

Tinjauan Naratif

Optimalisasi *Microwave-Assisted* dan *Ultrasonic-Assisted Extraction* untuk Ekstraksi Kurkumin dan Xanthorrhizol Berbasis *Green pharmacy*

NGR Komang Satria Wibawa Asta^{1*}, Ni Kadek Dwi Febriani², Ni Kadek Ernawati³, Nur Latifa Az-Zahra⁴, Jessica Hung Maamea⁵

¹Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, satriawibawa05@gmail.com

²Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, kdkdwifebriani@gmail.com

³Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, ernaaakd07.journey@gmail.com

⁴Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, nurlatifaa03@gmail.com

⁵Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, chihungmaamea@gmail.com

* Penulis Korespondensi

Abstrak— Peningkatan kebutuhan terhadap produk farmasi berbasis bahan alam mendorong pengembangan metode ekstraksi yang efisien, selektif, dan berkelanjutan. Kajian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi dan keunggulan dua metode modern, yaitu *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) dalam mengekstraksi senyawa bioaktif kurkumin dan xanthorrhizol dari tanaman obat. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur terhadap sejumlah publikasi nasional dan internasional terindeks, dengan fokus pada aspek rendemen, efisiensi energi, konsumsi pelarut, stabilitas senyawa, dan potensi aplikasinya dalam konteks *green pharmacy*. Hasil kajian menunjukkan bahwa MAE unggul dalam waktu ekstraksi yang lebih singkat dan hasil rendemen yang tinggi, terutama untuk kurkumin, tetapi memerlukan pengendalian suhu secara ketat. UAE lebih efektif dalam menjaga stabilitas senyawa termolabil seperti xanthorrhizol serta memungkinkan penggunaan pelarut alami berbasis *natural deep eutectic solvents* yang lebih ramah lingkungan. MAE dinilai lebih siap diterapkan dalam skala industri, sementara UAE menawarkan keunggulan dari sisi keberlanjutan proses dan efisiensi limbah. Simpulan dari kajian ini menunjukkan bahwa pemilihan metode dan pelarut yang tepat berperan penting dalam menunjang keberhasilan ekstraksi senyawa aktif secara optimal. Implikasi dari hasil ini memberikan arah strategis dalam penerapan teknologi ekstraksi berbasis *green pharmacy* untuk pengembangan produk farmasi alami yang efektif dan berkelanjutan.

KATA KUNCI: *Green extraction*, Kurkumin, *Microwave-Assisted Extraction* (MAE), *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE), Xanthorrhizol

1. PENDAHULUAN

Proses ekstraksi senyawa aktif dari tanaman obat merupakan tahap penting dalam pengembangan produk farmasi, pangan fungsional, dan kosmetik berbasis bahan alam. Kualitas dan efisiensi ekstraksi menentukan kemurnian, efektivitas, dan stabilitas produk akhir (Maklaud Islam *et al.*, 2023). Senyawa bioaktif kurkumin dan xanthorrhizol merupakan dua komponen utama yang telah banyak diteliti karena aktivitas farmakologisnya yang luas, seperti antioksidan, antiinflamasi, antimikroba, dan antikanker. Ketersediaan senyawa ini dalam jaringan tanaman relatif rendah kurkumin hanya mencakup sekitar 2–5% dari berat kering

rimpang kunyit. Selain itu, struktur kimia keduanya yang sensitif terhadap panas serta kelarutan yang terbatas menimbulkan tantangan tersendiri dalam proses ekstraksi konvensional (Sutarsi *et al.*, 2023).

Industri farmasi modern saat ini dihadapkan pada tuntutan tidak hanya menghasilkan produk yang efektif, tetapi juga aman dan ramah lingkungan. Kesadaran global terhadap keberlanjutan mendorong pengembangan konsep *green pharmacy* sebagai pendekatan produksi farmasi yang bertanggung jawab. Pendekatan ini menekankan efisiensi energi, penggunaan pelarut yang aman, dan minimnya limbah kimia pada setiap tahapan produksi. Salah satu penerapannya adalah penggunaan *green extraction* untuk memperoleh senyawa aktif dari tanaman obat (Chemat *et al.*, 2020; Won & Kwon, 2024).

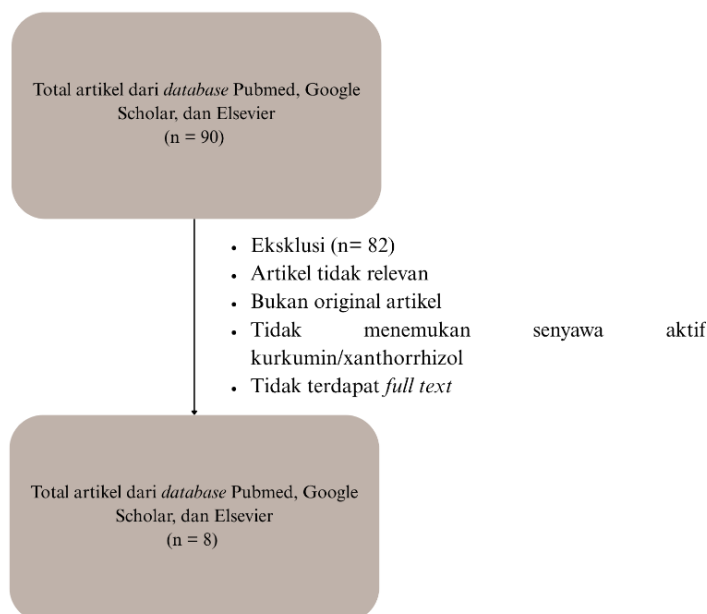
Dua metode ekstraksi modern yang menonjol dalam kerangka *green extraction* adalah *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) (Anaya-Esparza *et al.*, 2023). MAE memanfaatkan gelombang mikro untuk mempercepat pemanasan dan meningkatkan laju difusi senyawa aktif dari matriks tanaman. UAE menggunakan prinsip kavitasi ultrasonik untuk memecah struktur sel tanpa memerlukan suhu tinggi, sehingga sesuai untuk senyawa yang sensitif panas. Keduanya terbukti meningkatkan efisiensi hasil, mengurangi konsumsi pelarut, dan memperpendek waktu ekstraksi dibandingkan metode konvensional (Chemat *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021). Integrasi MAE dan UAE dengan pelarut alami seperti *natural deep eutectic solvents* (NADES) juga menjadi strategi berbasis *green chemistry* yang dapat meningkatkan kualitas hasil ekstraksi sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Tulnisa dkk., 2025).

