementasi. Selanjutnya dilakukan *synthesis* naratif di mana hasil-hasil tersebut dibandingkan, dipetakan kesenjangan, dan dihubungkan dengan kerangka teoretis atau model konseptual. Pendekatan ini sejalan dengan pedoman literatur *review* yang menekankan bahwa tinjauan pustaka seharusnya menyediakan lensa yang koheren untuk memahami pengetahuan yang ada (Paré, 2017).

Karena penelitian ini murni berupa kajian literatur, maka tidak terdapat pengumpulan data primer melalui subjek atau partisipan manusia maupun eksperimen laboratorium. Dengan demikian, tidak ada teknik sampling partisipan yang digunakan.

Namun, dalam konteks pemilihan literatur sebagai “sampel” studi, dapat disebut bahwa teknik *purposive* sampling diterapkan—yaitu pemilihan studi secara sengaja yang paling relevan dengan pertanyaan penelitian (teknologi digital, analitik, dan mutu herbal). Selain itu, teknik *snowballing* (merujuk dari daftar rujukan literatur yang relevan) juga digunakan untuk memperluas cakupan literatur terkait. Proses ini menjamin bahwa temuan yang dihasilkan didukung oleh literatur yang representatif dan terkini, sehingga validitas naratif dapat ditingkatkan.

Untuk memastikan kualitas dan keandalan dari kajian pustaka ini, beberapa langkah dilakukan. Pertama, dilakukan triangulasi sumber dengan menggabungkan berbagai jenis literatur (artikel, buku, laporan industri) agar mendapat gambaran yang lebih holistik. Kedua, penilaian kritis terhadap setiap studi dilakukan dengan mempertimbangkan aspek kredibilitas, relevansi, dan transparansi metode dalam studi asalnya. Ketiga, pemetaan kesenjangan literatur dilakukan untuk menunjukkan area yang kurang dieksplorasi, sekaligus mengidentifikasi implikasi untuk penelitian dan praktik. Dengan demikian, artikel ini bertujuan menghasilkan temuan yang komprehensif, terpercaya, dan berguna baik secara teoretis maupun praktis dalam konteks standarisasi dan pengendalian mutu sediaan herbal melalui teknologi digital dan analitik.

## Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian ini menyajikan gambaran komprehensif mengenai bagaimana teknologi digital dan analitik berperan dalam meningkatkan efektivitas standarisasi dan pengendalian mutu sediaan herbal. Berdasarkan sepuluh sumber pustaka yang dianalisis, ditemukan bahwa penerapan teknologi tersebut tidak hanya memperbaiki efisiensi proses mutu, tetapi juga menciptakan sistem pengawasan yang lebih akurat, transparan, dan berkelanjutan. Temuan ini menunjukkan bahwa transformasi digital dalam industri herbal merupakan keharusan strategis untuk menjawab tantangan kompleksitas bahan alami dan variabilitas mutu produk yang selama ini menjadi kendala utama dalam pengembangan obat herbal modern.

Dari sisi digitalisasi sistem mutu, penelitian oleh Oktapiani (2025) dan Nuraini et al. (2024) menegaskan bahwa penerapan sistem informasi mutu terpadu dan basis data nasional dapat memperkuat mekanisme pengawasan mutu herbal di Indonesia. Sistem ini memungkinkan pelacakan kualitas bahan baku dan produk akhir secara *real time*, mempercepat pelaporan hasil uji, serta meningkatkan efisiensi pengambilan keputusan oleh otoritas pengawas. Hal ini sejalan dengan arah kebijakan global menuju digitalisasi industri farmasi berbasis konsep Pharma 4.0, di mana kualitas produk tidak hanya dinilai dari hasil akhir, tetapi dikendalikan melalui data dan proses produksi yang terintegrasi (Nuraini et al, 2024) (Oktapiani, 2025).

Kemajuan signifikan juga terlihat dalam aspek teknologi analitik. Penelitian oleh Wang et al. (2023), Bokov et al. (2019), dan Singh et al. (2020) menunjukkan bahwa penerapan metode analitik modern seperti HPLC, *spektrofotometri UV-Vis*, *metabolomik*, serta

*chemometrics* mampu mengidentifikasi senyawa aktif dengan presisi tinggi dan mendeteksi variasi antar *batch* secara statistik. Pendekatan berbasis data ini membantu meminimalkan kesalahan manusia dan memperkuat keandalan hasil analisis. Selain itu, teknik *Principal Component Analysis* (PCA) dan *Partial Least Squares-Discriminant Analysis* (PLS-DA) digunakan untuk membangun *fingerprint* kimiawi yang konsisten, sehingga mendukung proses standarisasi berbasis profil metabolit (Bokov & Smyslova, 2019) (Singh et al, 2020) Wang et al, 2023).

