e-ISSN 3062-8849
The 4th National Conference on Innovative Agriculture 2025
Jember, 26 - 27 September 2026

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.671

Analisis Citra Digital untuk Deteksi Cepat Boraks pada Pangan Berbasis Pati: Tinjauan Kritis terhadap Tantangan Kimia dan Instrumentasi

Digital Image Analysis for Rapid Borax Detection in Starch-Based Foods: A Critical Review of Chemical and Instrumental Challenges

Ahmad David Royyifi Arifin[1]*, Nur Latifatul Qodriyah[1], Mirriyadhil Jannah[1], Lita Meilina[1], Mentari Sekar Arum[1], Baroroh Barir[2]

[1]Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember
[2]Program Studi D3 Keperawatan, Fakultas Sains & Teknologi Multidisiplin, Institut Teknologi Sains dan Kesehatan Insan Cendekia Medika Jombang

*Email Koresponden: royyifi@unej.ac.id

Received : 10 September 2026 | Accepted : 25 September 2026 | Published : 30 Oktober 2026

Kata Kunci

analisis citra digital ; boraks; kolorimetri; kurkumin; pangan berbasis pati

ABSTRAK

Deteksi borak pada pangan berbasis pati masih menjadi tantangan karena perubahan warna yang dihasilkan oleh reaksi kurkumin–boron dapat dipengaruhi oleh karakteristik pangan dan kondisi pengukuran. Kurkumin dapat digunakan untuk menghasilkan perubahan warna sebagai tanda keberadaan boron, sedangkan analisis citra digital dapat mengubah perubahan warna tersebut menjadi data numerik. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis tahapan deteksi boraks berdasarkan kurkumin dan analisis citra digital, mulai dari preparasi dan ekstraksi sampel, pembentukan kompleks, pengambilan citra, analisis warna, hingga kalibrasi dan validasi. Pendekatan kritis review digunakan dengan menelaah 37 artikel yang membahas tentang kimia kurkumin–boron, deteksi boraks atau boron, kolorimetri, analisis citra digital, serta karakteristik matriks pangan dan bahan terkait. Hasil kajian menunjukkan bahwa keberhasilan pengukuran tidak hanya ditentukan oleh terbentuknya warna, tetapi juga oleh proses ekstraksi, kondisi reaksi, matriks karakteristik, kondisi pencahayaan dan kamera, serta kalibrasi model. Penelitian pada hidrogel, aerogel, dan sistem polimer memberikan dasar untuk menjelaskan kemungkinan interaksi borat dengan polisakarida, tetapi belum dapat dianggap sebagai bukti langsung pada pangan berbasis pati. Analisis citra digital berpotensi dikembangkan sebagai metode skrining boraks yang cepat, murah, dan portabel. Namun penerapannya pada pangan berbasis pati masih memerlukan validasi khusus melalui pengujian seperti recovery, presisi, LOD, LOQ, dan pengujian pada sampel pangan nyata.

Keywords

ABSTRACT

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.671

borax; digital image analysis; colorimetry; curcumin; starch-based food

Detecting borax in starch-based foods remains challenging because the color change resulting from the curcumin–boron reaction can be influenced by food characteristics and measurement conditions. Curcumin can be used to produce a color change indicating the presence of boron, while digital image analysis can convert this color change into numerical data. This review aims to analyze the stages of borax detection based on curcumin and digital image analysis, ranging from sample preparation and extraction, complex formation, and image acquisition to color analysis, calibration, and validation.A critical review approach was employed, examining 37 articles covering curcumin–boron chemistry, borax or boron detection, colorimetry, digital image analysis, and the characteristics of food matrices and related materials. The findings indicate that measurement success depends not only on color formation but also on the extraction process, reaction conditions, matrix characteristics, lighting and camera conditions, and model calibration. Research on hydrogels, aerogels, and polymer systems provides a basis for explaining potential borate–polysaccharide interactions, yet this cannot be considered direct evidence for starch-based foods. Digital image analysis holds potential for development into a rapid, low-cost, and portable borax screening method; however, its application to starch-based foods still requires specific validation through tests such as recovery, precision, LOD, LOQ, and analysis of actual food samples.

1. PENDAHULUAN

Pangan tradisional berbasis pati berperan penting dalam sistem pangan lokal karena menggabungkan nilai budaya dan ekonomi dengan teknologi pengolahan sederhana, sehingga menjadi produk utama usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM) di Indonesia; kerupuk, misalnya, dikonsumsi luas dan diproduksi banyak usaha kecil di Jawa (Kusmartini et al., 2022). Pada kerupuk, mi, dan makanan ringan goreng atau kering, tekstur menjadi salah satu penentu utama mutu dan penerimaan konsumen. Karakteristik tekstur tersebut dapat dipengaruhi oleh proses pengolahan maupun penggunaan bahan tambahan yang tidak diizinkan, sehingga juga berkaitan dengan aspek keamanan pangan (Moelyaningrum, 2019)

Boraks (natrium tetraborat) secara ilegal digunakan untuk memodifikasi tekstur, terutama kekenyalan dan kekerasan produk berbasis pati maupun protein. Meskipun dilarang sebagai bahan tambahan pangan melalui Peraturan Menteri Kesehatan No. 033 Tahun 2012, keberadaannya masih dilaporkan pada berbagai produk, sementara paparan penggunaannya dalam jangka panjang dikaitkan dengan munculnya gangguan sistem ginjal, hormonal, dan reproduksi (Hadrup et al., 2021). Survei pada pangan tradisional Indonesia menunjukkan bahwa asam borat masih banyak ditemukan pada berbagai makanan tradisional seperti kerupuk dll, bahkan seluruh sampel yang diuji dalam penelitian Moelyaningrum (2019), terdeteksi mengandung asam borat. Di sisi lain, metode berbasis kurkumin telah banyak juga digunakan untuk mendeteksi boraks pada pangan, salah satunya pada bakso (Najiba et al., 2026). Kondisi ini menunjukkan perlunya metode skrining yang praktis dan lebih objektif.

Metode deteksi boraks yang tersedia memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal kinerja analitis dan kemudahan penggunaannya. Seperti ICP-MS dan ICP-OES, metode ini memiliki sensitivitas serta akurasi tinggi, memerlukan preparasi sampel yang kompleks, instrumen yang mahal, dan tenaga terlatih. Karena itu, penggunaannya lebih sesuai untuk skala

laboratorium (Robbika et al., 2022; Tan et al., 2023). Disi lain, kertas kunyit atau stik kurkumin lebih sederhana dan murah, tetapi hasilnya masih bergantung pada pengamatan visual yang dapat dipengaruhi oleh subjektivitas pengguna dan kondisi pencahayaan (Najiba et al., 2026). Selain itu, Spektrofotometri UV-Vis dapat memberikan hasil kuantitatif, tetapi tetap membutuhkan instrumen laboratorium, meskipun sistem portabel telah dikembangkan (Kesonkan et al., 2025; Setyawati, 2019). Hal ini memperlihatkan bahwa masih terdapat jarak antara metode yang memiliki kinerja analitis tinggi tetapi membutuhkan fasilitas laboratorium dan metode sederhana yang lebih mudah digunakan tetapi memiliki keterbatasan dalam pengukuran kuantitatif.

