

MOLECULARLY IMPRINTED POLYMER (MIP) SEBAGAI MATERIAL SELEKTIF PADA SENSOR VOLTAMETRI UNTUK ANALISIS RESIDU ANTIBIOTIK DALAM MATRIKS PANGAN

Andi Eka Kartika^{1*}, Nur Afni¹

¹Jurusan Kimia, Universitas Negeri Makassar, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: 17, September, 2025
Accepted: 21, Oktober, 2025
Published: 30, Oktober, 2025

KEYWORD

Molecularly Imprinted Polymer; Sensor Voltametri; Residu Antibiotik; Pangan; Nanomaterial

Molecularly Imprinted Polymer; Voltammetric Sensor; Antibiotic Residues; Food Safety; Nanomaterials

Keywords: Terdiri atas 3 sampai 5 kata dan/atau kelompok kata.

CORRESPONDING AUTHOR

Nama : Andi Eka Kartika
Address: Jalan Sukaria 1A
E-mail : andi.eka.kartika@unm.ac.id
No. Tlp : +6285298770060

ABSTRACT

Molecularly Imprinted Polymer (MIP) merupakan material selektif yang semakin berkembang dalam teknologi sensor voltametri untuk mendeteksi residu antibiotik pada matriks pangan. Kompleksitas pangan, tingginya kebutuhan deteksi cepat, dan keterbatasan metode konvensional mendorong penggunaan MIP sebagai alternatif yang stabil, sensitif, dan berbiaya rendah. Artikel ini bertujuan meninjau prospek dan tantangan penggunaan MIP pada sensor voltametri untuk analisis residu antibiotik dalam berbagai jenis pangan. Objek kajian meliputi prinsip kerja MIP, teknik pembuatan, integrasi dengan nanomaterial, serta performanya pada sampel pangan nyata. Metode penelitian menggunakan pendekatan tinjauan pustaka terhadap publikasi terkini yang membahas sintesis, karakterisasi, dan aplikasi sensor berbasis MIP. Hasil kajian menunjukkan bahwa MIP mampu meningkatkan selektivitas, sensitivitas, serta kestabilan sensor, terutama ketika dikombinasikan dengan nanomaterial konduktif dan teknik fabrikasi modern seperti elektropolimerisasi atau surface imprinting. Namun, beberapa tantangan masih ditemukan, antara lain fouling matriks pangan, kesulitan penghilangan template secara sempurna, interferensi analit analog, serta kurangnya standarisasi fabrikasi yang berdampak pada reproduktibilitas dan komersialisasi. Secara keseluruhan, MIP memiliki prospek besar sebagai material selektif dalam sensor voltametri untuk deteksi cepat residu antibiotik, namun diperlukan inovasi berkelanjutan pada aspek sintesis, validasi, dan integrasi perangkat agar teknologi ini dapat diaplikasikan secara luas dalam pengawasan keamanan pangan.

Molecularly Imprinted Polymer (MIP) has emerged as a promising selective material in voltammetric sensor technology for detecting antibiotic residues in food matrices. The complexity of food samples, the demand for rapid detection, and the limitations of conventional methods have driven the development of MIP as a stable, sensitive, and cost-effective alternative. This article aims to review the prospects and challenges of applying MIP-based voltammetric sensors for antibiotic residue analysis in various food products. The objects of review include the working principles of MIP, fabrication techniques, nanomaterial integration, and sensor performance in real food samples. The study employs a literature review approach focusing on recent publications discussing the synthesis, characterization, and application of MIP-based sensors. The results indicate that MIP enhances sensor selectivity, sensitivity, and stability, particularly when combined with conductive nanomaterials and advanced fabrication methods such as electropolymerization or surface imprinting. However, several challenges remain, including food-matrix fouling, incomplete template removal, interference from structural analogs, and the lack of standardized fabrication procedures that affect reproducibility and commercialization. Overall, MIP shows strong potential as a selective material for voltammetric sensors in the rapid detection of antibiotic residues, yet continuous innovation in synthesis, validation, and device integration is required to enable its broader application in food safety monitoring.