Berdasarkan penelusuran literatur pada basis data *Scopus*, *ScienceDirect*, dan *PubMed* hingga Agustus 2025, ditemukan sejumlah *review* yang membahas MAE atau UAE secara terpisah, serta beberapa studi eksperimen terkait ekstraksi kurkumin dan xanthorrhizol. Namun, belum ada kajian yang secara langsung dan komprehensif membandingkan kedua metode tersebut dalam konteks *green pharmacy* untuk kedua senyawa tersebut, dengan meninjau parameter efisiensi ekstraksi, konsumsi energi, jenis pelarut, dan dampak lingkungan secara bersamaan. Oleh karena itu, artikel ini menjadi tinjauan pertama yang menyajikan analisis mendalam dan terintegrasi mengenai potensi, keunggulan, dan keterbatasan MAE serta UAE, yang diharapkan dapat menjadi acuan strategis bagi pengembangan teknologi ekstraksi ramah lingkungan di industri farmasi berbasis bahan alam. Artikel ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan memberikan analisis mendalam tentang potensi, keunggulan, dan keterbatasan MAE serta UAE sebagai pendekatan *green extraction* untuk optimalisasi perolehan kurkumin dan xanthorrhizol.

2. METODE

Metode yang digunakan dalam penyusunan artikel ini adalah *literature review* dengan mengumpulkan data-data terkait metode ekstraksi *green pharmacy* yang diuji menggunakan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) beserta kandungan fitokimianya, baik pada jurnal ilmiah internasional maupun jurnal ilmiah nasional. Berdasarkan hasil penelusuran literatur melalui basis data *PubMed*, *Google Scholar*, dan *Elsevier*, diperoleh sebanyak 90 artikel yang berpotensi relevan dengan topik penelitian. Selanjutnya dilakukan proses seleksi berdasarkan kriteria inklusi, yaitu artikel yang relevan dengan topik ekstraksi *green pharmacy* menggunakan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE)

atau *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE), memuat data senyawa aktif kurkumin atau xanthorrhizol, merupakan artikel original, dan tersedia *full text*. Artikel yang tidak memenuhi kriteria tersebut, seperti artikel yang tidak relevan, bukan artikel original, tidak memuat data senyawa aktif yang diteliti, atau tidak tersedia *full text*, dikeluarkan dari analisis. Proses ini menghasilkan 8 artikel yang digunakan dalam pembahasan lebih lanjut, terdiri dari 5 jurnal internasional terindeks Scopus Q1, 1 jurnal internasional terindeks Scopus Q2, 1 jurnal nasional terakreditasi SINTA 3, dan 1 jurnal nasional relevan lainnya. Proses seleksi literatur tersebut divisualisasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Seleksi Literatur Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan pada artikel ini akan membahas terkait efektivitas metode *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) dalam mengekstraksi senyawa kurkumin dan xanthorrhizol serta implikasinya terhadap pendekatan *green pharmacy*.

3.1. *Microwave Assisted Extraction* (MAE)

Metode ekstraksi dengan bantuan gelombang mikro (*microwave-assisted extraction* atau MAE) merupakan metode baru yang telah mendapat perhatian dalam pengembangan teknik isolasi senyawa aktif. Metode ini memiliki keunggulan dibandingkan metode ekstraksi konvensional karena adanya perpindahan molekul yang melibatkan energi gelombang mikro. Metode MAE mampu menghasilkan rendemen ekstraksi secara cepat karena energi gelombang mikro memicu pergerakan molekul melalui migrasi ion dan rotasi dipol. Pergerakan molekul yang sangat cepat menimbulkan gesekan kemudian menghasilkan energi panas di dalam bahan. Energi panas tersebut menyebabkan dinding sel atau jaringan mengalami kerusakan sehingga zat terlarut dapat dilepaskan (Putra dan Dewi, 2024).

3.2. *Ultrasound Assisted Extraction (UAE)*

Metode ekstraksi bantuan gelombang *ultrasonik* (*ultrasound-assisted extraction* atau UAE) merupakan teknik modern yang banyak digunakan dalam isolasi senyawa aktif dari bahan alam. Keunggulan metode ini dibandingkan metode konvensional terletak pada pemanfaatan energi gelombang ultrasonik yang menghasilkan fenomena *acoustic cavitation* (Putra dan Dewi, 2024). Gelembung kavitasi yang terbentuk akan tumbuh dan runtuh secara cepat, memicu kondisi ekstrem berupa suhu lokal hingga 5000 K dan tekanan hingga 1000 atm. Kondisi ini menyebabkan dinding sel atau jaringan tanaman mengalami kerusakan, sehingga senyawa bioaktif dapat terlepas ke dalam pelarut. Proses UAE dapat dilakukan pada suhu rendah sehingga cocok untuk mengekstrak senyawa termolabil, dan terbukti mampu meningkatkan rendemen ekstraksi berkat penetrasi pelarut yang lebih baik dan laju perpindahan massa yang lebih cepat (Kumar *et al.*, 2021).

3.3. *Optimalisasi Ekstraksi Kurkumin dan Xanthorrhizol dengan Microwave-Assisted Extraction dan Ultrasonic-Assisted Extraction Berbasis Green pharmacy*

Senyawa fitokimia seperti kurkumin dan xanthorrhizol merupakan senyawa bioaktif yang memiliki aktivitas farmakologis seperti antiinflamasi, antioksidan, antikanker, dan antimikroba (Rahmadansah *et al.*, 2023). Kedua senyawa tersebut menjadi fokus utama dalam pengembangan obat berbasis bahan alam. Konsep *green pharmacy* mendorong penggunaan metode ekstraksi yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk memperoleh senyawa aktif tersebut. Metode ekstraksi *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasonic-Assisted Extraction* (UAE) merupakan dua teknologi modern yang banyak digunakan dalam ekstraksi bahan alam (Azemi *et al.*, 2020). MAE memanfaatkan pemanasan dielektrik untuk mempercepat pelarutan senyawa, sedangkan UAE mengandalkan efek kavitasi untuk memecah jaringan tanaman. Kedua metode ini menawarkan keunggulan berupa efisiensi waktu, penghematan energi, dan potensi penggunaan pelarut ramah lingkungan (Simamora *et al.*, 2024).

