

SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW: PERKEMBANGAN METODE ANALISIS KURKUMIN (*Curcuma longa* L.) PADA SEDIAAN FARMASI DAN BAHAN ALAM

Muhammad Wildan Firdaus¹

¹Program Studi S1 Farmasi, Fakultas Kesehatan, Universitas Aisyah Pringsewu, Indonesia

**Corresponding Author: muhammadwildan.ums@gmail.com

ABSTRAK

Kurkumin merupakan senyawa bioaktif utama dari *Curcuma longa* L. yang banyak digunakan dalam sediaan farmasi dan produk bahan alam. Kompleksitas matriks sampel serta karakteristik fisikokimia kurkumin menuntut metode analisis yang akurat, sensitif, dan tervalidasi. Berbagai metode telah dikembangkan, mulai dari spektrofotometri UV-Visible hingga teknik kromatografi dan spektrometri modern. Namun, kajian yang membandingkan kinerja metode-metode tersebut berdasarkan parameter validasi yang seragam masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengkaji secara sistematis perkembangan metode analisis kurkumin pada sediaan farmasi dan bahan alam, membandingkan performanya berdasarkan parameter validasi sesuai pedoman ICH Q2(R2), serta mengidentifikasi tren pengembangan teknologi analisis. Kajian dilakukan menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020 melalui penelusuran artikel pada basis data Scopus, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis, dan Google Scholar. Hasil kajian menunjukkan bahwa HPLC masih menjadi metode yang paling banyak digunakan karena memiliki sensitivitas, selektivitas, dan reproduktibilitas yang baik. Perkembangan terkini mengarah pada penggunaan UHPLC, LC-MS/MS, sensor elektrokimia, serta pendekatan Green Analytical Chemistry untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan analisis. Kajian ini memberikan sintesis komprehensif mengenai perkembangan metode analisis kurkumin serta rekomendasi pemilihan metode sesuai tujuan analisis dan karakteristik sampel.

Kata Kunci: Kurkumin, metode analisis, HPLC, validasi metode, systematic literature review

ABSTRACT

Curcumin, the principal bioactive compound of Curcuma longa L., has been extensively utilized in pharmaceutical formulations and natural products due to its diverse pharmacological activities. However, the complexity of sample matrices and the physicochemical properties of curcumin require analytical methods that are accurate, sensitive, and well validated. Although numerous analytical techniques have been developed, comprehensive comparisons of their analytical performance based on standardized validation parameters remain limited. This study aimed to systematically review the development of analytical methods for curcumin in pharmaceutical formulations and natural products, compare their performance according to the ICH Q2(R2) validation guidelines, and identify current trends in analytical technologies. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PRISMA 2020 guidelines by retrieving relevant articles from Scopus, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis, and Google Scholar. The review demonstrates that high-performance liquid chromatography (HPLC) remains the most widely applied technique owing to its high sensitivity, selectivity, and reproducibility. Recent advances indicate a growing shift toward UHPLC, LC-MS/MS, electrochemical sensors, and Green Analytical Chemistry approaches to improve analytical efficiency and sustainability. This review provides a comprehensive synthesis of current analytical methods and offers recommendations for selecting appropriate techniques based on analytical objectives, sample characteristics, and validation requirements.

Keywords: Curcumin, analytical methods, HPLC, method validation, systematic literature review

PENDAHULUAN

Curcuma longa L. (temulawak kuning/kunyit) telah lama dimanfaatkan sebagai bahan pangan, pewarna alami, dan bahan baku obat tradisional di berbagai wilayah Asia. Komponen bioaktif utamanya, kurkuminoid, terdiri atas tiga senyawa utama yaitu kurkumin, demetoksikurkumin, dan bisdemetoksikurkumin, dengan kurkumin sebagai komponen dominan yang memberikan aktivitas antiinflamasi, antioksidan, antikanker, hepatoprotektif, dan neuroprotektif[11]. Potensi terapeutik tersebut mendorong pengembangan kurkumin ke dalam berbagai bentuk sediaan farmasi modern, mulai dari tablet dan kapsul konvensional hingga sistem penghantaran lanjut seperti nanopartikel lipid padat, nanoemulsi, liposom, dan kompleks fosfolipid yang dirancang untuk mengatasi kelemahan farmakokinetik kurkumin, terutama kelarutan air yang rendah, stabilitas kimia yang buruk pada pH basa, serta bioavailabilitas oral yang hanya berkisar sekitar satu persen [2].