PENDAHULUAN

Antibiotik merupakan kelompok senyawa antimikroba yang secara luas digunakan dalam bidang kesehatan manusia, peternakan, akuakultur, dan pertanian untuk mencegah serta mengobati infeksi bakteri. Peningkatan penggunaan antibiotik yang tidak terkontrol dalam beberapa dekade terakhir menyebabkan tingginya akumulasi residu antibiotik pada berbagai pangan seperti susu, daging, telur. Keberadaan residu antibiotik pada tingkat tertentu tidak hanya berpotensi menimbulkan efek toksik terhadap manusia dan organisme lainnya, tetapi juga berkontribusi terhadap munculnya resistensi antimikroba (*antimicrobial resistance*, AMR), sebuah isu kesehatan global yang semakin mengkhawatirkan (Manyi-Loh et al., 2018; Sadighara et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan metode analitik yang cepat, sensitif, selektif dan mudah diterapkan untuk mendeteksi dan memantau keberadaan antibiotik pada konsentrasi yang sangat rendah dalam matriks pangan yang kompleks.

Berbagai teknik analisis telah dikembangkan untuk mendeteksi residu antibiotik, seperti kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC), kromatografi cair-spektrometri massa (LC-MS), dan spektrofotometri. Meskipun memiliki sensitivitas yang tinggi, metode konvensional tersebut membutuhkan peralatan yang mahal, prosedur preparasi sampel yang kompleks, serta tidak praktis untuk analisis di lapangan (Abdelshakour et al., 2022; Kalyani et al., 2020). Sebagai alternatif yang menjanjikan, teknik elektroanalitik khususnya voltametri menawarkan keunggulan seperti instrumentasi yang relatif sederhana, waktu analisis cepat, kemampuan miniaturisasi, dan potensi integrasi ke dalam perangkat *portable* (Hobeika et al., 2025). Namun, tantangan utama dalam penggunaan sensor voltametri adalah rendahnya selektivitas terhadap target antibiotik ketika berada dalam matriks kompleks yang mengandung banyak senyawa interferen (Masood et al., 2024).

Molecularly Imprinted Polymer (MIP) menjadi solusi menarik untuk meningkatkan performa sensor voltametri. MIP merupakan material polimer yang dirancang memiliki situs pengenalan molekul (*recognition sites*) yang sangat spesifik terhadap target tertentu melalui proses pencetakan molekuler. Integrasi MIP ke permukaan elektroda voltametri mampu meningkatkan selektivitas, sensitivitas, serta ketahanan sensor terhadap gangguan matriks (Wang et al., 2022; Zhang et al., 2025). Berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa sensor berbasis MIP berhasil mendeteksi berbagai kelas antibiotik seperti fluoroquinolone (Wang et al., 2022), β -laktam (Jamieson et al., 2019), tetrasiklin (Sun et al., 2025), makrolida (Ayankojo et al., 2020), dan sulfonamide (Yu et al., 2024) pada konsentrasi jejak (*trace levels*) dalam sampel pangan.

Review ini disusun untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai peran MIP dalam pengembangan sensor voltametri untuk deteksi antibiotik dalam matriks pangan. Pembahasan mencakup prinsip dasar teknik voltametri dan teknologi MIP, strategi integrasi MIP pada elektroda sensor, capaian kinerja sensor dari berbagai studi terbaru, serta tantangan dan prospek pengembangan di masa mendatang.