Tabel 1 dan 2 menyajikan perbandingan antara MAE dan UAE yang digunakan dalam berbagai studi untuk mengekstraksi kurkumin dan xanthorrhizol. Yaman *et al.* (2025) menggunakan pelarut etanol-air (20–26%) dan menemukan bahwa MAE menghasilkan kurkumin sebesar 16.78 µg/g, sedangkan UAE menghasilkan 17.79 mg/g. Suksaree & Monton (2024) menggunakan *castor oil* sebagai pelarut dalam metode MAE dan mendapatkan kandungan kurkuminoid total sebesar 0.326%. Singh *et al.* (2022) membandingkan tiga metode, yaitu MAE, UAE, dan *traditional decoction extraction* (TDE). Penelitian ini melaporkan bahwa MAE memberikan rendemen tertinggi (326.79 mg/g), diikuti oleh UAE (241.17 mg/g) dan TDE (215.83 mg/g). Hasil ini menunjukkan bahwa MAE memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan metode lainnya.

Tabel 1. Metode MAE dalam Ekstraksi Kurkumin dan Xanthorrhizol

Jurnal	Metode Ekstraksi	Pelarut	Senyawa Target	Rendemen / Kandungan	Waktu dan Energi
Adhiksana <i>et al.</i> , 2024	MAE	Air	Minyak atsiri	0.3201%	1 jam, 180W
Suksaree & Monton, 2024	MAE	Castor oil	Kurkuminoid (CUR, DMC, BDMC)	Total 0.326%	800W, 90 detik

Lanjutan Tabel 1. Metode MAE dalam Ekstraksi Kurkumin dan Xanthorrhizol

Jurnal	Metode Ekstraksi	Pelarut	Senyawa Target	Rendemen / Kandungan	Waktu dan Energi
Singh <i>et al.</i> , 2022	MAE, UAE, TDE	Etanol	Kurkuminoid	MAE > UAE > TDE (326.79 > 241.17 > 215.83 mg/g)	MAE: 3 menit, 800 W; UAE: 15 menit, 250 W; TDE: 6 jam
Septiana dan Wuryatmo, 2022	MAE	Etanol 70–90%	Kurkumin, TPC	184 mg/g kurkumin, 319.5 mg/g TPC	7 menit, 240W
Yaman <i>et al.</i> , 2025	MAE, UAE	Etanol-air (20–26%)	Kurkumin, fenol total	MAE: 16.78 mg/g; UAE 17.79 mg/g	MAE: 100°C, 30 menit; UAE: 600W, 48 menit

Simamora *et al.* (2024) menggunakan kombinasi UAE dengan NADES berbasis glukosa:laktat untuk mengekstraksi xanthorrhizol dan kurkuminoid. Penelitian ini memperoleh hasil yang tinggi yaitu 17.62 mg/g untuk xanthorrhizol dan 6.64 mg/g untuk kurkuminoid. Rosarina *et al.* (2022) juga menggunakan NADES (CHCl₃:laktat) dan menghasilkan kandungan kurkuminoid sebesar 2.06 mg/g dari tanaman *Curcuma xanthorrhiza*. Septiana & Wuryatmo (2022) menerapkan MAE dengan pelarut etanol 70–90% dan memperoleh rendemen tinggi sebesar 184 mg/g untuk kurkumin dan 319.5 mg/g untuk total fenol (TPC). Ariestanti *et al.* (2025) menggunakan NADES (ChCl:malat) dalam metode UAE dan mendapatkan kurkumin sebesar 4.58 µg/g dan xanthorrhizol sebesar 12.93 mg/g. Adhiksana *et al.* (2024) menggunakan MAE dengan air sebagai pelarut dan berhasil mengekstrak minyak atsiri dengan rendemen sebesar 0.3201%.

Perbandingan antara *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) menunjukkan bahwa MAE cenderung memberikan rendemen yang lebih tinggi dalam waktu yang lebih singkat (≤ 7 menit) meskipun memerlukan energi listrik yang lebih besar, yaitu mencapai ≥ 800 W dalam beberapa studi (Septiana & Wuryatmo, 2022; Suksaeree & Monton, 2024). UAE sebaliknya menunjukkan keunggulan dalam fleksibilitas penggunaan pelarut, terutama pelarut alami seperti *natural deep eutectic solvents* (NADES), yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga efektif dalam mengekstraksi senyawa non-polar seperti xanthorrhizol secara selektif (Ariestanti dkk., 2025; Simamora dkk., 2024). Kombinasi metode ekstraksi dan jenis pelarut berperan penting dalam efektivitas dan keberlanjutan proses ekstraksi. MAE dengan pelarut etanol terbukti sangat optimal dalam mengekstraksi senyawa polar seperti kurkumin (Septiana & Wuryatmo, 2022), sementara UAE dengan NADES berbasis gula atau asam organik unggul dalam mengekstraksi senyawa seperti xanthorrhizol dengan efisiensi tinggi dan tetap mengikuti prinsip *green extraction* (Ariestanti dkk., 2025; Simamora dkk., 2024).

Metode ekstraksi yang paling efektif dalam menghasilkan rendemen tertinggi adalah *Microwave-Assisted Extraction* (MAE). Teknik ini mampu menghasilkan kandungan

kurkumin yang jauh lebih tinggi dibandingkan *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE), terutama ketika menggunakan pelarut etanol dengan rasio padatan-pelarut yang tepat serta parameter suhu dan waktu yang terkontrol. MAE menghasilkan rendemen kurkuminoid tertinggi sebesar 326.79 mg/g hanya dalam 3 menit dengan daya 800 watt (Singh *et al.*, 2022). Hasil serupa juga diperoleh dengan kondisi 7 menit dan daya 240 watt menggunakan etanol 90%, yang menghasilkan kandungan kurkumin sebesar 184 mg/g. MAE unggul dari segi efisiensi waktu, dengan durasi ekstraksi yang sangat singkat namun tetap menghasilkan ekstrak berkualitas tinggi (Septiana dan Wuryatmo, 2022).

UAE menunjukkan potensi yang baik terutama untuk senyawa sensitif panas seperti xanthorrhizol. Kandungan xanthorrhizol tertinggi yang dihasilkan UAE dengan pelarut NADES mencapai 17.62 mg/g dalam kondisi suhu rendah dan durasi 20 menit (Simamora *et al.*, 2024). Rendemen UAE untuk kurkumin umumnya lebih rendah, yakni hanya 17.79 mg/g dengan waktu ekstraksi 48 menit dan daya 600 watt (Yaman *et al.*, 2025) bahkan hanya 4.58 mg/g saat menggunakan NADES (Ariestanti *et al.*, 2025). Perbandingan ini menunjukkan bahwa MAE secara konsisten memberikan hasil ekstraksi yang lebih tinggi dengan konsumsi energi dan waktu yang lebih efisien.