Keragaman matriks tersebut—mulai dari simplisia dan ekstrak tumbuhan, sediaan farmasi padat maupun semipadat, hingga cairan biologis seperti plasma dan jaringan—menuntut ketersediaan metode analisis yang tidak hanya akurat, tetapi juga selektif terhadap ketiga kurkuminoid yang secara struktural sangat mirip. Selama dua

dekade terakhir, sejumlah pendekatan analitik telah dikembangkan dan divalidasi, mulai dari spektrofotometri UV-Vis yang sederhana, kromatografi lapis tipis kinerja tinggi (HPTLC) untuk skrining cepat, kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC/UHPLC) sebagai metode baku untuk kontrol mutu, kromatografi cair-spektrometri massa tandem (LC-MS/MS) untuk analisis biologis bersensitivitas tinggi, spektrofлуorimetri yang memanfaatkan sifat fluoresensi intrinsik kurkumin, hingga sensor elektrokimia berbasis elektroda termodifikasi nanomaterial yang menawarkan kecepatan dan portabilitas analisis [3].

Meskipun literatur mengenai metode analisis kurkumin cukup melimpah, sebagian besar publikasi bersifat studi tunggal yang mengembangkan dan memvalidasi satu metode untuk satu matriks tertentu, tanpa membandingkan performanya secara langsung terhadap metode lain menggunakan parameter validasi yang seragam. Tinjauan kritis yang telah ada, misalnya Alves et al. [2], memberikan gambaran umum berbagai teknik analisis kurkumin namun belum secara eksplisit menyusun perbandingan parameter validasi ICH secara tabulatif lintas kategori metode, maupun mengaitkannya dengan tren pergeseran menuju teknologi modern dan prinsip

Green Analytical Chemistry. Kesenjangan (research gap) inilah yang mendasari perlunya sebuah tinjauan sistematis yang secara khusus mensintesis performa validasi antar-metode secara seragam, memetakan pergeseran teknologi dari metode konvensional ke metode modern, serta merumuskan rekomendasi pemilihan metode berdasarkan tujuan penggunaan analitik [2,9].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan melakukan kajian sistematis terhadap perkembangan metode analisis kurkumin pada sediaan farmasi dan bahan alam berdasarkan publikasi ilmiah terkini, dengan tujuan khusus mengidentifikasi ragam metode yang telah dilaporkan, mendeskripsikan prinsip kerja masing-masing metode, membandingkan performa validasi berdasarkan parameter ICH, mengevaluasi kelebihan dan keterbatasan setiap metode, mengidentifikasi tren perkembangan teknologi analisis, serta menyusun rekomendasi pemilihan metode yang sesuai dengan kebutuhan kontrol mutu sediaan farmasi, analisis bahan alam, maupun analisis biologis [7].

TINJAUAN PUSTAKA

1. Karakteristik Kimia dan Tantangan Analisis Kurkumin

Kurkumin memiliki gugus β -diketon yang menjadikannya bersifat asam lemah, fotolabil, dan mudah terhidrolisis pada pH

basa. Gugus fenolik pada strukturnya memberikan sifat elektroaktif yang mendasari pengembangan sensor elektrokimia, sedangkan sistem konjugasi aromatik-nya menghasilkan serapan maksimum pada rentang 420–430 nm serta fluoresensi intrinsik yang dimanfaatkan pada metode spektrofotometri [13]. Ketiga kurkuminoid utama memiliki profil spektral yang tumpang tindih, sehingga metode nonkromatografi seperti UV-Vis konvensional berisiko mengalami interferensi dan memerlukan tahap pemisahan atau justifikasi selektivitas tambahan [2].