Analisis Citra Digital dapat menjadi salah satu pendekatan untuk menjembatani kebutuhan tersebut dengan mengubah perubahan warna menjadi data numerik. Citra yang diperoleh kamera dapat dianalisis melalui parameter warna seperti RGB, HSV, dan CIELAB pada area tertentu atau *region of interest* (ROI) (Mazur et al., 2024). Pendekatan berbasis kamera juga telah digunakan untuk menentukan boron melalui reaksi dengan kurkumin, setelah sampel terlebih dahulu melalui tahap ekstraksi menggunakan teknik *dispersive solid-phase microextraction* (d-SPE) sebelum pengamatan (Caleb et al., 2023). Penggunaan smartphone dan kamera untuk analisis optik juga telah berkembang dalam berbagai aplikasi analisis keamanan pangan (Coleman et al., 2019; Nelis et al., 2020). Review ini akan difokuskan pada analisis citra digital berbasis kamera atau webcam dengan kondisi pengambilan citra yang terkendali. Studi yang menggunakan smartphone tetap digunakan sebagai bukti pendukung karena memiliki prinsip pencitraan yang serupa.

Namun, perubahan warna yang terlihat secara visual belum tentu menghasilkan pengukuran kuantitatif yang akurat. Warna yang ditangkap kamera merupakan hasil dari beberapa tahapan, mulai dari keberadaan boraks dalam matriks pangan, proses ekstraksi, reaksi dengan kurkumin, dan pembentukan warna, hingga pengambilan serta pengolahan citra (Barzallo et al., 2023; Fyfe et al., 2025; Woolf et al., 2021). Karena itu, keakuratan analisis citra digital tidak cukup dinilai dari ada atau tidaknya perubahan warna. Konsistensi setiap tahap pengukuran juga perlu diperhatikan.

Tantangan tersebut lebih kompleks pada pangan berbasis pati karena boraks dalam produk padat harus diekstraksi ke fase cair sebelum bereaksi dengan kurkumin. Pati dan polisakarida memiliki banyak gugus hidroksil yang dapat berinteraksi dengan borat (Matsuki et al., 2020), sedangkan ekstrak pangan tidak hanya mengandung borat saja, tetapi juga dapat membawa fragmen pati, dekstrin, gula, protein, dan pigmen hasil pengolahan. Komponen-komponen tersebut dapat memengaruhi warna, kekeruhan, dan latar optik ekstrak, sehingga responsnya tidak selalu sama dengan larutan standar. Kamera juga bukan detektor kimia, perannya hanya merekam cahaya yang diterima, sehingga nilai warna yang dihasilkan dapat berubah akibat pencahayaan, exposure, gain, white balance, jarak kamera, geometri pengambilan gambar, dan pemilihan ROI (Barzallo et al., 2023; Rodríguez Muiña et al., 2025; Woolf et al., 2021). Meskipun demikian reaksi kimia kurkumin–boron telah lama dipelajari (Dyrssen et al., 1972; Liu & Lee, 2009) pendekatan kolorimetri berbasis kamera juga telah diterapkan pada berbagai analisis pangan (Berasarte et al., 2024; Caleb et al., 2023; Jing et al., 2021; Mazur et al., 2024), Namun, kedua kelompok penelitian tersebut belum banyak dibahas dalam satu rangkaian analisis. Studi kimia umumnya lebih berfokus pada reaksi dan kondisi pembentukan warna, sedangkan studi pencitraan lebih banyak membahas pengambilan dan pengolahan citra. Hubungan antara kondisi kimia, karakteristik matriks, dan sinyal warna yang ditangkap kamera masih perlu diperjelas.

Berdasarkan celah tersebut, review ini membahas rangkaian analisis deteksi boraks berbasis kurkumin dan DIA, mulai dari ekstraksi sampel dan pembentukan kompleks

kurkumin–borat hingga pengambilan citra, analisis warna, kalibrasi, dan validasi. Pembahasan difokuskan pada faktor-faktor yang dapat menyebabkan variasi hasil pengukuran serta keterbatasan penerapan hasil penelitian dari sistem atau matriks lain pada pangan berbasis pati. Review ini juga mengidentifikasi aspek metodologis yang masih perlu diperbaiki untuk mendukung pengembangan metode skrining boraks berbasis kamera yang praktis dan dapat memberikan hasil kuantitatif yang lebih akurat.

2. METODE REVIEW

Review ini menggunakan pendekatan *critical review* untuk menilai kualitas, relevansi, konsistensi, dan keterbatasan literatur mengenai deteksi boraks berbasis kurkumin dan analisis citra digital pada pangan berbasis pati. Pendekatan ini dipilih karena literatur yang relevan berasal dari beberapa bidang yang berbeda, meliputi kimia kurkumin–boron, deteksi kolorimetri dan instrumental, karakteristik matriks pati, serta analisis citra digital dan kemometrik, sehingga tidak sesuai untuk digabungkan melalui meta-analisis (Grant & Booth, 2009).

2.1 Penelusuran Literatur

Literatur ditelusuri melalui ScienceDirect, PubMed, MDPI, SpringerLink, dan Google Scholar. Penelusuran diawali dengan literatur mengenai kimia penentuan boron menggunakan kurkumin, kemudian diperluas secara bertahap berdasarkan istilah, metode, dan referensi yang ditemukan pada artikel yang relevan. Salah satu literatur dasar yang menjadi titik awal adalah penelitian Dyrssen et al. (1972) mengenai kimia penentuan boron dengan kurkumin. Pencarian dilakukan secara bertahap menggunakan kombinasi kata kunci dari empat domain utama, yaitu deteksi boraks atau boron (“borax detection”, “boron detection food”), kimia kurkumin (“curcumin boron”, “rosocyanine”), pencitraan berbasis kamera (“digital image analysis”, “camera-based colorimetry”, “RGB HSV CIELAB food”), serta interferensi matriks pangan (“starch-based food”, “kerupuk borax”, “food matrix colorimetry interference”). Pencarian tidak dibatasi berdasarkan tahun publikasi. Pencarian awal menghasilkan 78 artikel. Setelah dilakukan penyaringan berdasarkan relevansi yang akan dibahas, sebanyak 37 artikel digunakan sebagai sumber utama dalam review.

2.2 Kriteria Seleksi dan Penilaian Bukti

Literatur dipilih berdasarkan relevansinya terhadap kimia kurkumin–borat, deteksi boraks atau boron, kolorimetri dan analisis citra digital, kalibrasi, serta karakteristik matriks pangan berbasis pati. Artikel dipertimbangkan untuk digunakan apabila membahas salah satu aspek tersebut dan memiliki informasi yang dapat mendukung pembahasan deteksi boraks atau boron. Artikel yang tidak berkaitan dengan fokus review, merupakan duplikasi, atau hanya memiliki hubungan tidak langsung dengan topik utama tidak digunakan sebagai bukti utama.