Dalam konteks *autentikasi* bahan baku, Parveen et al. (2016) menyoroti penggunaan DNA barcoding sebagai metode validasi genetik untuk mengidentifikasi spesies tanaman dalam bahan herbal. Teknologi ini terbukti meningkatkan akurasi identifikasi hingga 98% dan efektif dalam mencegah adulterasi atau pemalsuan bahan baku. *Autentikasi* berbasis DNA ini penting karena memastikan bahwa komponen herbal yang digunakan sesuai dengan spesifikasi farmakope, sehingga meningkatkan kepercayaan terhadap keamanan dan kemurnian produk (Parveen et al., 2016).

Sementara itu, studi Zhang et al. (2023) dan Liu et al. (2022) memperlihatkan bagaimana kecerdasan buatan (AI) dan big data analytics merevolusi sistem mutu herbal. AI digunakan untuk menganalisis pola data dalam pengawasan mutu, memprediksi kontaminasi, dan mengoptimalkan proses ekstraksi bahan aktif. Big data memungkinkan integrasi dan perbandingan lintas produksi dari berbagai pabrik atau wilayah, sehingga menghasilkan validasi mutu yang lebih luas dan obyektif. Dalam praktiknya, sistem berbasis cloud computing dan *Internet of Things* (IoT) juga digunakan untuk menghubungkan berbagai tahapan produksi herbal, menciptakan sistem mutu yang adaptif dan berbasis bukti (Liu et al, 2022) (Zhang, 2023).

Rahman et al. (2021) menambahkan dimensi baru dalam aspek transparansi rantai pasok dengan memperkenalkan *blockchain* dan *smart contracts* dalam distribusi bahan herbal. Teknologi ini menciptakan sistem pelacakan mutu yang tidak dapat dimanipulasi, memastikan setiap tahapan rantai pasok—dari petani hingga konsumen—terekam secara aman dan transparan. Dengan demikian, *blockchain* tidak hanya meningkatkan kepercayaan konsumen, tetapi juga menjadi alat penting untuk memenuhi regulasi mutu internasional yang menuntut *traceability* tinggi (Rahman et al., 2021).

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa sinergi antara teknologi digital dan analitik membentuk fondasi baru dalam sistem pengendalian mutu herbal. Penerapan teknologi ini memberikan berbagai manfaat, antara lain peningkatan efisiensi waktu analisis, pengurangan biaya pengujian, peningkatan keandalan data, serta pembentukan sistem mutu yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi produksi. Temuan-temuan ini juga memperlihatkan bahwa pendekatan berbasis data mampu mengatasi keterbatasan sistem mutu konvensional yang selama ini bersifat fragmentaris dan manual. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya memperkuat pemahaman terhadap pentingnya digitalisasi dalam industri herbal, tetapi juga memberikan arah konkret bagi pengembangan kebijakan dan praktik standarisasi berbasis teknologi di masa depan.

**Tabel 1.** Studi Pustaka Terkait Teknologi Digital dan Analitik dalam Standarisasi Sediaan Herbal

No	Penulis (Tahun)	Judul Artikel	Jurnal	Tahun
1	(Oktapiani, 2025)	Penerapan Teknologi dalam Penjaminan Mutu <i>Fitomedisin</i> di Indonesia	Wahana Sains dan Farmasi Nusantara	2025
2	(Wang et al., 2023)	Advancing Herbal Medicine: Enhancing Product Quality and Consistency through Analytical Technology Integration	Frontiers in Pharmacology	2023
3	(Ahmad et al., 2023)	Quality Control and Evaluation of Herbal Product	Int. J. for Research in Applied Science and Engineering Technology	2023
4	(Parveen et al., 2016)	DNA Barcoding for the Identification of Botanical Materials in Herbal Medicines	Planta Medica	2016
5	(Bokov & Smyslova, 2019)	Development and Validation of Spectrophotometric Methods for Multicomponent Herbal Formulations	J. of Advanced Pharmaceutical Technology & Research	2019
6	(Zhang, 2023)	Digital-Intelligence Technology in Herbal Product Quality Monitoring	Journal of Herbal Science and Technology	2023
7	(Liu et al., 2022)	Big Data Analytics for Standardization of Traditional Herbal Medicines	Journal of Integrative Medicine	2022
8	(Rahman et al., 2021)	Blockchain-Based Traceability in Herbal Supply Chains	Herbal Industry Review	2021
9	(Singh et al., 2020)	Chemometric Fingerprinting for Herbal Drug Standardization	Phytochemistry Letters	2020
10	(Nuraini et al., 2024)	Implementasi Sistem Informasi Terpadu untuk Mutu Fitofarmaka Indonesia	Indonesian Journal of Pharmacy Technology	2024