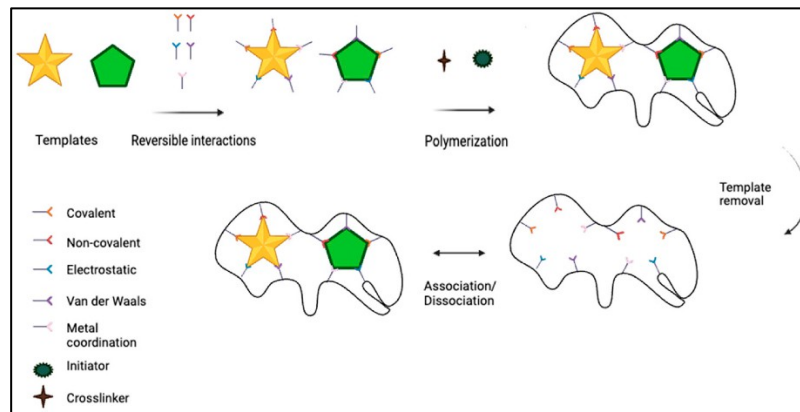
METODE

Metode penulisan artikel ini menggunakan pendekatan *narrative literature review* dengan menelusuri berbagai publikasi ilmiah yang relevan terkait penggunaan *Molecularly Imprinted Polymer* (MIP) dalam pengembangan sensor voltametri untuk deteksi antibiotik pada matriks pangan. Pencarian literatur dilakukan melalui database Scopus, ScienceDirect, Web of Science, PubMed, dan Google Scholar dengan kata kunci "*MIP sensor*", "*voltammetry*", "*electrochemical detection*", "*antibiotics*", "*food samples*". Artikel yang dipilih adalah publikasi tahun 2015-2025 yang pengembangan sensor elektrokimia berbasis MIP untuk deteksi antibiotik yang menyajikan data kinerja dalam sampel nyata (*real samples*). Artikel *review* dan penelitian yang membahas analit lain atau teknik deteksi non-voltametri dieksklusi. Data yang lolos seleksi kemudian diekstraksi, meliputi desain sensor, teknik voltametri yang digunakan, dan parameter analitik kunci (LOD, selektivitas, dan matriks uji). Tahap akhir melibatkan analisis kualitatif dan kritis terhadap data yang terekstraksi untuk mengevaluasi secara sistematis efektivitas desain sensor dalam mengatasi tantangan *matrix effect* dan mengidentifikasi tren serta prospek masa depan teknologi ini.

HASIL & PEMBAHASAN

Prinsip Dasar dan Desain Sensor MIP-Voltammetri

Molecularly Imprinted Polymer (MIP) merupakan material polimer dengan situs pengenalan selektif yang dibentuk melalui proses *template imprinting*. Pada tahap awal, molekul target berupa antibiotik diinteraksikan dengan monomer fungsional seperti metakrilat asam (MAA), anilin, atau 4-vinylpyridine, membentuk kompleks pra-polimerisasi melalui ikatan hidrogen, interaksi elektrostatis, atau gaya van der Waals. Campuran ini kemudian ditambahkan cross-linker, misalnya ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) atau trimethylolpropane trimethacrylate, untuk memberikan struktur polimer yang stabil dan kaku. Setelah proses polimerisasi berlangsung, molekul template (antibiotik) dikeluarkan melalui pencucian, meninggalkan rongga spesifik yang memiliki ukuran, bentuk, dan distribusi gugus kimia yang komplementer terhadap target. Rongga ini berfungsi sebagai situs pengikat selektif yang memungkinkan MIP mengenali target yang sama secara sangat spesifik (Zhao et al., 2023).



Gambar 1. Prosedur preparasi MIP serta berbagai jenis interaksi antara template (analisis) dan MIP (Agar et al., 2025).

Dalam desain sensor elektrokimia, MIP berfungsi sebagai lapisan pengenalan selektif pada permukaan elektroda kerja. Lapisan ini bertindak sebagai filter molekuler yang hanya memungkinkan molekul antibiotik target terperangkap dan berinteraksi secara elektrokimia dan meminimalkan interferensi dari komponen molekul lainnya. Mekanisme ini penting dalam menanggulangi masalah *matrix effect* yang umum terjadi pada sampel kompleks (Elugoke et al., 2021). Elektroda kerja yang umum digunakan dalam pengembangan sensor berbasis MIP-voltammetri yaitu *Glassy Carbon Electrode* (GCE) dan *Screen-Printed Electrode* (SPE) karena memiliki konduktivitas listrik yang baik, stabilitas elektrokimia tinggi, serta mudah dimodifikasi pada permukaannya (Prakash, 2024). Terdapat beberapa teknik yang dapat digunakan untuk mengintegrasikan MIP ke permukaan elektroda (Rosslan et al., 2022).