Kekuatan bukti dibedakan menjadi bukti langsung, bukti pendukung, penjelasan berdasarkan mekanisme, dan hipotesis penelitian. Penelitian yang dilakukan langsung pada pangan digunakan sebagai bukti langsung, sedangkan penelitian pada bahan non-pangan seperti hidrogel, aerogel, dan polimer digunakan untuk menjelaskan kemungkinan mekanisme. Hasil dari sistem atau matriks lain tidak langsung dianggap berlaku pada pangan berbasis pati.

Literatur yang terpilih kemudian dibandingkan untuk melihat kesesuaian, perbedaan, keterbatasan metode, dan kesenjangan penelitian. Perbandingan juga mempertimbangkan kemungkinan perbedaan hasil ketika metode diterapkan pada matriks pangan, reagen, atau

perangkat analisis yang berbeda.

3. PEMBAHASAN

3.1 Boraks pada Pangan Berbasis Pati dan Tantangan Matriksnya

Boraks secara umum banyak digunakan secara illegal pada pangan berbasis pati untuk memengaruhi tekstur, terutama kekerasan, elastisitas, dan kekenyalan pada suatu produk (Moelyaningrum, 2019; Najiba et al., 2026). Pati dan polisakarida memiliki banyak gugus hidroksil yang dapat berinteraksi dengan borat. Studi pada hidrogel dan jaringan polisakarida menunjukkan bahwa interaksi tersebut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti pH (Matsuki et al., 2020; Tanpichai et al., 2022; van den Berg et al., 1994). Namun, kondisi pada sistem tersebut lebih sederhana dibandingkan pangan olahan yang memiliki berbagai komponen dan mengalami proses pengolahan. Karena itu, hasil penelitian tersebut digunakan untuk menjelaskan kemungkinan pengaruh matriks pangan, bukan untuk menyatakan bahwa interaksi borat dengan polisakarida pasti terjadi dengan cara yang sama pada semua pangan berbasis pati.

Kompleksitas matriks menjadi penting dalam analisis kolorimetri. Berbeda dengan larutan standar, ekstrak pangan mengandung berbagai komponen yang dapat memengaruhi pengukuran warna. Pati yang ikut terekstrak dapat meningkatkan kekeruhan dan hamburan cahaya, sedangkan protein, lipid, dan pigmen dapat mengubah warna dasar ekstrak. Kondisi tersebut dapat menyebabkan warna yang terukur tidak hanya dipengaruhi oleh boraks, tetapi juga oleh karakteristik matriks pangan.

Matriks pangan juga dapat memengaruhi jumlah boron yang berhasil diekstraksi. Rasio sampel dan pelarut, waktu ekstraksi, suhu, pengadukan, serta proses klarifikasi menentukan jumlah analit yang masuk ke tahap pengukuran (Caleb et al., 2023). Karena itu, preparasi sampel merupakan bagian penting dari proses analisis. Efisiensi ekstraksi akan menentukan jumlah boron yang tersedia untuk bereaksi dengan kurkumin dan selanjutnya memengaruhi sinyal warna yang diukur.

3.2 Metode Deteksi Boraks yang Tersedia

Pendekatan deteksi boraks memiliki keunggulan dan keterbatasan yang berbeda, terutama dalam hal ketelitian hasil dan kemudahan penggunaannya. Metode instrumental berbasis unsur seperti ICP-MS dan ICP-OES menawarkan sensitivitas dan ketelitian yang tinggi (Duboc et al., 2019; Fedortsov et al., 2021; Robbika et al., 2022; Tan et al., 2023), Namun, metode tersebut memerlukan preparasi sampel yang cukup kompleks, instrumen yang mahal, dan operator yang terlatih. Kondisi ini membuatnya kurang praktis untuk pemeriksaan awal secara cepat di tempat produksi. Metode tersebut lebih sesuai digunakan di laboratorium sebagai metode referensi atau untuk mengonfirmasi hasil pemeriksaan awal.

Metode Spektrofotometri UV-Vis dapat mengubah hasil reaksi kimia boron menjadi nilai absorbansi yang kemudian digunakan untuk menentukan konsentrasi. Kurkumin merupakan salah satu reagen yang telah digunakan untuk penentuan boron pada produk pangan. Dalam metode tersebut, boron dipisahkan terlebih dahulu sebagai ester borat, kemudian direaksikan dengan kurkumin sebelum diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Thangavel et al., 2004). Metode serupa yang diterapkan pada produk pangan menunjukkan nilai recovery sekitar 96–105%, yang menunjukkan bahwa sebagian besar boron yang ditambahkan ke sampel dapat terukur kembali (Adu et al., 2021). Penggunaan reagen kurkumin pada spektrofotometri UV-Vis telah menunjukkan kinerja yang baik untuk penentuan boron, tetapi hasil pengukuran tetap dipengaruhi oleh kondisi reaksi, seperti pH, waktu, dan suhu (Sarkar et al., 2014).

Pengembangan formulasi kurkumin untuk spektrometer portabel menunjukkan bahwa pendekatan UV-Vis mulai dapat diterapkan di lapangan (Kesonkan et al., 2025). Namun, penggunaan spektrometer tetap memerlukan instrumen khusus dan pengendalian kondisi pengukuran.

Di sisi lain, kolorimetri menawarkan cara yang lebih sederhana karena keberadaan boraks dapat dikenali melalui perubahan warna. Kertas kunyit dan reagen berbasis kurkumin dapat digunakan untuk pemeriksaan awal boraks tanpa memerlukan spektrofotometer. Metode ini telah digunakan untuk skrining boraks pada pangan seperti bakso dan kerupuk di Indonesia (Moelyaningrum, 2019; Najiba et al., 2026). Namun, hasil pembacaan warna masih bergantung pada penilaian pengguna dan kondisi pencahayaan, sehingga sulit memberikan hasil yang konsisten, terutama ketika warna matriks pangan ikut memengaruhi pembacaan. Oleh karena itu, metode ini lebih sesuai untuk skrining awal daripada untuk pengukuran kuantitatif.

Analisis citra digital berbasis kamera dapat meningkatkan objektivitas analisis kolorimetri dengan mengubah perubahan warna menjadi data numerik. Warna hasil reaksi kurkumin–borat dapat direkam dengan kondisi pencahayaan yang terkontrol, kemudian dianalisis menggunakan parameter warna seperti RGB, HSV, atau CIELAB pada area tertentu atau *region of interest* (ROI). Nilai warna tersebut selanjutnya dapat dihubungkan dengan konsentrasi boron melalui model kalibrasi (Caleb et al., 2023; Mazur et al., 2024). Pendekatan kemometrik, yaitu penggunaan metode statistik untuk mengolah data kimia, juga menunjukkan bahwa data warna digital dapat digunakan untuk membangun dan memvalidasi model kalibrasi, bukan hanya untuk mencocokkan warna secara visual (Berasarte et al., 2024). Namun, penggunaan kamera tidak meningkatkan sensitivitas kimia dari reaksi kurkumin–borat. Kamera hanya merekam perubahan warna yang terjadi dan mengubahnya menjadi data numerik yang dapat dianalisis secara lebih objektif.