Temuan ini semakin menegaskan bahwa metode ekstraksi modern seperti MAE dan UAE memberikan keunggulan yang nyata dibandingkan metode konvensional seperti maserasi dan sokletasi. Dalam penelitian Suharsanti *et al.* (2020), proses maserasi kunyit selama 3 hari hanya menghasilkan kadar kurkumin sebesar 41,11 µg/ml, sedangkan sokletasi selama 1 hari memberikan kadar yang sedikit lebih tinggi yaitu 41,33 µg/ml namun perbedaannya tidak signifikan secara statistik. Demikian pula, Wahyuni *et al.* (2017) menunjukkan bahwa ekstraksi xanthorrhizol dari temulawak menggunakan metode maserasi dan sokletasi menghasilkan rendemen sebesar 168,12 mg/g dan 163,35 mg/g, dengan perbedaan yang tidak mencolok.

Keterbatasan metode konvensional seperti waktu ekstraksi yang panjang, efisiensi pelarut yang rendah, dan ketergantungan terhadap energi termal membuatnya kurang ideal untuk pendekatan ekstraksi berkelanjutan. MAE maupun UAE mampu meningkatkan efisiensi ekstraksi secara signifikan dalam waktu yang jauh lebih singkat dan dengan konsumsi pelarut yang lebih hemat. Hasil dari berbagai studi modern membuktikan bahwa penggunaan pelarut ramah lingkungan seperti NADES dalam UAE atau etanol dalam MAE tidak hanya meningkatkan rendemen, tetapi juga mendukung prinsip-prinsip *green extraction*. Dengan demikian, integrasi teknologi MAE dan UAE dalam ekstraksi senyawa bioaktif seperti kurkumin dan xanthorrhizol merupakan langkah strategis untuk menggantikan metode konvensional yang kurang efisien. Hal ini menjadi penting tidak hanya dalam aspek efisiensi produksi, tetapi juga dalam mendorong pengembangan fitofarmaka yang berkelanjutan dan ramah lingkungan sesuai dengan arah pengembangan *green pharmacy* masa depan.

Mekanisme kerja MAE dan UAE juga memberikan kontribusi terhadap efektivitas ekstraksi senyawa bioaktif. Dalam MAE, gelombang mikro menyebabkan pemanasan langsung dan merata di dalam matriks tanaman melalui pemanasan dielektrik. Proses ini memicu disrupsi dinding sel dan pelepasan senyawa aktif secara cepat, menjadikan metode ini sangat cocok untuk mengekstrak senyawa polar seperti kurkumin dengan minim risiko degradasi termal. Di sisi lain, UAE mengandalkan efek kavitasi, yaitu ledakan mikrogelembung yang menghasilkan tekanan tinggi lokal yang mampu memecah struktur jaringan tanaman. Mekanisme ini memungkinkan ekstraksi senyawa non-polar seperti

xanthorrhizol tanpa memerlukan suhu tinggi, sehingga menjaga stabilitas dan bioaktivitas senyawa yang sensitif terhadap panas (Azemi *et al.*, 2020).

Integrasi pelarut hijau seperti *Natural Deep Eutectic Solvents* (NADES), UAE semakin menunjukkan potensinya dalam mengakomodasi prinsip *green chemistry*, sementara MAE dengan etanol-air sebagai pelarut tetap unggul dalam efisiensi energi dan waktu. Kombinasi antara teknologi modern dan pemilihan pelarut yang berkelanjutan menjadikan MAE dan UAE sebagai solusi ekstraksi masa depan yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga etis dalam konteks pelestarian lingkungan (Rosarina *et al.*, 2022). Upaya pengembangan obat berbasis bahan alam yang efisien, aman, dan ramah lingkungan, MAE dan UAE menjadi metode yang lebih disarankan dibandingkan metode konvensional. Penerapan teknologi ini sejalan dengan tujuan *green pharmacy*, yaitu menghasilkan produk fitofarmaka yang tidak hanya efektif secara terapeutik, tetapi juga selaras dengan keberlanjutan dan tanggung jawab ekologi (Simamora *et al.*, 2024).

Tabel 2. Metode UAE dalam Ekstraksi Kurkumin dan Xanthorrhizol

Jurnal	Metode Ekstraksi	Pelarut	Senyawa Target	Rendemen / Kandungan	Waktu dan Energi
Ariestanti <i>et al.</i> , 2025	UAE + NADES	CHCl:malat (1:1)	Kurkumin, Xanthorrhizol	Kurkumin: 4.58 mg/g; Xanthor: 12.93 mg/g	15 menit
Rosarina <i>et al.</i> , 2022	UAE + NADES	CHCl:laktat (1:1)	Kurkuminoid	<i>Curcuma xanthorrhiza</i> : 2.06 mg/g	1 jam
Simamora <i>et al.</i> , 2024	UAE + NADES	NADES (glukosa:laktat)	Xanthorrhizol, kurkuminoid	Xanthorrhizol: 17.62 mg/g; Kurkuminoid: 6.64 mg/g	20 menit

Tabel 3 menunjukkan bahwa *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) memiliki keunggulan dari sisi efisiensi waktu dan rendemen ekstrak. Proses gelombang mikro meningkatkan penetrasi pelarut dan mempercepat pelepasan senyawa aktif, sehingga dapat digunakan untuk ekstraksi kurkumin dalam skala besar. Pemanasan intensif pada MAE perlu dikendalikan agar tidak merusak senyawa sensitif panas seperti xanthorrhizol (Adhiksana *et al.*, 2024). *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) bekerja melalui kavitas ultrasonik yang menghasilkan efek disrupsi sel tanpa menyebabkan peningkatan suhu yang drastis. Stabilitas senyawa bioaktif lebih terjaga selama proses UAE, yang menjadikan metode ini sesuai untuk bahan dengan kandungan senyawa termolabil seperti xanthorrhizol (Simamora *et al.*, 2024). MAE menggunakan etanol sebagai pelarut utama karena mampu mengekstraksi senyawa polar secara efisien. Pemanfaatan etanol dalam industri tetap memerlukan sistem daur ulang agar tidak berdampak negatif terhadap lingkungan. UAE mendukung penggunaan pelarut alami seperti *Natural Deep Eutectic Solvents* (NADES) yang bersifat biodegradabel dan ramah lingkungan (Simamora *et al.*, 2024). Pelarut NADES menunjukkan kestabilan tinggi dalam UAE karena proses berlangsung pada suhu rendah. MAE dapat mengintegrasikan NADES, namun kestabilannya berkurang pada suhu tinggi yang khas dalam sistem gelombang mikro (Ariestanti *et al.*, 2025).