Salah satu metode yang sering digunakan adalah *bulk polymerization*, yaitu sintesis MIP dalam jumlah besar untuk menghasilkan polimer dalam bentuk partikel mikro atau nano. Partikel ini kemudian dilekatkan pada permukaan elektroda menggunakan binder atau material pelapis konduktif. Metode ini relatif sederhana dan memungkinkan produksi MIP dalam skala besar, namun ketebalan lapisan MIP pada elektroda sulit dikontrol secara presisi. Metode lainnya adalah *surface imprinting*, yaitu proses pencetakan molekuler yang dilakukan langsung pada permukaan elektroda. Teknik ini menghasilkan lapisan polimer yang lebih tipis, homogen, dan terikat kuat dengan substrat elektroda, sehingga dapat mengurangi hambatan transfer massa dan meningkatkan aksesibilitas rongga pengenalan terhadap molekul target. Metode yang dianggap paling efisien dan banyak digunakan adalah *electropolymerization*. Pada teknik ini, polimer MIP dibentuk langsung di permukaan elektroda melalui proses elektrokimia dengan pengaturan tegangan atau arus tertentu. *Electropolymerization* memungkinkan kontrol yang sangat baik terhadap ketebalan dan morfologi lapisan MIP, serta menghasilkan film yang tipis dan seragam. Karakteristik ini meningkatkan transfer elektron dan secara signifikan memperbaiki sensitivitas sensor. Setelah proses *imprinting* selesai dan molekul analit dihilangkan, elektroda yang telah dimodifikasi memiliki situs pengenalan spesifik yang mampu menangkap molekul target, sehingga menghasilkan perubahan sinyal voltametri yang dapat diukur dengan presisi.

Untuk meningkatkan performa analitik sensor MIP-voltammetri, nanomaterial sering digunakan sebagai komponen komposit pada lapisan MIP. Nanomaterial seperti *graphene*, *reduced*

graphene oxide (rGO), dan *carbon nanotubes* (CNT) memiliki peran penting karena mampu memperbesar luas permukaan aktif elektroda dan meningkatkan konduktivitas listrik. Peningkatan ini membuat proses transfer elektron berlangsung lebih efisien, sehingga sinyal elektrokimia yang dihasilkan menjadi lebih kuat, stabil, dan sensitif terhadap keberadaan analit target. Sebagai contoh, dalam sebuah studi oleh Shao et al., (2023) mengembangkan sensor MIP permukaan menggunakan struktur mesoporous TiO₂ magnetik (Fe₃O₄@SiO₂@mTiO₂) sebagai material pendukung, yang kemudian dikombinasikan dengan rGO pada elektroda *Glassy Carbon* (GCE). Integrasi ini menghasilkan luas permukaan yang besar dan jalur konduksi elektron yang optimal, sekaligus memungkinkan pemuatan MIP yang lebih efisien. Sensor tersebut mampu mendeteksi klorotetrasiklin dalam sampel susu dengan limit deteksi yang sangat rendah, yaitu $9,16 \times 10^{-10}$ M.

Di sisi lain, nanomaterial logam seperti AuNP (partikel emas) juga digunakan untuk meningkatkan transfer elektron dan efek katalitik. Misalnya, sensor berbasis *Laser-Induced Graphene* (LIG) telah dimodifikasi dengan AuNP dan MIP untuk mendeteksi tetrasiklin pada daging dan susu. Dalam studi tersebut, AuNP meningkatkan kemampuan transfer elektron dan bersama-sama dengan rongga MIP meningkatkan sensitivitas, sehingga sensor memperoleh *limit of detection (LOD)* 0,85 nM pada sampel susu (Abera et al., 2021).