Digitalisasi warna ini tidak secara otomatis membuat suatu metode menjadi kuantitatif dan tervalidasi. Nilai warna dapat berubah akibat pencahayaan, *exposure, gain, white balance,* posisi kamera, dan pemilihan *Region of Interest* (ROI) meskipun konsentrasi analit tetap sama (Fyfe et al., 2025; Rodríguez Muiña et al., 2025). Karena itu, korelasi yang tinggi antara nilai warna dan konsentrasi pada satu kondisi percobaan belum cukup untuk membuktikan bahwa metode tersebut valid. Pada matriks pangan yang relatif sederhana, pendekatan berbasis kamera telah menunjukkan hasil yang baik. Namun, hasil tersebut tidak dapat langsung diterapkan pada pangan berbasis pati karena karakteristik matriksnya berbeda. Perbandingan berbagai pendekatan deteksi boraks disajikan pada Tabel 1.

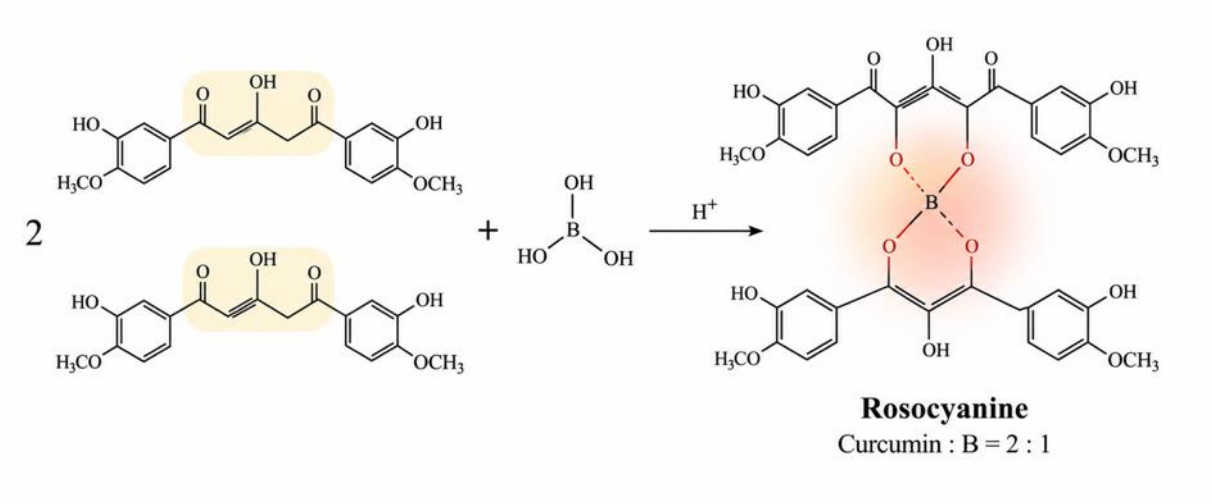
Tabel 1. Perbandingan pendekatan analitis untuk deteksi boraks atau boron dalam konteks skrining keamanan pangan

Pendekatan	Sinyal yang diukur	Kemampuan kuantitatif	Kebutuhan alat	Keterbatasan utama	Penggunaan yang sesuai
ICP-MS / ICP-OES	Sinyal unsur boron	Tinggi; dapat digunakan untuk analisis kuantitatif dengan validasi yang baik	Instrumen khusus, preparasi sampel, dan operator terlatih	Biaya dan kebutuhan fasilitas tinggi	Analisis laboratorium dan konfirmasi
UV-Vis berbasis kurkumin	Absorbansi hasil reaksi boron–kurkumin	Tinggi pada kondisi reaksi yang terkendali	Spektrofotometer dan pengendalian pH, waktu, dan suhu	Bergantung pada kondisi reaksi dan instrumen	Analisis kuantitatif di laboratorium
Kolorimetri visual	Perubahan warna	Terbatas; lebih sesuai untuk pemeriksaan awal	Minimal	Bergantung pada penilaian pengguna, pencahayaan, dan warna matriks	Skrining awal
Analisis citra berbasis kamera	Nilai warna RGB, HSV, atau CIELAB	Berpotensi kuantitatif jika kalibrasi dan kondisi pencitraan terkendali	Kamera/webcam dan sistem pencahayaan terkendali	Variasi pencahayaan, pengaturan kamera, ROI, dan pengaruh matriks	Skrining dan pengukuran kuantitatif berbasis citra

3.3 Reaksi Kurkumin–Borat dan Faktor yang Memengaruhi Hasil Analisis

Hasil deteksi boraks menggunakan kurkumin tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah total boron, tetapi juga oleh bentuk boron yang dapat bereaksi dengan kurkumin. Dalam larutan, boron dapat berada dalam beberapa bentuk kimia yang dipengaruhi oleh pH, konsentrasi, dan suhu, termasuk bentuk poliborat seperti ion diborat (Sasidharanpillai et al., 2023). Karena itu, pengukuran total boron dengan ICP-MS berbeda dengan pengukuran berbasis kurkumin. Pada metode kurkumin, hasil pengukuran juga bergantung pada kondisi kimia selama reaksi (Robbika et al., 2022; Tan et al., 2023).

Kurkumin berfungsi sebagai pereaksi yang mengubah boron yang tersedia menjadi sinyal warna. Kurkumin dapat berada dalam beberapa bentuk, terutama bentuk diketo dan ketoenol, yang keseimbangannya dipengaruhi oleh pelarut dan pH. Perubahan bentuk tersebut dapat memengaruhi kemampuan kurkumin untuk bereaksi dengan boron dan menghasilkan warna (Osifová et al., 2022). Pada kondisi yang sesuai, boron bereaksi dengan kurkumin dan membentuk kompleks berwarna yang disebut rososianin. Kompleks tersebut memiliki perbandingan 1:2 antara boron dan kurkumin (Dyrssen et al., 1972), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pembentukan kompleks rososianin melalui kompleksasi dua molekul kurkumin dengan satu atom boron dalam kondisi asam.

Pembentukan warna tidak selalu meningkat secara linear dengan konsentrasi boraks. Hal ini karena respons warna juga dipengaruhi oleh kondisi reaksi dan perubahan kurkumin selama proses pengukuran (Dyrssen et al., 1972). Oleh karena itu, waktu reaksi, suhu, dan pH perlu dikendalikan agar respons warna yang dihasilkan konsisten. Pada aplikasi pangan Adu et al., (2021) melaporkan kondisi optimum sekitar 75 °C, pH 5–6, dan waktu reaksi 10 menit. Perbedaan kinerja antara kurkumin dan azomethine-H juga menunjukkan bahwa jenis reagen dan kondisi reaksi dapat mempengaruhi hasil analisis (Sarkar et al., 2014). Sehingga, rentang konsentrasi kerja dan hubungan antara konsentrasi boraks dan perubahan warna perlu ditentukan melalui pengujian pada sistem yang digunakan.