## Hasil dan Pembahasan

Hasil sintesis dari sepuluh penelitian dalam studi pustaka ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi digital dan analitik data telah memberikan dampak signifikan dalam peningkatan mutu, konsistensi, dan akuntabilitas sediaan herbal. Secara teoretis, hasil ini dapat dijelaskan melalui konsep *Total Quality Management (TQM)* dan *Quality by Design (QbD)* yang menekankan pentingnya proses berbasis data dalam menjamin mutu produk farmasi (Garvin, 1987) (Yu, 2008). Dalam konteks herbal, penerapan *QbD* dengan bantuan teknologi digital seperti *Internet of Things (IoT)*, *Artificial Intelligence (AI)*, dan *Big Data Analytics* memungkinkan pemantauan mutu secara *real time* sepanjang rantai pasok, mulai dari bahan baku hingga produk akhir. Studi Wang et al. (2023) mendukung teori ini dengan menunjukkan bahwa kombinasi *chemometrics*, *metabolomics*, dan *machine learning* mampu mengidentifikasi variasi bahan aktif yang sebelumnya tidak terdeteksi oleh metode konvensional (Wang et al, 2023).

Dari perspektif empiris, penelitian Parveen et al. (2016) dan Bokov et al. (2019) menunjukkan kontribusi teknologi analitik terhadap peningkatan presisi pengujian mutu sediaan herbal. Penerapan DNA barcoding dan metode spektrofotometri UV-Vis memberikan validitas objektif yang mengurangi kesalahan manusia dalam proses autentikasi bahan dan kuantifikasi komponen aktif (Bokov & Smyslova, 2019) (Parveen et al, 2016). Temuan ini konsisten dengan teori *Analytical Quality by Design* (AQbD), yang menempatkan pemodelan statistik dan analitik sebagai inti dalam proses validasi metode (Karmarkar, 2018). Dengan demikian, integrasi teknologi analitik tidak hanya memperkuat keandalan data, tetapi juga menurunkan variabilitas antar *batch*, yang selama ini menjadi masalah utama dalam produksi obat herbal (Ekor, 2014).

Selain itu, digitalisasi sistem mutu herbal seperti yang diusulkan oleh Oktapiani (2025) dan Nuraini et al. (2024) merepresentasikan penerapan teori *Digital Transformation in Quality Systems*, di mana sistem informasi mutu berbasis *database* dan *blockchain* memperkuat transparansi dan *traceability* rantai pasok (Nuraini et al., 2024; Oktapiani, 2025). Hal ini sejalan dengan konsep Pharma 4.0, yaitu paradigma digitalisasi industri farmasi global (ISPE, 2020). Implikasinya terhadap sektor herbal di Indonesia sangat besar: dengan digitalisasi proses pengawasan mutu, pemerintah dan industri dapat mengurangi risiko *adulterasi*, memantau kadar kontaminan, serta mempercepat pelaporan insiden mutu. Implementasi sistem semacam ini juga meningkatkan kepercayaan publik terhadap produk *fitofarmaka* lokal dan membuka peluang ekspor ke pasar internasional dengan standar yang lebih ketat (World Health Organization (WHO), 2023).

Namun demikian, terdapat beberapa faktor yang memengaruhi efektivitas penerapan teknologi digital dan analitik dalam pengendalian mutu herbal. Faktor pendukung utama adalah ketersediaan infrastruktur teknologi, literasi digital tenaga kerja, dan dukungan regulasi. Sebaliknya, hambatan muncul dari keterbatasan biaya investasi, kurangnya *interoperabilitas* antar sistem laboratorium, dan resistensi terhadap perubahan di kalangan industri tradisional (Rahman et al, 2021). Selain itu, penelitian yang ada masih cenderung berfokus pada aspek laboratorium dan belum banyak yang mengintegrasikan seluruh siklus mutu—mulai dari hulu (budidaya bahan baku) hingga hilir (distribusi dan pascapasar). Keterbatasan ini mengindikasikan perlunya pendekatan multidisiplin yang menggabungkan ilmu farmasi, bioinformatika, teknik industri, dan kebijakan publik untuk menghasilkan sistem mutu herbal yang benar-benar terintegrasi.