Selain itu, ada contoh lain dari sensor elektrokimia MIP di mana *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) digabungkan dengan *graphene quantum dots* (GQDs) untuk mendeteksi antibiotik sulfamethazine dalam air laut akuakultur. Penelitian Chen et al., (2025) melaporkan bahwa modifikasi MWCNTs/GQDs pada GCE meningkatkan konduktivitas dan luas permukaan elektroda, dan kemudian MIP dideposisi melalui elektropolimerisasi. Sensor tersebut menunjukkan linearitas yang baik dan LOD 0,068 μ M, serta aplikasi nyata. Keunggulan utama dari integrasi MIP dan nanomaterial tersebut adalah sinergi selektivitas tinggi dari MIP (karena rongga cetakannya) dengan sensitivitas tinggi dari nanomaterial (karena konduktivitas dan luas permukaan besar). Struktur komposit seperti *GCE/rGO/MIP* atau *GCE/MWCNT/MIP* dapat menurunkan batas deteksi (LOD) antibiotik secara signifikan dan meningkatkan reproduktibilitas sinyal sensor, bahkan pada sampel kompleks seperti makanan.

Aplikasi Sensor MIP-Voltammetri untuk Deteksi Antibiotik

Berbagai penelitian telah memanfaatkan kombinasi MIP sebagai elemen pengenalan selektif dan teknik voltammetri sebagai metode transduksi sinyal untuk mencapai batas deteksi rendah serta ketahanan terhadap gangguan matriks kompleks. Tabel 1 merangkum sejumlah studi terbaru yang menerapkan sensor MIP-voltammetri untuk berbagai antibiotik. Ringkasan ini memberikan gambaran komprehensif mengenai kemajuan teknologi sensor berbasis MIP serta potensi aplikasinya dalam pemantauan keamanan pangan.

Prospek dan Tantangan

Penggunaan *Molecularly Imprinted Polymer* (MIP) sebagai material selektif pada sensor voltammetri telah menjadi pendekatan yang sangat menjanjikan dalam deteksi residu antibiotik pada matriks pangan. MIP menawarkan keunggulan berupa selektivitas tinggi, kestabilan kimia yang baik, biaya sintesis yang rendah, serta kompatibilitas dengan berbagai teknik elektrokimia. Berbeda dengan antibodi atau enzim yang rentan terhadap kondisi lingkungan, MIP mampu mempertahankan struktur dan fungsi pengenalnya pada rentang pH, temperatur, dan pelarut yang luas (Ayerdurai et al., 2024; Mittas et al., 2023). Hal ini menjadikan MIP sangat cocok untuk diterapkan pada pemantauan keamanan pangan, di mana sampel sering mengandung komponen mengganggu seperti lemak, protein, dan polisakarida. Dari sisi prospek, integrasi MIP dengan material nanostruktur seperti *graphene*, *nanotube*, dan nanopartikel logam secara signifikan meningkatkan sensitivitas dan batas deteksi sensor voltammetri (Jafari et al., 2019; Wu et al., 2023). Penggabungan tersebut memperluas luas permukaan aktif, meningkatkan transfer elektron, dan memperkuat sinyal elektrokimia sehingga memungkinkan deteksi antibiotik pada level jejak. Selain itu, kemajuan dalam teknik fabrikasi seperti elektropolimerisasi, *surface imprinting*, dan *bulk polymerization* memungkinkan pembentukan situs pengenalan yang lebih homogen dan berada dekat dengan permukaan elektrode, sehingga mempercepat difusi analit dan meningkatkan respons sensor (Abera et al., 2021; Geng et al., 2023). Prospek lainnya meliputi miniaturisasi perangkat menjadi sensor portabel, perangkat *point-of-care*, dan integrasi dengan sistem mikrofuidik atau platform smartphone untuk monitoring cepat di lapangan (Cai & Xie, 2020).