Beberapa kondisi dapat memengaruhi perubahan warna pada reaksi kurkumin–boron. Salah satunya adalah pH. Perubahan pH dapat mengubah kondisi boron dan kurkumin sehingga warna yang terbentuk juga dapat berubah (Osifová et al., 2022). Karena itu, pH perlu dijaga agar warna yang dihasilkan tetap konsisten (Dyrssen et al., 1972; Setyawati, 2019). Pada pangan, bahan-bahan lain yang ikut masuk ke dalam ekstrak juga dapat mengubah pH. Akibatnya, perubahan warna yang terlihat belum tentu hanya disebabkan oleh kadar boraks.

Selain pH, jumlah air dan proses ekstraksi juga dapat memengaruhi hasil pengukuran. Banyaknya air, perbandingan sampel dan pelarut, serta kondisi selama ekstraksi akan menentukan berapa banyak boron yang dapat keluar dari bahan pangan dan bereaksi dengan kurkumin. Interaksi antara borat dan polisakarida dalam air juga dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (Matsuki et al., 2020). Karena itu, kondisi ekstraksi perlu dibuat sama agar hasil pengukuran dapat dibandingkan dengan baik.

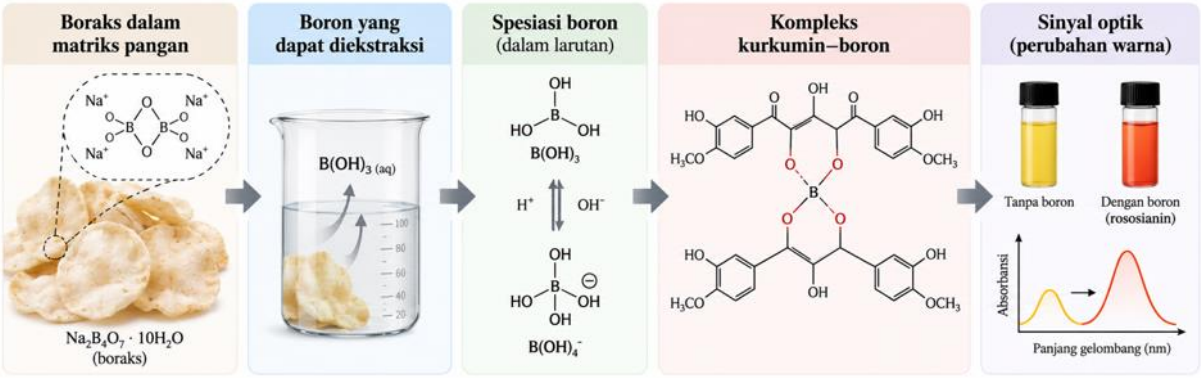
Waktu pengukuran juga perlu diperhatikan. Kurkumin dapat berubah selama berada dalam larutan, terutama pada kondisi pH dan suhu tertentu (Kharat et al., 2017; Wang et al., 1997). Perubahan ini dapat menyebabkan warna berubah meskipun kadar boron tidak berubah. Karena itu, waktu mulai dari pembuatan reagen, ekstraksi, reaksi dengan kurkumin, hingga pengambilan gambar perlu dibuat sama pada setiap pengukuran (Adu et al., 2021; Caleb et al., 2023).

Pada pangan berbasis pati, masalahnya dapat menjadi lebih kompleks karena pati dan polisakarida memiliki banyak gugus hidroksil yang dapat berinteraksi dengan borat. Interaksi ini telah dipelajari pada bahan seperti dekstrin, pati, selulosa, dan berbagai polimer (Knezevic et al., 2025; Malakar et al., 2023; Matsuki et al., 2020; Shi et al., 2023; Tanpichai et al., 2022).

doi: 10.25047/nacia.v4i1.671

Namun, sebagian besar penelitian tersebut dilakukan pada hidrogel, aerogel, atau bahan polimer, bukan pada pangan. Hasil penelitian tersebut dapat digunakan untuk menjelaskan kemungkinan terjadinya interaksi antara borat dan pati, tetapi belum dapat membuktikan bahwa pengaruhnya akan sama pada pangan. Karena itu, pengaruh interaksi tersebut terhadap hasil deteksi boraks masih perlu diuji secara langsung pada pangan berbasis pati.

Selain interaksi antara borat dan pati, kondisi bahan pangan juga dapat memengaruhi hasil pengukuran citra digital. Kekeruhan, pigmen, dan warna dasar bahan pangan dapat memengaruhi cahaya yang diterima kamera. Karena itu, warna yang terbentuk tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah boraks, tetapi juga oleh kondisi bahan pangan dan proses pengujiannya. Hubungan antara kondisi bahan pangan, proses ekstraksi, reaksi dengan kurkumin, dan terbentuknya warna diringkas pada Gambar 2.



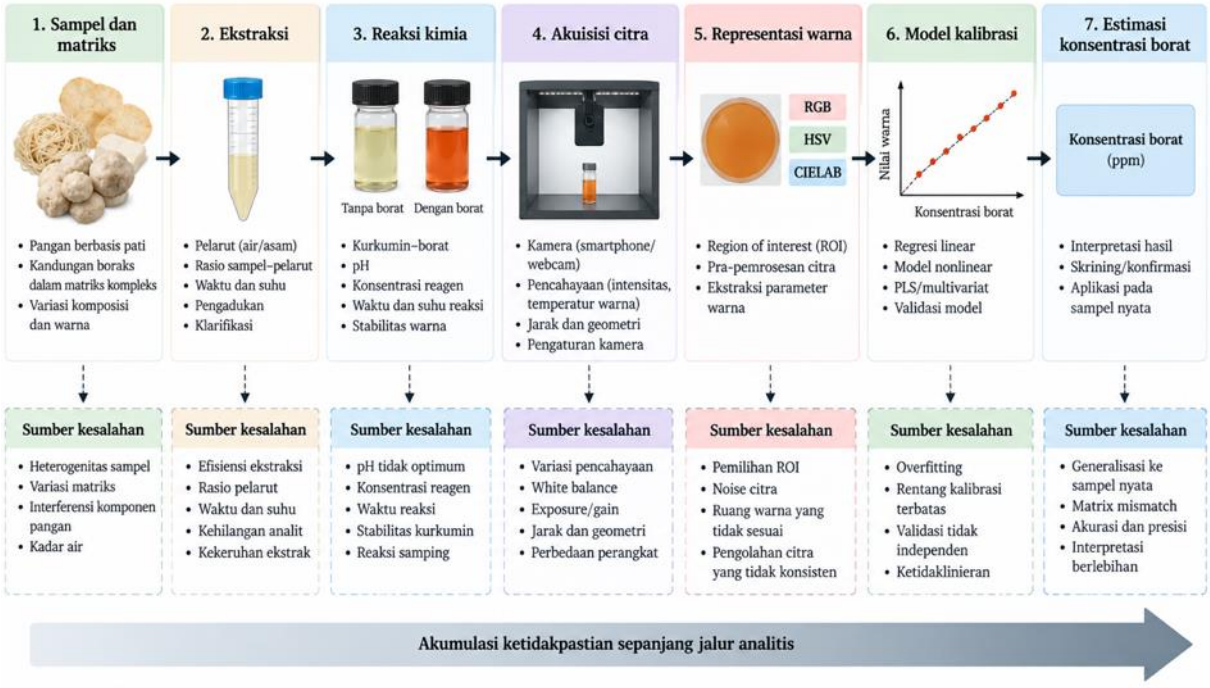
Gambar 2. Rangkaian analisis deteksi boraks berbasis kurkumin, dari boraks dalam matriks pangan hingga terbentuknya sinyal warna.