Jumlah limbah yang dihasilkan MAE relatif rendah jika pelarut didaur ulang secara optimal. Sistem UAE menghasilkan limbah yang sangat minim karena volume pelarut yang digunakan kecil dan bersifat non-toksik (Simamora *et al.*, 2024). Efisiensi limbah yang tinggi dalam UAE memberikan keunggulan dari aspek keberlanjutan proses ekstraksi. Keberlanjutan proses ekstraksi juga ditentukan oleh skalabilitas dan kesiapan metode untuk diterapkan secara luas. MAE telah banyak diterapkan pada skala industri karena dapat diintegrasikan dengan sistem otomatis dan menghasilkan ekstrak dalam waktu singkat (Yaman *et al.*, 2025). Parameter proses pada MAE seperti suhu, waktu, dan daya dapat dikontrol dengan presisi untuk memenuhi standar produksi massal. UAE lebih banyak digunakan di lingkungan akademik dan penelitian universitas karena metode ini sederhana, fleksibel, dan cocok untuk skala laboratorium. Pengembangan teknologi ultrasonik terus ditingkatkan agar UAE dapat diadaptasi pada skala produksi industri. Pemilihan metode ekstraksi sebaiknya disesuaikan dengan karakteristik senyawa target, ketersediaan peralatan, serta tujuan akhir dari formulasi produk berbasis bahan alam (Adhiksana *et al.*, 2024).

Keberhasilan penerapan metode berbasis *green pharmacy* tidak hanya ditentukan oleh efisiensi dan performa ekstraksi, tetapi juga oleh tingkat keamanan lingkungan, adaptabilitas teknologi, dan kompatibilitas metode dengan sistem produksi berkelanjutan. Metode *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) menunjukkan profil yang lebih selaras dengan prinsip *green pharmacy* dibandingkan metode *Microwave-Assisted Extraction* (MAE). Proses UAE beroperasi pada kondisi termodinamika rendah, yang secara langsung mengurangi kebutuhan energi tambahan untuk pendinginan sistem. Karakteristik UAE tersebut juga menurunkan emisi termal dan mengurangi risiko degradasi lingkungan akibat pembuangan panas (Simamora *et al.*, 2024).

Dari sisi teknologi proses, sistem UAE mendukung pengembangan reaktor ultrasonik kontinu (*continuous-flow ultrasonic reactor*) yang sangat potensial untuk produksi bahan alam dalam skala besar tanpa mengorbankan efisiensi energi (Yaman *et al.*, 2025). Reaktor UAE tersebut memungkinkan proses berjalan lebih lama dengan kontrol suhu dan volume pelarut yang presisi. Berbeda dari UAE, sistem MAE cenderung lebih cocok untuk proses *batch* yang terbatas skalabilitasnya, kecuali jika dilengkapi dengan sistem kontrol lanjutan dan perlindungan terhadap fluktuasi suhu (Ariestanti *et al.*, 2025). Secara keseluruhan, metode UAE unggul dalam aspek keamanan ekologi dan keberlanjutan proses karena menghasilkan residu limbah yang minimal. UAE juga memungkinkan penggunaan pelarut biodegradable seperti *Natural Deep Eutectic Solvents* (NADES), serta memberikan potensi minimalisasi jejak karbon (*carbon footprint*) selama proses berlangsung (Simamora *et al.*, 2024). Keunggulan UAE ini menjadi penting karena keberhasilan formulasi produk berbasis bahan alam sangat bergantung pada konservasi sifat bioaktif dan rendahnya residu toksik dalam produk akhir. Berdasarkan keseluruhan aspek tersebut, metode UAE dapat dianggap lebih strategis untuk mendukung pengembangan industri farmasi hijau (*green pharmacy*) (Adhiksana *et al.*, 2024; Simamora *et al.*, 2024).

Tabel 3. Evaluasi Metode MAE dan UAE Berdasarkan Aspek *Green pharmacy* terhadap Kurkumin dan Xanthorrhizol

Senyawa / Metode	Aspek Evaluasi <i>Green pharmacy</i>	<i>Microwave-Assisted Extraction</i>	<i>Ultrasound-Assisted Extraction</i>	Pustaka
Kurkumin	Konsumsi pelarut	Menggunakan etanol 90% v/v dengan rasio padatan:pelarut 1:20 (g/mL). Volume pelarut total yang digunakan dalam skala laboratorium berkisar antara 100–200 mL untuk 5–10 g serbuk rimpang.	Menggunakan etanol 20–26.33% atau NADES (misalnya <i>choline chloride:malic acid</i> 1:1) dengan rasio padatan:pelarut 1:20 hingga 1:25. Volume pelarut 100–150 mL menghasilkan ekstrak efektif.	Septiana & Wuryatmo, 2022; Ariestanti <i>et al.</i> , 2025
	Konsumsi energi	Daya 240 W digunakan selama 7 menit menghasilkan kurkumin hingga 184 mg/g. MAE mengandalkan pemanasan cepat, sehingga energi total yang digunakan lebih rendah meskipun daya besar.	Daya 100–300 W dengan waktu ekstraksi 20–48 menit. Suhu dijaga rendah (35–45 °C) sehingga cocok untuk senyawa termolabil. Konsumsi energi cenderung lebih stabil dan aman.	Septiana & Wuryatmo, 2022
	Stabilitas senyawa	Suhu tinggi dari MAE dapat memicu degradasi kurkumin jika tidak dikontrol dengan baik. Namun, penggunaan waktu singkat mengurangi risiko oksidasi dan memungkinkan hasil murni.	UAE lebih cocok untuk kurkumin karena gelombang ultrasonik tidak menaikkan suhu secara drastis. Ini menjaga struktur kurkumin tetap stabil selama proses.	Adhiksana <i>et al.</i> , 2024
Xanthorrhizol	Pelarut <i>green pharmacy</i>	Etanol 90% dapat digunakan, namun kurang spesifik untuk xanthorrhizol karena sifatnya lebih selektif terhadap senyawa polar. Potensi integrasi NADES belum optimal pada MAE.	NADES (glukosa:laktat, <i>choline chloride:malic acid</i>) terbukti selektif terhadap xanthorrhizol dan menghasilkan aktivitas antimikroba yang	Simamora <i>et al.</i> , 2024

Lanjutan Tabel 3. Evaluasi Metode MAE dan UAE Berdasarkan Aspek *Green pharmacy* terhadap Kurkumin dan Xanthorrhizol