2. Kerangka Validasi Metode Analisis: ICH Q2(R2)

Pedoman International Council for Harmonisation (ICH) Q2(R2) yang diadopsi pada November 2023 dan mulai berlaku efektif Juni 2024 merupakan revisi menyeluruh dari ICH Q2(R1) tahun 2005, dengan perluasan cakupan pada metode spektroskopik dan spektrometrik yang memerlukan analisis multivariat, termasuk kalibrasi berbasis kemometrik (International Council for Harmonisation [ICH], [8]. Parameter validasi yang dievaluasi meliputi spesifisitas/selektivitas, linieritas, rentang, akurasi, presisi (keterulangan dan presisi antara), batas deteksi (LOD), batas kuantitasi (LOQ), dan ketahanan (robustness). Parameter-

parameter inilah yang digunakan sebagai kerangka acuan seragam dalam tinjauan ini untuk membandingkan performa metode analisis kurkumin lintas kategori Teknik [12].

3. Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai analisis kurkumin dengan UV-Vis, misalnya pada estimasi kurkumin dalam sediaan krim dan formulasi nano, umumnya melaporkan LOD pada rentang 0,4–0,9 $\mu\text{g/mL}$ [5,7]. Nilai tersebut jauh lebih tinggi (kurang sensitif) dibandingkan metode HPLC dengan pendekatan *Quality by Design* yang mampu mencapai LOD hingga 0,024 $\mu\text{g/mL}$ untuk kurkumin [1], maupun metode LC-MS/MS yang dilaporkan Kakkar et al. dengan batas kuantitasi bawah (LLOQ) hingga 0,5 ng/mL pada plasma tikus—setara tiga orde besaran lebih sensitif dibanding UV-Vis. Perbandingan ini menegaskan bahwa pemilihan metode sangat bergantung pada konsentrasi analit yang diharapkan pada matriks target: UV-Vis memadai untuk sediaan dengan kadar kurkumin relatif tinggi (bulk, tablet, krim), sementara LC-MS/MS diperlukan pada matriks biologis dengan konsentrasi run rendah akibat metabolisme lintas pertama yang ekstensif [9].

Pada sisi lain, penelitian berbasis sensor elektrokimia seperti yang dilaporkan Zhang et al. (2016) menggunakan elektroda karbon

kaca termodifikasi graphene oxide tereduksi menunjukkan LOD pada rentang mikromolar (0,1 μM), yang secara analitik berada di antara sensitivitas UV-Vis dan LC-MS/MS, namun ditawarkan dengan keunggulan biaya instrumen yang jauh lebih rendah dan waktu analisis yang sangat singkat. Chaisiwamongkhon et al. (2017) memperkuat temuan ini dengan menunjukkan aplikasi praktis sensor berbasis karbon nanotube berdinding banyak untuk kuantifikasi kurkumin langsung dari sampel kunyit riil, mengindikasikan kelayakan sensor elektrokimia sebagai alternatif skrining lapangan tanpa memerlukan preparasi sampel ekstensif. Perbandingan lintas studi semacam ini yang jarang disajikan secara eksplisit dalam ulasan naratif konvensional menjadi salah satu kontribusi utama tinjauan sistematis ini [4].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan *Systematic Literature Review (SLR)* yang disusun mengikuti alur seleksi bertahap (identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi) yang diadaptasi dari kerangka PRISMA, dengan fokus pada sintesis deskriptif-komparatif kualitatif alih-alih meta-analisis kuantitatif, mengingat heterogenitas matriks dan parameter validasi yang dilaporkan pada literatur primer. Sumber data berupa artikel ilmiah