Rangkaian tersebut menunjukkan bahwa warna yang ditangkap kamera tidak hanya ditentukan oleh keberadaan boraks. Hasilnya juga dipengaruhi oleh proses ekstraksi, kondisi reaksi, dan karakteristik bahan pangan. Karena itu, sebelum warna tersebut diubah menjadi data digital dan digunakan untuk menentukan kadar boraks, setiap tahap perlu dikendalikan agar hasil pengukuran lebih konsisten.

3.4 Analisis Citra Digital sebagai Sistem Pengukuran Kuantitatif

Analisis citra digital digunakan untuk mengubah perubahan warna menjadi angka yang dapat dianalisis. Dalam metode ini, warna hasil reaksi kurkumin–borat diambil menggunakan kamera, kemudian nilai warnanya diukur dan digunakan untuk memperkirakan konsentrasi boraks melalui kurva atau model kalibrasi. Hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh beberapa tahap, mulai dari cara mengambil gambar, mengolah warna, hingga membuat model kalibrasi (Mazur et al., 2024). Rangkaian proses tersebut dan faktor yang dapat memengaruhi hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3.

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.671



Gambar 3. Tahapan analisis deteksi boraks menggunakan citra digital dan faktor yang dapat memengaruhi hasil pengukuran.

Pemilihan ruang warna penting dalam analisis citra digital karena setiap ruang warna memiliki cara yang berbeda dalam menggambarkan warna. RGB merupakan ruang warna yang paling dekat dengan cara kamera merekam gambar. Namun, nilai RGB sangat dipengaruhi oleh jenis kamera dan kondisi pencahayaan. Artinya, perubahan cahaya dapat membuat nilai RGB berubah meskipun kondisi kimia sampel tidak berubah. Selain itu, kamera memiliki batas tertentu dalam merekam warna sehingga tidak semua warna dapat ditangkap dengan tingkat ketepatan yang sama (Fyfe et al., 2025).

HSV membagi warna menjadi tiga bagian, yaitu hue (jenis warna), saturation (tingkat kejenuhan warna), dan value (tingkat terang atau gelap). Sementara itu, CIELAB memisahkan tingkat kecerahan dari informasi warna sehingga dapat memberikan gambaran warna yang lebih mendekati cara manusia melihat warna. Kedua ruang warna tersebut telah digunakan dalam analisis citra berbasis kamera (Rodríguez Muiña et al., 2025). Namun, belum ada bukti yang cukup untuk menentukan satu ruang warna sebagai pilihan terbaik pada sistem kurkumin–borat. Perbandingan langsung antara beberapa ruang warna pada sistem tersebut masih terbatas (Mazur et al., 2024).

Perubahan warna hasil reaksi tidak selalu terlihat jelas hanya dari satu nilai warna. Jika hanya menggunakan satu nilai warna, analisis memang menjadi lebih sederhana, tetapi informasi yang diperoleh juga lebih sedikit. Karena itu, beberapa nilai warna dapat digunakan bersama-sama agar perubahan warna dapat dianalisis dengan lebih lengkap. Data tersebut kemudian dapat diolah menggunakan metode statistik untuk melihat hubungannya dengan kadar boron (Ahmad et al., 2025; Berasarte et al., 2024).

Data warna yang diperoleh dari kamera selanjutnya perlu dihubungkan dengan konsentrasi boraks melalui model kalibrasi. Hubungan antara perubahan warna dan konsentrasi boraks tidak selalu berbentuk garis lurus. Pada konsentrasi rendah, tidak semua boron mungkin membentuk kompleks dengan kurkumin. Sementara itu, pada konsentrasi yang lebih tinggi, jumlah reagen yang tersedia dapat menjadi terbatas sehingga perubahan warna tidak lagi meningkat secara proporsional (Dyrssen et al., 1972). Karena itu, sebelum menggunakan regresi linear, perlu dilihat terlebih dahulu bentuk hubungan antara konsentrasi dan warna, rentang konsentrasi yang dapat diukur dengan baik, serta seberapa besar kesalahan hasil prediksi.

Nilai R^2 yang tinggi juga belum tentu berarti bahwa model dapat memberikan hasil yang baik pada sampel lain. Model perlu diperiksa untuk melihat apakah hasil prediksinya memiliki kesalahan yang kecil dan tetap dapat digunakan pada sampel baru (Berasarte et al., 2024). Jika informasi warna berasal dari beberapa parameter, beberapa parameter tersebut dapat digunakan secara bersama-sama untuk membuat model yang lebih lengkap. Salah satu pendekatannya adalah partial least squares (PLS). Namun, jika jumlah sampel terlalu sedikit, model hanya akan mengikuti data yang digunakan dalam proses pembuatannya. Akibatnya, model yang terlihat baik pada data tersebut belum tentu memberikan hasil yang baik ketika digunakan untuk sampel baru (Ahmad et al., 2025; Berasarte et al., 2024).

Keakuratan hasil analisis juga dipengaruhi oleh cara gambar diambil. Jarak kamera, kondisi cahaya, posisi kamera, pengaturan kamera, ukuran area yang dianalisis, dan warna latar belakang dapat memengaruhi hasil gambar. Ini mengakibatkan, nilai warna dapat berubah meskipun kadar boraks dalam sampel tetap sama. Karena itu, pengambilan gambar perlu dilakukan dengan kondisi yang sama pada setiap pengukuran. Penggunaan box untuk analisis citra dengan pencahayaan terkontrol, jarak kamera yang tetap, serta pengaturan kamera yang konsisten dapat membantu mengurangi perubahan tersebut. Beberapa penelitian juga menunjukkan pentingnya pengaturan dan koreksi warna agar hasil gambar tetap konsisten (Fyfe et al., 2025; Rodríguez Muiña et al., 2025).