Kontribusi teoretis dari hasil penelitian ini adalah memperluas konsep *quality management* ke ranah fitomedisin dengan menekankan peran teknologi digital sebagai *enabler* dalam standarisasi berbasis data. Sementara kontribusi praktisnya terletak pada pengembangan model *data-driven standardization framework*, yang dapat digunakan oleh industri herbal untuk memetakan titik kendali mutu kritis secara digital. Dengan adanya sistem berbasis data, proses audit mutu, validasi bahan, dan dokumentasi menjadi lebih efisien serta transparan. Hasil ini juga memberikan dasar bagi regulator untuk merumuskan kebijakan berbasis bukti (*evidence-based regulation*) yang adaptif terhadap perkembangan teknologi.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Pertama, sebagian besar literatur yang dianalisis masih bersifat *review* atau *proof-of-concept*, sehingga penerapannya pada skala industri penuh masih terbatas. Kedua, belum banyak penelitian yang mengukur dampak ekonomi langsung dari adopsi teknologi digital terhadap efisiensi mutu herbal. Ketiga, variasi metodologi dalam masing-masing penelitian membuat sintesis kuantitatif sulit dilakukan. Untuk penelitian masa depan, disarankan agar dilakukan studi empiris berskala besar yang menguji efektivitas sistem digital-analitik dalam pengawasan mutu herbal di berbagai konteks geografis dan regulatori. Penelitian interdisipliner yang menggabungkan *AI-driven analytics*, *blockchain-based traceability*, dan *sustainability assessment* juga diharapkan dapat memberikan model mutu herbal yang lebih holistik dan berkelanjutan.

## Simpulan

Penelitian kualitatif ini menegaskan bahwa integrasi teknologi digital dan analitik data memainkan peran fundamental dalam memperkuat standarisasi dan pengendalian mutu sediaan herbal melalui peningkatan akurasi, transparansi, dan efisiensi proses produksi. Temuan dari berbagai studi menunjukkan bahwa penerapan *machine learning*, *DNA barcoding*, *big data analytics*, dan sistem informasi mutu digital tidak hanya menjawab tantangan variabilitas biologis bahan baku, tetapi juga membangun paradigma baru mutu berbasis data yang sejalan dengan konsep *Quality by Design* dan *Pharma 4.0*. Hasil penelitian ini memberikan pemahaman mendalam mengenai bagaimana teknologi dapat merekonstruksi praktik tradisional pengawasan mutu herbal menjadi sistem yang lebih objektif dan terukur, sekaligus memperluas kontribusi terhadap teori manajemen mutu modern dalam konteks *fitomedisin*. Secara sosial dan budaya, integrasi ini berpotensi meningkatkan kepercayaan masyarakat terhadap obat herbal dan memperkuat posisi industri herbal nasional di pasar global. Namun demikian, penelitian ini juga menyadari keterbatasannya pada aspek empiris dan penerapan lintas skala industri yang masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi model integrasi digital yang berkelanjutan dengan melibatkan kolaborasi multidisipliner antara farmasi, teknologi informasi, dan kebijakan publik guna menciptakan sistem mutu herbal yang adaptif, inklusif, dan berdaya saing global. Disarankan agar industri herbal mengintegrasikan teknologi digital seperti *machine learning*, *blockchain*, dan sistem mutu terpadu untuk meningkatkan transparansi dan efisiensi, sementara regulator perlu menyiapkan regulasi adaptif dan akademisi memperluas riset lintas disiplin guna mendukung keberlanjutan mutu herbal di era digital.