Tabel 1. Aplikasi Sensor Voltametri Berbasis Nanomaterial untuk Deteksi Antibiotik

Antibiotik	Jenis Elektroda	Teknik MIP (monomer)	Material Nanokomposit / Modifikasi Pendukung	Metode Voltametri	Kinerja Sensor	Jenis Sampel	Referensi
Tetracycline (TC)	Laser-induced graphene (LIG)	Elektropolimerisasi (oPD)	AuNP	DPV	LOD: 0,85 nM (susu) 0,80 nM (daging)	Susu, Daging	(Abera et al., 2021)
Chloramphenicol	Elektroda Karbon Kaca (GCE)	<i>Surface molecular imprinting</i>	SnS ₂ nanoflowers, NiFe-Prussian Blue Analog (NiFe-PBA), SiO ₂ -COOH@MIP	DPV	3.3×10^{-9} g/L	Susu	(Geng et al., 2023)
Chloramphenicol	Elektroda Karbon Kaca (GCE)	Elektropolimerisasi (Arginine)	-	DPV	LOD: $1,36 \times 10^{-13}$ M	Madu	(Lai et al., 2023)
Sulfanilamide	Elektroda Komposit Grafit-Epoksi Magneto	<i>Bulk polymerization</i> berbasis <i>non-covalent imprinting</i> (APTES)	Nanopartikel Fe ₃ O ₄ @SiO	DPV	LOD: 3×10^{-9} M	Susu	(Wasid Ullah Khan and Zaheen Ullah Khan, 2019)
Enrofloxacin	Elektroda Karbon Kaca (GCE)	Elektropolimerisasi (pyrrole)	MWCNT-COOH-RGO	SWV	LOD: 2.5×10^{-11} M	Telur	(Wu et al., 2023)
Cloxacillin	Elektroda Cetak Layar (SPE)	<i>Bulk polymerization</i> (MAA)	Graphene Oxide (GO) + Gold Nanoparticles (AuNPs)	DPV	LOD: 36 nM	Susu	(Jafari et al., 2019)
Kanamycin (KAN)	Elektroda Karbon Kaca (GCE)	Elektropolimerisasi (pyrrole)	Graphene Oxide (GO)	DPV	5 nM	Susu	(Işık et al., 2021)
Tobramycin	Elektroda Emas Cetak Layar (Au-SPE)	Elektropolimerisasi (polyaniline PANI)	Nanopartikel Perak (AgNPs)	DPV	1.9 pg mL^{-1}	Daging ayam, daging sapi, daging kalkun, telur ayam, dan susu	(War et al., 2025)
Amoxicillin	Elektroda Pasta Kaca	Polimerisasi Presipitasi (AAM)	Nanopartikel Magnetic (MNPs)	SWV	$0.75 \text{ }\mu\text{M}$	Susu skim	(López et al., 2021)
Lincomycin	Elektroda Karbon Kaca (GCE)	Elektropolimerisasi (3-APBA)	Au nanoparticles (AuNPs) + ANI	DPV	1.0×10^{-12} M	Susu (milk), jus apel, jus jeruk	(Budak et al., 2025)
Streptomisin	Elektroda Karbon Kaca (GCE)	Elektropolimerisasi (APBA + Anilin)	GO/Chitosan	DPV	2.54×10^{-13} M	Susu	(Li et al., 2023)
Sulfanilamide	Elektroda Karbon Kaca (GCE)	Polimerisasi Presipitasi	Graphene Oxide (GO)	SWV	Linearitas: 10 to 1000 ng mL^{-1}	Susu	(Wei et al., 2017)

Namun, meskipun prospeknya sangat besar, terdapat sejumlah tantangan penting yang masih membatasi pemanfaatan luas MIP dalam analisis residu antibiotik pada pangan. Salah satu tantangan utama adalah kompleksitas matriks pangan yang dapat memicu fouling permukaan elektrode, sehingga mengurangi sensitivitas dan memperpendek umur pakai sensor (Bou-Maroun, 2023). Tantangan lainnya adalah keterbatasan replikasi situs cetakan yang benar-benar spesifik terhadap target, terutama ketika struktur antibiotik sangat mirip dengan analog atau metabolitnya. Hal ini dapat menyebabkan penurunan faktor imprinting dan munculnya sinyal tumpang tindih. Reproduksi antar-batch MIP juga sering menjadi kendala, karena polimerisasi dapat dipengaruhi oleh kondisi minor seperti suhu, rasio monomer–template, dan jenis pelarut (Subramanian, 2026).