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa analisis citra digital dapat digunakan untuk mengukur boron dengan hasil yang cukup baik. Misalnya, penelitian pada kacang melaporkan LOD sebesar 0,07–0,11 $\mu g\ mL^{-1}$ dan recovery 92–106% (Ahmad et al., 2025; Caleb et al., 2023). Metode kurkumin berbasis distilasi juga menunjukkan recovery 96–105% (Adu et al., 2021). Namun, hasil tersebut belum dapat langsung digunakan untuk menyatakan bahwa metode yang sama akan bekerja dengan baik pada pangan berbasis pati. Penelitian khusus pada produk seperti kerupuk juga masih terbatas (Kusmartini et al., 2022; Moelyaningrum, 2019). Maka dari itu, pengembangan metode analisis citra digital untuk deteksi boraks pada pangan berbasis pati perlu diuji secara khusus menggunakan sampel pangan yang sebenarnya. Pengujian tersebut perlu melihat beberapa hal, seperti ketepatan hasil, konsistensi pengukuran, batas terendah yang dapat dideteksi, dan kemampuan metode dalam mengukur sampel baru.

3.5 Sintesis Kritis dan Kesenjangan Penelitian

Tantangan pengembangan *analisis citra digital* untuk deteksi boraks pada pangan berbasis pati bukan hanya terletak pada reaksi kurkumin–boron atau penggunaan kamera, tetapi

pada bagaimana seluruh tahapan tersebut dapat bekerja secara konsisten sebagai satu sistem pengukuran. Reaksi kurkumin dapat menghasilkan perubahan warna ketika bereaksi dengan boron, sedangkan kamera dapat menangkap perubahan tersebut dan mengubahnya menjadi data angka untuk membuat model kalibrasi (Caleb et al., 2023; Dyrssen et al., 1972; Liu & Lee, 2009; Mazur et al., 2024). Namun, adanya perubahan warna dan data dari kamera belum cukup untuk memastikan bahwa perubahan tersebut benar-benar menunjukkan perubahan konsentrasi boraks dalam pangan berbasis pati. Proses ekstraksi, reaksi, dan pengambilan gambar masing-masing dapat memengaruhi hasil akhir. Karena itu, setiap tahap perlu dikendalikan agar pengaruhnya terhadap hasil dapat diketahui.

Literatur yang tersedia juga masih membahas bagian-bagian tersebut secara terpisah. Penelitian tentang kimia kurkumin–boron lebih banyak membahas pembentukan kompleks dan kondisi reaksi, sedangkan penelitian berbasis kamera lebih banyak membahas pencahayaan, ruang warna, dan pengolahan data (Adu et al., 2021; Kesonkan et al., 2025; Mazur et al., 2024). Penelitian yang menggabungkan seluruh tahapan tersebut pada pangan berbasis pati masih terbatas. Kesenjangan penelitian terutama terletak pada belum cukupnya bukti bahwa proses preparasi sampel, ekstraksi, reaksi kurkumin–boron, pengambilan gambar, analisis warna, kalibrasi, dan validasi dapat menghasilkan data yang konsisten pada pangan nyata. Karena itu, penelitian selanjutnya perlu menguji setiap tahap secara berurutan dan kemudian melihat kinerja seluruh proses sebagai satu sistem. Analisis citra digital dapat dikembangkan sebagai metode skrining kuantitatif yang cepat dan portabel untuk melengkapi metode konfirmasi, bukan untuk menggantikan metode seperti ICP-MS atau UV-Vis (Robbika et al., 2022; Tan et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Review ini menunjukkan bahwa analisis citra digital memiliki potensi yang cukup kuat untuk digunakan dalam deteksi boraks pada pangan berbasis pati. Keberhasilan metode ini tidak hanya bergantung pada reaksi kurkumin yang menghasilkan perubahan warna atau kemampuan kamera untuk merekam warna tersebut, tetapi juga pada proses ekstraksi, kondisi reaksi, pengambilan gambar, dan pengolahan data. Setiap tahap perlu dikendalikan karena dapat memengaruhi hasil pengukuran. Analisis citra digital akan berpotensi menjadi metode skrining yang cepat, murah, dan portabel. Namun, bukti penerapannya pada pangan berbasis pati masih terbatas. Karena itu, penelitian selanjutnya perlu menguji metode ini secara langsung pada berbagai pangan berbasis pati, mulai dari preparasi sampel hingga validasi hasil pengukuran. Pengujian tersebut penting untuk memastikan bahwa perubahan warna yang ditangkap kamera benar-benar dapat digunakan untuk memperkirakan kadar boraks dengan hasil yang konsisten dan dapat dipercaya. Analisis citra digital dapat digunakan sebagai metode skrining untuk melengkapi metode konfirmasi laboratorium seperti ICP-MS atau UV-Vis, bukan untuk menggantikannya.

DAFTAR PUSTAKA

Adu, R. E. Y., Roto, R., & Kuncaka, A. (2021). Spectrophotometric determination of boron in food products by ester borate distillation into curcumin. *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*, *15*(1), 67–73.

Ahmad, B. I., Ismail, S., Caleb, J., Asir, S., & Usman, A. G. (2025). Smartphone digital image colorimetry couple with chemometric approach for determination of boron in nuts prior to deep eutectic solvent liquid–liquid microextraction: A first application of hybrid chemometrics in SDIC. *Analytical Sciences*, *41*(4), 403–418.

Barzallo, D., Ferrer, L., Amorello, D., Orecchio, S., & Cerdà, V. (2023). Multifunctional portable system based on digital images for in-situ detecting of environmental and food samples.

Molecules, *28*(6), 2465. https://doi.org/10.3390/molecules28062465

Berasarte, I., Albizu, G., Santos, W. F., de Lima, L. F., Ostra, M., Vidal, M., & de Araujo, W. R. (2024). Chemometrics and digital image colorimetry approaches applied to paper-based analytical devices: A review. *Analytica Chimica Acta*, *1339*, 343577. https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343577

Caleb, J., Alshana, U., Ertaş, N., & Bakırdere, S. (2023). Smartphone digital image colorimetry combined with dispersive solid-phase microextraction for the determination of boron in food samples. *Food Chemistry*, *426*, 136528. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136528

Coleman, B., Coarsey, C., & Asghar, W. (2019). Cell phone based colorimetric analysis for point-of-care settings. *Analyst*, *144*(6), 1935–1947. https://doi.org/10.1039/C8AN02521E

Duboc, O., Steiner, K., Radosits, F., Wenzel, W. W., Goessler, W., & Santner, J. (2019). Functional recycling of biobased, borate-stabilized insulation materials as B fertilizer. *Environmental Science & Technology*, *53*(24), 14620–14629.

Dyrssen, D. W., Novikov, Y. P., & Uppström, L. R. (1972). Studies on the chemistry of the determination of boron with curcumin. *Analytica Chimica Acta*, *60*(1), 139–151.

Fedortsov, A., Fedortsov, V., Ashchepkov, M. V, Rusakov, K. V, Gladkin, S., & Erofeev, V. (2021). Improving the strength and resistance of cement composites to the external environment by utilizing complex additives. *E3S Web of Conferences*, *281*, 03014. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128103014

Fyfe, C., Yu, S., Zhang, J., & Reid, M. (2025). RGB color correction and gamut limitations in smartphone-based kinetic analysis of chemical reactions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *417*(25), 5753–5770.

Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, *26*(2), 91–108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Hadrup, N., Frederiksen, M., & Sharma, A. K. (2021). Toxicity of boric acid, borax and other boron containing compounds: A review. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *121*, 104873. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104873

Jing, L., Qin, M., Zhang, X., Song, Y., Zhang, J., Xia, X., & Han, Q. (2021). A novel borax-specific ssDNA aptamer screened by high-throughput SELEX and its colorimetric assay with aggregation of AuNPs. *Journal of Food Composition and Analysis*, *101*, 103947. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103947

Kesonkan, K., Joradon, P., & Vongboot, M. (2025). Green curcumin extract from Curcuma longa L. for downscaling boron assay: optimization and application with a portable spectrometer. *Microchemical Journal*, 116266.

Kharat, M., Du, Z., Zhang, G., & McClements, D. J. (2017). Physical and chemical stability of curcumin in aqueous solutions and emulsions: Impact of pH, temperature, and molecular environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *65*(8), 1525–1532. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04815

Knezevic, J., Maier, A. S., Lackner, F., Stana Kleinschek, K., & Rieger, B. (2025). Modifications of Poly (vinylphosphonates) toward Dynamic Covalent Networks. *Macromolecules*, *58*(5), 2683–2693.

Kusmartini, I., Lestiani, D. D., Kurniawati, S., Damastuti, E., Adventini, N., Syahfitri, W. Y. N., Sari, D. K., Dwi Atmodjo, D. P., & Santoso, M. (2022). Trace element content and food safety of traditional crackers (kerupuk) collected from Java Island, Indonesia. *Indonesian Journal of Chemistry*, *22*(3), 714–725. https://doi.org/10.22146/ijc.70294

Liu, Y. M., & Lee, K. (2009). Modifications of the curcumin method enabling precise and accurate measurement of seawater boron concentration. *Marine Chemistry*, *115*(1–2), 110–117.

Malakar, A., Mandal, S., Sen Gupta, R., Manna, K., Parasuram, S., Misra, A., & Bose, S. (2023). Mussel-inspired double cross-linked interpenetrating network with unique mechanical properties using di-diol complexation. *SPE Polymers*, *4*(3), 83–92. https://doi.org/10.1002/pls2.10088

Matsuki, J., Wada, M., Sasaki, T., Yoza, K., Maeda, H., & Tokuyasu, K. (2020). Association of branched dextrin from Nägeli amylodextrin in water for screening of additives affecting starch

gel properties. *Starch - Stärke*, *72*(5–6), 1900202. https://doi.org/10.1002/star.201900202

Mazur, F., Han, Z., Tjandra, A. D., & Chandrawati, R. (2024). Digitalization of colorimetric sensor technologies for food safety. *Advanced Materials*, *36*(42), 2404274. https://doi.org/10.1002/adma.202404274

Moelyaningrum, A. D. (2019). Boric acid and hazard analysis critical control point (HACCP) on kerupuk to improve the Indonesians traditional foods safety. *International Journal of Scientific and Technology Research*, *8*(6), 50–54.

Najiba, A., Sardi, A., & Harahap, D. (2026). Qualitative Analysis of Borax (Sodium Tetraborate) Content in Meatballs in Pidie Regency. *Jurnal Biologi Tropis*, *26*(2), 172–178.

Nelis, J. L. D., Tsagkaris, A. S., Dillon, M. J., Hajslova, J., & Elliott, C. T. (2020). Smartphone-based optical assays in the food safety field. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *129*, 115934. https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115934

Osifová, Z., Reiberger, R., Císařová, I., Machara, A., & Dračínský, M. (2022). Diketo–ketoenol tautomers in curcuminoids: Synthesis, separation of tautomers, and kinetic and structural studies. *The Journal of Organic Chemistry*, *87*(15), 10309–10318. https://doi.org/10.1021/acs.joc.2c01357

Robbika, O. I., Rohyami, Y., & Hadriansyah, H. (2022). Critical quality control on determination of boron using ICP-OES with gravimetric method. *Indonesian Journal of Chemical Analysis (IJCA)*, *5*(2), 103–110. https://doi.org/10.20885/ijca.vol5.iss2.art5

Rodríguez Muiña, S., Gajjala, R. K. R., Fernández Martín, E., & Del Campo, F. J. (2025). Gamma correction and color space transformations for quantitative analysis of Electrochemiluminescence images using smartphone cameras. *Chemical & Biomedical Imaging*, *3*(11), 767–778.

Sarkar, D., Sheikh, A. A., Batabyal, K., & Mandal, B. (2014). Boron estimation in soil, plant, and water samples using spectrophotometric methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *45*(11), 1538–1550.

Sasidharanpillai, S., Cox, J. S., Pye, C. C., & Tremaine, P. R. (2023). A Raman spectroscopic and ab initio investigation of aqueous boron speciation under alkaline hydrothermal conditions: evidence for the structure and thermodynamic stability of the diborate ion. *Dalton Transactions*, *52*(48), 18391–18406. https://doi.org/10.1039/D3DT02514D

Setyawati, A. (2019). Analysis methods verification of boron in river water using the UV-Vis spectrophotometer with curcumin complex as alternative practical educations. *IJCER (International Journal of Chemistry Education Research)*, 60–65.

Shi, S., Jiang, Y., Ji, Q., Xing, Y., Ma, X., & Xia, Y. (2023). Multi-crosslinked, ecofriendly flame-retardant starch-based composite aerogels with high compression-resistance. *Polymer Engineering & Science*, *63*(1), 154–166.

Tan, X., Zhou, R., Feng, Y., & Liang, T. (2023). In-depth method investigation for determination of boron in silicate samples using an improved boron–mannitol complex digestion method by ICP-MS. *Molecules*, *28*(1), 441. https://doi.org/10.3390/molecules28010441

Tanpichai, S., Phoothong, F., & Boonmahitthisud, A. (2022). Superabsorbent cellulose-based hydrogels cross-linked with borax. *Scientific Reports*, *12*(1), 8920. https://doi.org/10.1038/s41598-022-12688-2

Thangavel, S., Dhavile, S. M., Dash, K., & Chaurasia, S. C. (2004). Spectrophotometric determination of boron in complex matrices by isothermal distillation of borate ester into curcumin. *Analytica Chimica Acta*, *502*(2), 265–270.

van den Berg, R., Peters, J. A., & van Bekkum, H. (1994). The structure and (local) stability constants of borate esters of mono- and di-saccharides as studied by ^{11}B and ^{13}C NMR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, *253*, 1–12. https://doi.org/10.1016/0008-6215(94)80050-2

Wang, Y. J., Pan, M. H., Cheng, A. L., Lin, L. I., Ho, Y. S., Hsieh, C. Y., & Lin, J. K. (1997). Stability of curcumin in buffer solutions and characterization of its degradation products. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *15*(12), 1867–1876. https://doi.org/10.1016/S0731-7085(96)02024-9

Woolf, M. S., Dignan, L. M., Scott, A. T., & Landers, J. P. (2021). Digital postprocessing and image segmentation for objective analysis of colorimetric reactions. *Nature Protocols*, *16*(1), 218–238. https://doi.org/10.1038/s41596-020-00413-0