## Daftar Pustaka

- Ahmad, I., Sharma, S., & Chaurasia, D. K. (2023). Quality Control and Evaluation of Herbal Product. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(1), 1–7. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.48683>
- Balekundri, A., & Mannur, V. (2020). Quality control of the traditional herbs and herbal products: A review. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 6, 67. <https://doi.org/10.1186/s43094-020-00091-5>
- Bokov, D. O., & Smyslova, O. A. (2019). Development and Validation of Spectrophotometric Methods for Multicomponent Herbal Formulations. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*. [https://doi.org/10.4103/japtr.japtr\\_61\\_19](https://doi.org/10.4103/japtr.japtr_61_19)
- Edo, G. I., Obasohan, P., Makia, R. S., Abiola, O. T., & Umelo, E. C. (2024). The use of quality control parameters in the evaluation of herbal drugs: A review. *Journal of Herbal Research*. <https://doi.org/10.1007/s44337-024-00177-6>
- Ekor, M. (2014). The growing use of herbal medicines: Issues relating to adverse reactions and challenges in monitoring safety. *Frontiers in Pharmacology*, 4(177), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fphar.2013.00177>
- Garvin, D. A. (1987). Competing on the eight dimensions of quality. *Harvard Business Review*, 65(6), 101–109.
- ISPE. (2020). *Pharma 4.0™: Digital Maturity Model*. International Society for Pharmaceutical Engineering.
- Karmarkar, S. (2018). Analytical Quality by Design: A comprehensive review. *Pharmaceutical Quality Assurance Journal*, 10(1), 56–64.
- Knöss, W. (2014). Regulasi obat herbal. *Journal of Ethnopharmacology*. <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2014.10.037>
- Liu, X., Zhao, Y., & Chen, W. (2022). Big Data Analytics for Standardization of Traditional Herbal Medicines. *Journal of Integrative Medicine*, 20(8), 715–728.
- McIntyre, M. (2011). Regulasi obat herbal. *The Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61292-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61292-0)
- Muyumba, N. W. (2021). Quality control of herbal drugs and preparations. *Journal of Traditional Medicine*.
- Nelson, L. S., & Perrone, J. (2000). Pengobatan herbal dan alternatif. *Emergency Medicine Clinics of North America*. [https://doi.org/10.1016/S0733-8627\(05\)70154-1](https://doi.org/10.1016/S0733-8627(05)70154-1)
- Noviana, E., Indrayanto, G., & Rohman, A. (2022). Advances in fingerprint analysis for standardization and quality control of herbal medicines. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 853023. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.853023>
- Nuraini, R., Wibowo, H., & Sari, M. (2024). Implementasi Sistem Informasi Terpadu untuk Mutu Fitofarmaka Indonesia. *Indonesian Journal of Pharmacy Technology*, 5(2), 45–56.
- Oktapiani, N. K. (2025). Penerapan Teknologi dalam Penjaminan Mutu Fitomedisin di Indonesia. *Wahana Sains dan Farmasi Nusantara*, 3(2), 32–40. <https://doi.org/10.24843/wsnf.2024.v03.p32>

- Paré, G. (2017). Methods for literature reviews. *NCBI Bookshelf*.
- Parveen, I., Gafner, S., & Techen, N. (2016). DNA Barcoding for the Identification of Botanical Materials in Herbal Medicines. *Planta Medica*, 82(13), 1225–1235. <https://doi.org/10.1055/s-0042-111208>
- Pinn, G., & Pallett, L. (2002). Pengobatan herbal pada kehamilan. *Complementary Therapies in Nursing and Midwifery*. <https://doi.org/10.1054/CTNM.2001.0620>
- Rahman, M., Ahmed, T., & Chowdhury, S. (2021). Blockchain-Based Traceability in Herbal Supply Chains. *Herbal Industry Review*, 8(3), 56–68.
- Singh, P., Mehra, R., & Bhatnagar, S. (2020). Chemometric Fingerprinting for Herbal Drug Standardization. *Phytochemistry Letters*, 35, 112–120.
- Snyder, H. (2019). Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Wang, H., Chen, Y., Wang, L., Li, Q., & Zhang, W. (2023). Advancing Herbal Medicine: Enhancing Product Quality and Consistency through Analytical Technology Integration. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1265178. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1265178>
- World Health Organization (WHO). (2023). *WHO Global Report on Traditional and Complementary Medicine 2023*. World Health Organization.
- Yu, L. X. (2008). Pharmaceutical quality by design: Product and process development, understanding, and control. *Pharmaceutical Research*, 25(4), 781–791. <https://doi.org/10.1007/s11095-007-9511-1>
- Zhang, Z. (2023). How does urbanization affect public health? *Frontiers in Public Health*, 10, 1096964.