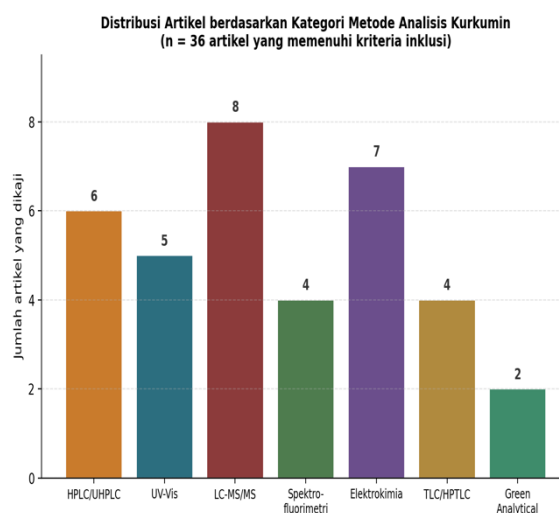
primer yang diperoleh dari basis data Scopus, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar, mencakup artikel penelitian orisinal yang melaporkan pengembangan dan/atau validasi metode analisis kurkumin pada sediaan farmasi maupun bahan alam yang dipublikasikan pada rentang tahun 2015–2025.

Penelusuran dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci "curcumin" AND "analytical method"; "curcumin" AND ("HPLC" OR "UV-Vis" OR "LC-MS/MS" OR "electrochemical sensor" OR "HPTLC" OR "spectrofluorimetric"); serta "curcumin" AND "validation" AND "ICH". Kriteria inklusi meliputi: (a) artikel primer berbahasa Inggris, (b) melaporkan pengembangan atau validasi metode analisis kurkumin/kurkuminoid pada matriks farmasi atau bahan alam, dan (c) melaporkan sekurang-kurangnya satu parameter validasi ICH. Kriteria eksklusi meliputi artikel ulasan tanpa data validasi primer, prosiding tanpa data lengkap, serta artikel yang menggunakan kurkumin semata-mata sebagai reagen pendukung tanpa data analisis kurkumin itu sendiri. Proses penyaringan menghasilkan 36 artikel yang memenuhi kriteria inklusi untuk dianalisis lebih lanjut

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Umum Artikel yang Dikaji

Dari 36 artikel yang memenuhi kriteria inklusi, distribusi metode analisis yang dilaporkan tidak merata antar-kategori. Gambar 1 menunjukkan bahwa LC-MS/MS merupakan kategori dengan jumlah artikel terbanyak (8 artikel), diikuti oleh sensor elektrokimia (7 artikel), HPLC/UHPLC (6 artikel), UV-Vis (5 artikel), spektrofluorimetri dan HPTLC (masing-masing 4 artikel), serta pendekatan *Green Analytical Chemistry* sebagai kategori yang baru muncul (2 artikel) [1,2].



Gambar 1. Distribusi Artikel berdasarkan Kategori Metode Analisis Kurkumin yang Dikaji dalam Tinjauan Ini

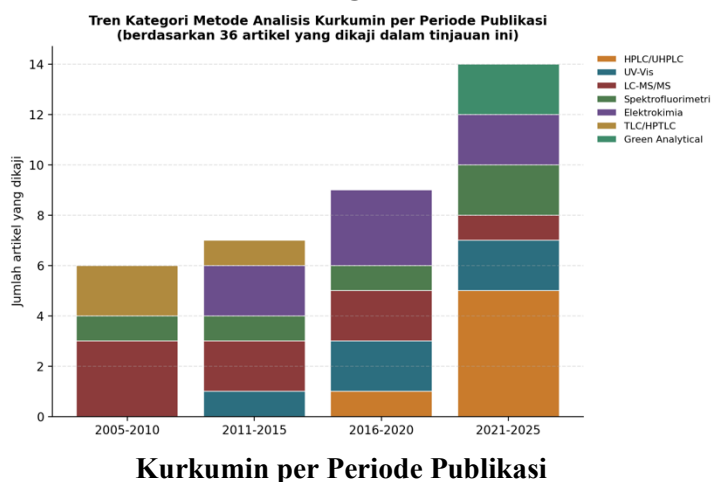
Dominasi LC-MS/MS mencerminkan tingginya kebutuhan analisis kurkumin pada matriks biologis kompleks (plasma, jaringan otak, urin) dalam konteks studi farmakokinetik dan bioavailabilitas, mengingat kurkumin dan metabolitnya (kurkumin glukuronida, kurkumin sulfat, tetrahidrokurkumin) hadir pada konsentrasi yang sangat rendah pascapemberian oral [7].