Selain itu, banyak penelitian MIP hanya dilakukan pada kondisi laboratorium dengan matriks sederhana, sehingga validasi dan penerapan nyata pada sampel pangan kompleks masih terbatas. Proses *template removal* yang tidak sempurna juga dapat meninggalkan residu dalam struktur polimer, menyebabkan sinyal positif palsu atau interaksi kompetitif dengan analit. Tantangan tambahan adalah belum adanya standar metode fabrikasi dan karakterisasi MIP secara universal, sehingga sulit melakukan perbandingan antar penelitian dan mengembangkan sensor yang dapat dikomersialkan (Fu et al., 2025; Lorenzo et al., 2011)

Secara keseluruhan, *Molecularly Imprinted Polymer* memiliki prospek yang sangat cerah sebagai material selektif yang mendukung sensitivitas dan selektivitas sensor voltametri untuk analisis residu antibiotik dalam pangan. Namun, pengembangan ke depan harus difokuskan pada peningkatan kestabilan di matriks kompleks, standarisasi proses sintesis, peningkatan reproduktibilitas, serta integrasi dengan platform portabel dan teknologi digital. Dengan mengatasi tantangan-tantangan ini, MIP berpotensi besar menjadi komponen utama dalam teknologi deteksi cepat, murah, dan akurat untuk menjamin keamanan pangan di masa mendatang.

KESIMPULAN

Penggunaan *Molecularly Imprinted Polymer* (MIP) pada sensor voltametri merupakan teknologi yang sangat menjanjikan untuk mendeteksi residu antibiotik dalam matriks pangan. MIP berfungsi sebagai material selektif dengan situs pengenalan yang spesifik, memberikan keunggulan berupa selektivitas tinggi, stabilitas kimia yang baik, dan biaya sintesis yang rendah, sekaligus efektif mengatasi tantangan *matrix effect*. Integrasi MIP dengan nanomaterial konduktif (seperti *graphene* atau nanopartikel logam) secara signifikan meningkatkan sensitivitas dan batas deteksi (LOD) sensor, terutama ketika dikombinasikan dengan teknik fabrikasi modern seperti elektropolimerisasi. Meskipun demikian, penerapan luas teknologi ini masih dibatasi oleh beberapa tantangan, termasuk *fouling* permukaan elektroda akibat matriks pangan yang kompleks, kesulitan dalam mencapai reproduktibilitas antar-batch, serta kurangnya standarisasi metode fabrikasi secara universal. Secara keseluruhan, MIP memiliki prospek besar sebagai material utama dalam teknologi deteksi cepat dan portabel untuk menjamin keamanan pangan, namun diperlukan inovasi berkelanjutan pada aspek sintesis, validasi di matriks nyata, dan integrasi perangkat untuk mengatasi tantangan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelshakour, M. A., Mostafa, A. E., Hadad, G. M., Hamed, D. M., El-Darder, O. M., El-Gindy, A., Khinkar, R. M., Aldurdunji, M. M., Murshid, S. S., & Abdel Salam, R. A. (2022). Experimental Design Assisted HPLC/UV and LC-MS/MS for Simultaneous Determination of Selected Veterinary Antibiotics in Broiler Chicken. *Separations*, 9(12), 427. <https://doi.org/10.3390/separations9120427>

Abera, B. D., Ortiz-Gómez, I., Shkodra, B., J. Romero, F., Cantarella, G., Petti, L., Salinas-Castillo, A., Lugli, P., & Rivadeneyra, A. (2021). Laser-Induced Graphene Electrodes Modified with a Molecularly Imprinted Polymer for Detection of Tetracycline in Milk and Meat. *Sensors*, 22(1), 269. <https://doi.org/10.3390/s22010269>