Senyawa / Metode	Aspek Evaluasi <i>Green pharmacy</i>	<i>Microwave-Assisted Extraction</i>	<i>Ultrasound-Assisted Extraction</i>	Pustaka
			lebih tinggi dibandingkan etanol.	
Kurkumin & Xanthorrhizol	Integrasi NADES	MAE dapat menggunakan NADES, namun viskositas pelarut dan sensitivitas terhadap suhu perlu diperhatikan agar tidak menghambat difusi senyawa.	UAE sangat fleksibel dengan NADES, tidak menyebabkan degradasi struktur pelarut dan memberikan hasil ekstraksi optimal.	Adhiksana <i>et al.</i> , 2024; Ariestanti <i>et al.</i> , 2025
	Limbah proses	MAE menghasilkan limbah padat rendah, terutama jika menggunakan pelarut daur ulang seperti etanol. Namun, perlu pengolahan limbah termal.	UAE menggunakan sedikit pelarut dan menghasilkan residu minimal. NADES bersifat biodegradabel dan tidak beracun.	Adhiksana <i>et al.</i> , 2024; Simamora <i>et al.</i> , 2024
	Skalabilitas industri	MAE telah digunakan dalam skala semi-industri untuk produksi ekstrak, terutama di industri suplemen dan pangan.	UAE masih umum di laboratorium dan pilot plant, namun potensial jika dikombinasi dengan pelarut hijau dan sistem berkelanjutan.	Adhiksana <i>et al.</i> , 2024; Ariestanti <i>et al.</i> , 2025
	Prinsip <i>green pharmacy</i>	MAE hemat waktu dan efisien pelarut, namun kontrol suhu dan keamanan pelarut penting untuk menjaga prinsip <i>green pharmacy</i> .	UAE bekerja pada suhu rendah, hemat energi, serta kompatibel dengan pelarut alami dan aman untuk bioaktivitas senyawa.	Septiana & Wuryatmo, 2022; Simamora <i>et al.</i> , 2024

3.4. Pengembangan Produk Farmasi Bebas *Green Pharmacy*

Penerapan *Microwave Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasound Assisted Extraction* (UAE) berpotensi besar mendukung pengembangan produk farmasi berbasis *green pharmacy* karena keduanya selaras dengan prinsip *green extraction*, yakni efisiensi penggunaan energi, pengurangan limbah, dan pemanfaatan pelarut ramah lingkungan (Garcia-Vaquero *et al.*, 2020). Metode MAE unggul dalam menghasilkan rendemen tinggi dalam durasi singkat yakni

≤7 menit serta sesuai untuk ekstraksi senyawa polar seperti kurkumin, sehingga efektif diterapkan pada produksi skala industri dengan pengendalian suhu yang tepat. Metode UAE lebih sesuai untuk senyawa sensitif panas seperti xanthorrhizol, beroperasi pada suhu rendah, dan sangat kompatibel dengan pelarut *Natural Deep Eutectic Solvents* (NADES) yang bersifat biodegradabel (Zia *et al.*, 2022). Integrasi kedua teknik tersebut memungkinkan industri farmasi menghasilkan ekstrak dengan kualitas optimal melalui efisiensi konsumsi pelarut dan energi, pengurangan volume limbah, serta penurunan jejak karbon. Penerapan MAE dan UAE tidak hanya mengoptimalkan proses ekstraksi senyawa bioaktif, tetapi juga memperkuat keberlanjutan lingkungan sehingga menjadi pendekatan strategis dalam formulasi fitofarmaka yang aman, efektif, dan berwawasan lingkungan (Khan & Dashti, 2022).

3.5. Implementasi MAE dan UAE di Skala Industri Farmasi

Penerapan teknologi Microwave-Assisted Extraction (MAE) dan Ultrasound-Assisted Extraction (UAE) di industri farmasi memerlukan perencanaan proses yang matang agar sesuai dengan standar produksi berskala besar (Sahlan *et al.*, 2025). Tahapan alur produksi dimulai dari *raw material handling*, di mana bahan baku nabati dikondisikan melalui pembersihan, pengeringan awal, dan penggilingan untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi (Laina *et al.*, 2024). Selanjutnya, tahap ekstraksi dilakukan dengan MAE atau UAE yang telah diintegrasikan ke dalam lini produksi, baik sebagai *batch system* maupun *continuous flow*, dilanjutkan dengan pemurnian melalui filtrasi, kromatografi, atau metode membran. Tahap berikutnya adalah pengeringan, biasanya menggunakan *spray dryer* atau *vacuum dryer* untuk menjaga stabilitas senyawa aktif, kemudian formulasi menjadi sediaan farmasi sesuai kebutuhan pasar (Sahlan *et al.*, 2025).

Dari sisi regulasi, penerapan MAE/UAE harus memenuhi *Good Manufacturing Practices* (GMP), ICH Q7 untuk *active pharmaceutical ingredients*, serta ketentuan farmakope nasional dan internasional. Peralatan yang digunakan wajib memiliki sertifikasi sesuai standar keamanan industri, dan prosesnya harus divalidasi melalui uji keseragaman hasil, reproduktibilitas, serta stabilitas produk akhir (Xiang and Wu., 2017). Analisis ekonomi menjadi faktor penting dalam adopsi teknologi ini. Meskipun MAE memerlukan investasi awal yang lebih tinggi dibanding UAE, efisiensi waktu dan penghematan pelarut dapat menurunkan biaya operasional jangka panjang (Yusoff *et al.*, 2022). Perhitungan *cost* per kilogram *extract* bergantung pada harga bahan baku, konsumsi energi (yang pada MAE bisa 30–40% lebih rendah dibanding metode konvensional), serta kapasitas alat (Sahlan *et al.*, 2025). Manajemen risiko dan keselamatan proses juga perlu diperhatikan. MAE berisiko menimbulkan degradasi termal pada senyawa sensitif jika kontrol suhu tidak presisi, sementara UAE memerlukan mitigasi terhadap potensi paparan ultrasonik pada operator (Prandi *et al.*, 2022). Selain itu, risiko kebocoran pelarut, pembentukan titik panas (*hot spot*), dan penumpukan tekanan harus diantisipasi melalui desain peralatan dan SOP yang ketat (Yusoff *et al.*, 2022).