2. Tren Perkembangan Metode Analisis Kurkumin (2005–2025)

Gambar 2 menyajikan distribusi kategori metode pada empat periode publikasi. Pada periode 2005–2010, penelitian didominasi oleh LC-MS/MS untuk studi farmakokinetik awal serta HPTLC/TLC untuk karakterisasi ekstrak. Memasuki periode 2011–2015, sensor elektrokimia mulai muncul sebagai kategori baru seiring berkembangnya nanomaterial pemodifikasi elektroda seperti karbon nanotube dan graphene oxide. Pada periode 2016–2020 terjadi peningkatan lebih lanjut pada sensor elektrokimia dan mulai bermunculan aplikasi UV-Vis pada sistem nanopartikel lipid. Periode 2021–2025 menunjukkan pergeseran paling mencolok, ditandai lonjakan publikasi HPLC/UHPLC berbasis pendekatan *Quality by Design* dan fingerprint kromatografi untuk standardisasi bahan alam, serta kemunculan eksplisit kategori *Green Analytical*

Chemistry yang mengevaluasi keramahan lingkungan metode menggunakan indeks seperti *Analytical Eco-Scale*, *Green Analytical Procedure Index (GAPI)*, dan AGREE [5].

Gambar 2. Tren Kategori Metode Analisis



Pola ini konsisten dengan pergeseran paradigma analisis farmasi secara umum menuju metode yang lebih cepat, sensitif, hemat pelarut, dan efisien, sebagaimana ditegaskan pula dalam ulasan sistematis metode analisis flavonoid pada bahan alam yang turut mendokumentasikan transisi serupa dari kromatografi konvensional ke pendekatan modern dan hijau [3].

3. Perbandingan Karakteristik Validasi Berdasarkan Parameter ICH Q2(R2)

Tabel 1 merangkum karakteristik validasi representatif dari sembilan studi lintas kategori metode. Perbandingan ini menunjukkan rentang sensitivitas yang sangat lebar—dari orde $\mu\text{g/mL}$ pada UV-Vis

hingga orde ng/mL pada LC-MS/MS dan spektrofotometri—yang mengindikasikan bahwa "metode terbaik" bersifat kontekstual, bergantung pada konsentrasi analit yang diharapkan pada matriks target [6].

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa metode HPLC berbasis *Quality by Design* (Ahmed, 2023) mencapai koefisien

korelasi $R^2 \geq 0,999$ dengan akurasi 98,76–99,89%, menegaskan keandalannya sebagai metode acuan kompendial. Di sisi lain, metode LC-MS/MS dan spektrofotometri unggul pada sensitivitas absolut, dengan LLOQ pada rentang sub-nanogram per mililiter, menjadikannya metode pilihan untuk studi farmakokinetik dan bioanalisis kadar rendah [1].

Tabel 1. Perbandingan Parameter Validasi Metode Analisis Kurkumin Berdasarkan ICH Q2(R2)

Metode	Studi Rujukan (Matriks)	Panjang Gelombang / Transisi	Rentang Linier	LOD	LOQ	Akurasi (% Perolehan Kembali)
UV-Vis	Pharmacophore, 2020 (bulk & sediaan)	429 nm	2–10 µg/mL	0,861 µg/mL	2,872 µg/mL	99,79–100,27
UV-Vis (nano)	Peneliti nanoformulasi, 2015 (nanopartikel)	421 nm	5–25 µg/mL	0,4 µg/mL	1,21 µg/mL	sesuai batas
HPLC (QbD)	Ahmed, 2023 (ekstrak, tablet, kapsul)	385 nm	$R^2 \geq 0,999$	0,024 µg/mL	0,075 µg/mL	98,76–99,89
HPTLC	Studi variabilitas geografis, 2012 (formulasi polyherbal)	404 nm (densitometri)	80–450 ng/spot	18,31 ng/spot	40,50 ng/spot	-
Spektrofotometri	Sravani et al., 2022 (SLN, kitosan-NP)	Eks/Em (96-well plate)	15–3.900 ng/mL	7 ng/mL	15 ng/mL	-
Spektrofotometri	Karimi et al., 2020 (nanoliposom & plasma)	423/527 nm	0,05–0,5 µg/mL	0,03 µg/mL	0,10 µg/mL	-
LC-MS/MS	Kakkar et al., 2010 (plasma tikus)	m/z 369>285 (MRM)	linier s.d. ± 500 ng/mL	LLOQ 0,5 ng/mL	-	-
Elektrokimia (DPV)	Zhang et al., 2016 (ERGO/GCE)	puncak voltametrik	0,2–60 µM	0,1 µM	-	-
Elektrokimia (AdsSV)	Chaisiwamongkhon et al., 2017 (turmeric)	puncak voltametrik	2–100 µM	0,45 µM	1,49 µM	-

4. Kelebihan dan Keterbatasan Setiap Metode Analisis

Tabel 2 merangkum prinsip dasar, kelebihan, dan keterbatasan masing-masing kategori metode berdasarkan sintesis artikel yang dikaji. Sintesis ini menegaskan bahwa

tidak ada satu metode yang unggul pada seluruh aspek analitik; setiap metode memiliki posisi optimalnya masing-masing bergantung pada tujuan analisis, karakteristik matriks, dan sumber daya laboratorium yang tersedia [4,5].

Tabel 2. Kelebihan dan Keterbatasan Metode Analisis Kurkumin

Metode	Prinsip Dasar	Kelebihan	Keterbatasan
UV-Vis Spektrofotometri	Serapan cahaya tampak pada λ 420–430 nm oleh gugus kromofor kurkumin	Sederhana, murah, cepat, instrumen umum tersedia di laboratorium QC	Selektivitas rendah; rentan interferensi demetoksikurkumin/bisdemetoksikurkumin dan matriks berwarna
HPLC/UHPLC	Pemisahan fase terbalik dengan deteksi UV/DAD pada 260–430 nm	Selektivitas dan presisi tinggi; mampu memisahkan tiga kurkuminoid sekaligus; menjadi rujukan kompendial	Mebutuhkan pelarut organik dalam jumlah relatif banyak; waktu analisis dan biaya operasional lebih tinggi
HPTLC	Pemisahan pada lempeng silika dengan deteksi densitometri	Preparasi sampel minimal, throughput tinggi untuk skrining banyak sampel/ekstrak	Presisi lebih rendah dibanding HPLC; sensitivitas terbatas pada rentang ng/spot
Spektrofluorimetri	Emisi fluoresensi intrinsik kurkumin pada eksitasi 420–423 nm	Sensitivitas tinggi (ng/mL), preparasi sederhana, dapat format 96-well untuk throughput tinggi	Rentan quenching oleh matriks biologis dan overlap emisi dengan senyawa lain (mis. doksorubisin)
LC-MS/MS	Pemisahan kromatografi digabung deteksi massa tandem mode MRM	Sensitivitas dan spesifisitas tertinggi (rentang ng/mL–pg); ideal untuk matriks biologis kompleks	Instrumen dan biaya operasional tinggi; memerlukan keahlian teknis khusus
Sensor Elektrokimia	Reaksi oksidasi-reduksi gugus fenolik kurkumin pada elektroda termodifikasi	Portabel, murah, respons cepat, minim pelarut, sesuai prinsip Green Analytical Chemistry	Reprodusibilitas antar-elektroda masih menjadi tantangan; belum banyak diadopsi kompendial resmi

5. Pergeseran Menuju Teknologi Analisis Modern dan Green Analytical Chemistry

Tinjauan terhadap artikel-artikel terbaru (2021–2025) menunjukkan tiga arah pergeseran teknologi analisis kurkumin yang jelas. Pertama, pergeseran dari HPLC konvensional menuju UHPLC dan pendekatan Quality by Design yang memungkinkan optimasi multiparameter secara simultan dengan waktu analisis lebih singkat dan konsumsi pelarut lebih rendah [1]. Kedua, integrasi deteksi spektrometri massa tandem yang semakin banyak diaplikasikan tidak hanya untuk kuantifikasi kurkumin tunggal, tetapi juga profil metabolitnya secara simultan dalam satu analisis, sebagaimana ditunjukkan pada studi klinis fase II (metode LC-MS/MS untuk kurkumin, kurkumin glukuronida, dan kurkumin sulfat) [10].