Penerapan teknik ekstraksi modern yang memadukan gelombang mikro, ultrasonik, dan pelarut hijau seperti *Natural Deep Eutectic Solvents* (NADES) menghasilkan dampak positif nyata bagi konsep *green pharmacy*, antara lain peningkatan rendemen ekstraksi sekaligus pengurangan konsumsi pelarut berbahaya sehingga menurunkan beban limbah kimia dan jejak karbon industri. *Microwave Assisted Extraction* (MAE) dan *Ultrasound Assisted Extraction* (UAE) yang dikombinasikan dengan NADES melaporkan perolehan kurkumin tinggi dengan penggunaan pelarut yang jauh lebih sedikit, sehingga metode tersebut lebih lestari dan layak

diterapkan pada skala produksi (Sahlan *et al.*, 2025). Selain itu, penggunaan pelarut berbasis NADES dalam ekstraksi ultrasonik terbukti dapat diproses ulang dan bersifat biodegradable, sehingga mengurangi toksisitas residu pada produk akhir serta mempermudah pengelolaan limbah farmasi (Wu *et al.*, 2025). Optimasi dan pemodelan proses MAE/UAE turut memperlihatkan bahwa kombinasi parameter yang tepat (daya, waktu, rasio padat-pelarut) memungkinkan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional, sehingga mendukung tujuan penghematan energi dalam rantai produksi farmasi (Yaman *et al.*, 2025).

4. KESIMPULAN

Microwave-Assisted Extraction (MAE) dan *Ultrasound-Assisted Extraction* (UAE) terbukti efektif untuk ekstraksi kurkumin dan xanthorrhizol dengan mempertimbangkan efisiensi, stabilitas senyawa, energi, dan jenis pelarut. MAE unggul dalam kecepatan dan rendemen, sedangkan UAE lebih baik untuk senyawa termolabil dan pelarut alami seperti NADES. Temuan ini mendukung pengembangan teknologi ekstraksi berkelanjutan dalam praktik *green pharmacy*. Penelitian lanjutan perlu mengeksplorasi kombinasi metode dan optimalisasi formulasi untuk skala industri.

SARAN

Keterbatasan kajian terletak pada data sekunder tanpa uji laboratorium sehingga temuan bersifat teoritis. Keunggulannya ada pada analisis dua metode ekstraksi berbasis *green pharmacy*. Penelitian selanjutnya perlu menguji kombinasi metode dan pelarut alami secara eksperimental untuk meningkatkan akurasi dan keberlanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhiksana, A., Linthin, A. P., Wahyudi, Rahayu, I. E., Nadir, M., Irwan, M., dan Thahir, R. (2024). Ekstraksi minyak atsiri lengkuas merah (*Alpinia purpurata*) berbantuan gelombang mikro: pengaruh perbandingan bahan dan pelarut. *Jurnal Teknik Kimia*, 18(2): 122-126. https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v18i2.4419
- Anaya-Esparza, L.M., Aurora-Vigo, E.F., Villagrán, Z., Rodríguez-Lafitte, E., Ruvalcaba-Gómez, J.M., Solano-Cornejo, M.Á., Zamora-Gasga, V.M., Montalvo-González, E., Gómez-Rodríguez, H. & Aceves-Aldrete, C.E. (2023). Design of experiments for optimizing Ultrasound-Assisted Extraction of bioactive compounds from plant-based sources. *Molecules*, 28(23): 7752. <https://doi.org/10.3390/molecules28237752>
- Ariestanti, D. M., Mun'im, A., Hartrianti, P., Nadia, B., Chriscensia, E., Rattu, S. A., Fadhila, R., Harianto, A., Simamora, A., Ramadon, D., James, R. J., Saputri, F. C., Kato, M., & Puteri, M. U. (2025). Ultrasonic-assisted extraction (UAE) of Javanese turmeric rhizomes using natural deep eutectic solvents (NADES): Screening, optimization, and in vitro cytotoxicity evaluation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 107271. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107271>
- Azemi, A., Puziah, H., & Salleh, L. M. (2020). A review on application of microwave and ultrasound-assisted extraction in curcumin production. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 16(2): 146–155. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v16n2.1790>

- Azemi, N., Basar, N., & Toemen, S. (2020). A ultrasound-assisted extraction (UAE) of phytochemicals with response surface methodology (RSM) in *Curcuma xanthorrhiza*. *Science Proceedings Series*, 2(2): 139-146. <http://dx.doi.org/10.31580/sps.v2i2.1431>
- Chemat, F., Abert-Vian, M., Fabiano-Tixier, A., Nutrizia, M., Jambrak, A. R., Munekata, P. E. S., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Binello, A., & Cravotto, G. (2020). A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. *Green Chemistry*, 22, pp.2325–2353. <https://doi.org/10.1039/C9GC03878G>
- Garcia-Vaquero, M., Ummat, V., Tiwari, B., & Rajauria, G. (2020). Exploring ultrasound, microwave and ultrasound–microwave assisted extraction technologies to increase the extraction of bioactive compounds and antioxidants from brown macroalgae. *Marine Drugs*, 18(3), 172. <https://doi.org/10.3390/md18030172>
- Khan, M. S. S., & Dashti, M. G. (2023). Optimizing extraction techniques for maximized bioactive compound yield in medicinal herbs. *Advances in Herbal Research*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.25163/ahi.6121072>
- Kumar, K., Srivastav, S. & Sharanagat, V.S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>
- Kumar, K., Srivastava, S., & Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>
- Laina, K. T., Drosou, C., Stergiopoulos, C., Eleni, P. M., & Krokida, M. (2024). Optimization of Combined Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction for Enhanced Bioactive Compounds Recovery from Four Medicinal Plants: Oregano, Rosemary, Hypericum, and Chamomile. *Molecules*, 29(23): 5773. <https://doi.org/10.3390/molecules29235773>
- Makdud Islam, S., Malakar, S., Rao, M. V., Kumar, N., & Sahu, J. K. (2023). Recent advancement in ultrasound-assisted novel technologies for the extraction of bioactive compounds from herbal plants: a review. *Food Science and Biotechnology*, 32(13): 1763–1782. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01346-6>
- Prandi, B., Di Massimo, M., Tedeschi, T., Rodríguez-Turienzo, L., & Rodríguez, Ó. (2022). Ultrasound and microwave-assisted extraction of proteins from coffee green beans: Effects of process variables on the protein integrity. *Food and Bioprocess Technology*, 15(12): 2712-2722. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02907-z>
- Rahmadansah, R., Rahayu, D. S., Raisyadikara, F., Priosoeryanto, B. P., & Nurcholis, W. (2023). Meta-analysis on extraction methods, pharmacological activities, and cultivation techniques of *Curcuma xanthorrhiza* Roxb. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 51(2): 163-172. <https://doi.org/10.24831/ija.v51i2.44657>
- Rosarina, D., Narawangsa, D. R., Chandra, N. S. R., Sari, E., & Hermansyah, H. (2022). Optimization of ultrasonic assisted extraction (UAE) method using natural deep eutectic solvent (NADES) to increase curcuminoid yield from *Curcuma longa* L.,