Ketiga, dan yang paling menonjol, adalah tren eksplisit menuju Green Analytical Chemistry, ditandai oleh penggunaan kurkumin itu sendiri sebagai reagen alami ramah lingkungan[5], pendekatan spektrofлуorimetri sinkron yang mengeliminasi kebutuhan derivatisasi kimiawi, serta evaluasi jejak lingkungan metode analitik menggunakan indeks Green Analytical Procedure Index (GAPI) dan Analytical Greenness (AGREE) yang mulai menjadi standar pelaporan baru[9].

Sensor elektrokimia turut berkontribusi pada tren ini karena secara inheren meminimalkan penggunaan pelarut organik, menghasilkan limbah kimia yang jauh lebih sedikit dibandingkan kromatografi cair, serta memungkinkan analisis di lapangan tanpa infrastruktur laboratorium yang kompleks [4]. Konvergensi antara kebutuhan sensitivitas

tinggi (didorong oleh LC-MS/MS) dan kebutuhan keberlanjutan lingkungan (didorong oleh Green Analytical Chemistry) menjadi tantangan sekaligus peluang riset ke depan, misalnya melalui pengembangan metode LC-MS/MS mikro yang menggunakan volume pelarut dan sampel minimal, atau sensor elektrokimia dengan sensitivitas setara kromatografi [11,13].

KESIMPULAN

Tinjauan sistematis terhadap 36 artikel menunjukkan bahwa metode analisis kurkumin telah berkembang pesat selama dua dekade terakhir, dari metode konvensional (UV-Vis dan HPTLC) menuju metode modern yang lebih sensitif dan selektif (HPLC/UHPLC, LC-MS/MS) serta metode alternatif yang cepat dan ramah lingkungan (sensor elektrokimia dan spektrofлуorimetri). LC-MS/MS dan sensor elektrokimia merupakan kategori yang paling banyak dilaporkan dalam literatur yang dikaji, mencerminkan kebutuhan analisis pada matriks biologis kompleks dan tuntutan efisiensi analisis. Karakteristik validasi berdasarkan parameter ICH Q2(R2) menunjukkan variasi sensitivitas yang sangat lebar antar-kategori metode, dengan LC-MS/MS dan spektrofлуorimetri mencapai batas kuantitasi pada orde nanogram per mililiter, sedangkan UV-Vis dan sensor elektrokimia berada pada orde mikrogram hingga mikromolar. Setiap metode memiliki kelebihan dan keterbatasan spesifik yang menjadikan pemilihannya bersifat kontekstual terhadap tujuan analisis. Tren perkembangan metode analisis kurkumin secara jelas mengarah pada teknologi yang lebih cepat, sensitif, hemat pelarut, dan