- Curcuma xanthorrhiza*, and *Curcuma mangga* Val. *Molecules*, 27(18): 6080. <https://doi.org/10.3390/molecules27186080>
- Rosarina, D., Narawangsa, D. R., Chandra, N. S. R., Sari, E., & Hermansyah, H. (2022). Optimization of ultrasonic assisted extraction (UAE) method using natural deep eutectic solvent (NADES) to increase curcuminoid yield from *Curcuma longa* L., *Curcuma xanthorrhiza*, and *Curcuma mangga* Val. *Molecules*, 27(18): 6080. <https://doi.org/10.3390/molecules27186080>
- Sahlan, M., Rosarina, D., Ratna Suminar, H. F., Diatama Pohan, Y., Hidayatullah, I. M., Narawangsa, D. R., Putri, D. N., Sari, E., Perdani, M. S., Wibowo, Y. G., & Hermansyah, H. (2025). Microwave–ultrasound-assisted extraction coupled with natural deep eutectic solvent enables high-yield, low-solvent recovery of curcumin from *Curcuma longa* L. *Pharmaceutics*, 17(7): 818. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17070818>
- Septiana, A., & Wuryatmo, E. (2022). Effect of ethanol concentration and extraction time with microwave assisted extraction on antioxidant activity of temulawak-extract (*Curcuma xanthorrhiza* Roxb). *Journal of Functional Food and Nutraceutical*, 3(2): 63–69. <https://doi.org/10.33555/jffn.v3i2.86>
- Simamora, A., Timotius, K. H., Setiawan, H., Saputri, F. A., Putri, C. R., Aryani, D., Ningrum, R. A., & Mun'im, A. (2024). Ultrasonic-assisted extraction of xanthorrhizol from *Curcuma xanthorrhiza* Roxb. Rhizomes by natural deep eutectic solvents: Optimization, antioxidant activity, and toxicity profiles. *Molecules*, 29(9): 2093. <https://doi.org/10.3390/molecules29092093>
- Simamora, D., Yuliani, S. H., & Suhendi, A. (2024). Green extraction of curcuminoids and xanthorrhizol using NADES via ultrasound-assisted extraction for herbal drug development. *Indonesian Journal of Pharmacy*, 35(1): 34–42. <https://doi.org/10.22146/ijp.84220>
- Singh, K., Srichairatanakool, S., Chewonarin, T., Prommaban, A., Samakradhamrongthai, R. S., Brennan, M. A., & Utama-Ang, N. (2022). Impact of green extraction on curcuminoid content, antioxidant activities and anti-cancer efficiency (in vitro) from turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.). *Foods*, 11(22): 3633. <https://doi.org/10.3390/foods11223633>
- Suharsanti, R., Astutiningsih, C., & Susilowati, N. D. (2020). Kadar kurkumin ekstrak rimpang kunyit (*Curcuma domestica*) secara KLT densitometri dengan perbedaan metode ekstraksi. *Jurnal Wiyata*, 7(2): 85–93. <https://publikasiilmiah.unwahas.ac.id/index.php/Farmasi/article/view/146>
- Suksaeree, J., & Monton, C. (2024). Maximizing Curcuminoid Extraction from *Curcuma aromatica* Salisb. Rhizomes via environmentally friendly microwave-assisted extraction technique using full factorial design. *International Journal of Food Science*, 1(1): 4566123. <https://doi.org/10.1155/2024/4566123>
- Sutarsi, P.T.J., Wiradiestia, D., Altway, A., Winardi, S., Wahyudiono & Machmudah, S. (2023). Extraction process optimization of curcumin from *Curcuma xanthorrhiza* Roxb. with supercritical carbon dioxide using ethanol as a cosolvent. *ACS Omega*, 9(1): 1251–1264. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07497>

- Tulnisa, H., Ahmad, A. R., & Hasnaeni, H. (2025). Optimasi metode ekstraksi maserasi dan ultrasound assisted extraction (UAE) rimpang kunyit (*Curcuma longa* L.) dan aktivitas antioksidannya. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran*, 8(2): 4101–4111. <https://doi.org/10.31004/jrpp.v8i2.44563>
- Wahyuni, W. T., Herdiyanto, & Rafi, M. (2017). Metode ekstraksi dan pemisahan optimum untuk isolasi xanthorizol dari temulawak (*Curcuma xanthorrhiza*). *Jurnal Jamu Indonesia*, 2(2): 43–50. <https://ojs.iik.ac.id/index.php/wiyata/article/view/387/197>
- Won, S. & Kwon, K. H. (2024). Green technology for extraction of bioactive compounds from edible plants. *Journal of Oleo Science*, 73(10): 1249–1265. <https://doi.org/10.5650/jos.ess24162>
- Wu, X., Yan, L., Li, J., & Tan, Z. (2025). Deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted extraction of flavonoids from *Houttuynia cordata*. *Foods (Basel, Switzerland)*, 14(4): 558. <https://doi.org/10.3390/foods14040558>
- Xiang, Z., & Wu, X. (2017). Ultrasonic-microwave assisted extraction of total flavonoids from *scutellaria baicalensis* using response surface methodology. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 51(4): 318–323. <https://doi.org/10.1007/s11094-017-1606-3>
- Yusoff, I. M., Taher, Z. M., Rahmat, Z., & Chua, L. S. (2022). A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food research international*, 157: 111268. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111268>
- Yaman, M., Arslan, S. N., Gençay, G., Nemli, E., Peker, M. Y., Şen, F. B., Capanoglu, E., Bener, M., & Apak, R. (2025). Optimization and modeling of ultrasound-and microwave-assisted extraction of turmeric to efficiently recover curcumin and phenolic antioxidants followed by food enrichment to enhance health-promoting effects. *Food Science & Nutrition*, 13(3): e70093. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70093>
- Zia, S., Khan, M. R., Shabbir, M. A., Aslam Maan, A., Khan, M. K. I., Nadeem, M., & Aadil, R. M. (2022). An inclusive overview of advanced thermal and nonthermal extraction techniques for bioactive compounds in food and food-related matrices. *Food Reviews International*, 38(6), 1166–1196. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1772283>