efisien, sejalan dengan prinsip Green Analytical Chemistry yang mulai diterapkan secara eksplisit pada publikasi 2021–2025. Berdasarkan temuan tersebut, rekomendasi pemilihan metode disusun sebagai berikut: HPLC/UHPLC untuk kontrol mutu sediaan farmasi rutin, HPTLC untuk standardisasi bahan alam, LC-MS/MS untuk analisis biologis dan farmakokinetik, serta sensor elektrokimia dan spektrofotometri untuk skrining cepat dan aplikasi berbasis kimia hijau. Penelitian mendatang disarankan untuk mengembangkan metode hibrida yang menggabungkan sensitivitas tinggi kromatografi-spektrometri massa dengan kesederhanaan dan keberlanjutan lingkungan dari sensor elektrokimia.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ahmed, A. M. (2023). Analytical purity determinations of universal food-spice *Curcuma longa* through a QbD validated HPLC approach with critical parametric predictors and operable-design's Monte Carlo simulations: Analysis of extracts, forced-degradants, and capsules and tablets-based pharmaceutical dosage forms. *Foods*, 12(5), 1010. <https://doi.org/10.3390/foods12051010>
2. Alves, R. C., Perosa Fernandes, R., Fonseca-Santos, B., & Damiani Victorelli, F. C. M. (2019). A critical review of the properties and analytical methods for the determination of curcumin in biological and pharmaceutical matrices. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 49(2), 138–149. <https://doi.org/10.1080/10408347.2018.1489216>
3. Carvalho, D., Pinho, C., Oliveira, R., Moreira, F., & Oliveira, A. I. (2023). Chromatographic methods developed for the quantification of quercetin extracted from natural sources: Systematic review of published studies from 2018 to 2022. *Molecules*, 28(23), 7714. <https://doi.org/10.3390/molecules28237714>
4. Chaisiwamongkhon, K., et al. (2017). Multiwalled carbon nanotube modified electrodes for the adsorptive stripping voltammetric determination and quantification of curcumin in turmeric. *Electroanalysis*, 29(3), 1–8. <https://doi.org/10.1002/elan.201600670>
5. Dangi, N. B., et al. (2025). Development and validation of a green analytical method for calcium determination in pharmaceuticals using curcumin: A sustainable approach. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2025, Article 6832626. <https://doi.org/10.1155/ianc/6832626>
6. Do Chau Minh Vinh, T., Nguyen Thanh, S., Nguyen Thanh, N., Le Kim, T., Huynh Huynh Anh, T., Le Thi Truc, G., & Nguyen Thi Hong, M. (2024). Chemical fingerprint analysis for quality assessment and control of *Curcuma longa* L. rhizomes from Vietnam using a high-performance liquid chromatography-diode array detector (HPLC-DAD). *Pharmacia*, 71, 1–9. <https://doi.org/10.3897/pharmacia.71.e124050>
7. El Sharkasy, M. E., Aboshabana, R., Belal, F., Walash, M., & Tolba, M. M. (2024). Investigation of green synchronous spectrofluorimetric approach for facile sensitive estimation of two co-administered anti-cancer drugs; curcumin and doxorubicin in their laboratory-prepared mixtures, human plasma, and urine. *BMC Chemistry*, 18, 172. <https://doi.org/10.1186/s13065-024-01272-6>

8. International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use. (2023). ICH harmonised guideline: Validation of analytical procedures Q2(R2). https://www.ema.europa.eu/en/documents/scientific-guideline/ich-q2r2-guideline-validation-analytical-procedures-step-5-revision-2_en.pdf
9. Kakkar, V., Singh, S., Singla, D., Sahwney, S., Chauhan, A. S., Singh, G., & Kaur, I. P. (2010). Pharmacokinetic applicability of a validated liquid chromatography tandem mass spectroscopy method for orally administered curcumin loaded solid lipid nanoparticles to rats. *Journal of Chromatography B*, 878(32), 3427–3431. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2010.10.017>
10. Karimi, M., Mashreghi, M., Shokooh Saremi, S., & Jaafari, M. R. (2020). Spectrofluorometric method development and validation for the determination of curcumin in nanoliposomes and plasma. *Journal of Fluorescence*, 30(5), 1113–1119. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02574-3>
11. Kotha, R. R., & Luthria, D. L. (2019). Curcumin: Biological, pharmaceutical, nutraceutical, and analytical aspects. *Molecules*, 24(16), 2930. <https://doi.org/10.3390/molecules24162930>
12. Paramasivam, M., et al. (2009). High-performance thin layer chromatographic method for quantitative determination of curcuminoids in *Curcuma longa* germplasm. *Food Chemistry*, 113(2), 640–644. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.089>
13. Sravani, A. B., Mathew, E. M., Ghate, V., & Lewis, S. A. (2022). A sensitive spectrofluorimetric method for curcumin analysis. *Journal of Fluorescence*, 32(4), 1517–1527. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-02947-w>
14. Zhang, J., et al. (2016). Electrochemical behavior and voltammetric determination of curcumin at electrochemically reduced graphene oxide modified glassy carbon electrode. *Electroanalysis*, 28(5), 1078–1085. <https://doi.org/10.1002/elan.201500494>