Agar, M., Laabei, M., Leese, H. S., & Estrela, P. (2025). Multi-Template Molecularly Imprinted Polymeric Electrochemical Biosensors. *Chemosensors*, 13(1), 11. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13010011>

Ayankojo, A. G., Reut, J., Ciocan, V., Öpik, A., & Syritski, V. (2020). Molecularly imprinted polymer-

based sensor for electrochemical detection of erythromycin. *Talanta*, 209, 120502. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120502>

Ayerdurai, V., Lach, P., Lis-Cieplak, A., Cieplak, M., Kutner, W., & Sharma, P. S. (2024). An advantageous application of molecularly imprinted polymers in food processing and quality control. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(11), 3407–3440. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2132208>

Bou-Maroun, E. (2023). Carbon Electrode Modified with Molecularly Imprinted Polymers for the Development of Electrochemical Sensor: Application to Pharmacy, Food Safety, Environmental Monitoring, and Biomedical Analysis. *Chemosensors*, 11(11), 548. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11110548>

Budak, F., Cetinkaya, A., Unal, M. A., & Ozkan, S. A. (2025). Design of molecularly imprinted polymer based electrochemical sensor for eco-friendly, selective, and sensitive determination of lincomycin in food samples. *Food Chemistry*, 488, 144883. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144883>

Chen, J., Zhang, T., Xu, Y., Li, H., Cui, H., Zhao, X., Zhou, Y., Qu, K., & Cui, Z. (2025). Molecularly Imprinted Electrochemical Sensor Based on MWCNTs/GQDs for the Detection of Sulfamethazine in Aquaculture Seawater. *Biosensors*, 15(3), 184. <https://doi.org/10.3390/bios15030184>

Elugoke, S. E., Adekunle, A. S., Fayemi, O. E., Akpan, E. D., Mamba, B. B., Sherif, E. M., & Ebenso, E. E. (2021). Molecularly imprinted polymers (MIPs) based electrochemical sensors for the determination of catecholamine neurotransmitters – Review. *Electrochemical Science Advances*, 1(2). <https://doi.org/10.1002/elsa.202000026>

Fu, Q.-B., Sun, X., Liu, L., Zhao, R.-S., & Wang, X. (2025). Current Progress of Molecularly Imprinted Polymers for Emerging Pollutants Analysis in Food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(40), 25103–25127. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c04772>

Geng, L., Liu, M., Huang, J., Li, F., Zhang, Y., Guo, Y., & Sun, X. (2023). Novel Dual-Signal SiO₂-COOH@MIPs Electrochemical Sensor for Highly Sensitive Detection of Chloramphenicol in Milk. *Sensors*, 23(3), 1346. <https://doi.org/10.3390/s23031346>

Hobeika, E., Saab, J., Hallit, S., Morales Frias, I.-A., Jaffrezic-Renault, N., & Errachid, A. (2025). Enhancing antibiotic detection via an aptasensor: the case of ciprofloxacin. *BMC Chemistry*, 19(1), 77. <https://doi.org/10.1186/s13065-025-01425-1>

Işık, D., Şahin, S., Caglayan, M. O., & Üstündağ, Z. (2021). Electrochemical impedimetric detection of kanamycin using molecular imprinting for food safety. *Microchemical Journal*, 160, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105713>

Jafari, S., Dehghani, M., Nasirizadeh, N., Baghersad, M. H., & Azimzadeh, M. (2019). Label-free electrochemical detection of Cloxacillin antibiotic in milk samples based on molecularly imprinted polymer and graphene oxide-gold nanocomposite. *Measurement*, 145, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.068>

Jamieson, O., Soares, T. C. C., de Faria, B. A., Hudson, A., Mecozzi, F., Rowley-Neale, S. J., Banks, C. E., Gruber, J., Novakovic, K., Peeters, M., & Crapnell, R. D. (2019). Screen Printed Electrode Based Detection Systems for the Antibiotic Amoxicillin in Aqueous Samples Utilising Molecularly Imprinted Polymers as Synthetic Receptors. *Chemosensors*, 8(1), 5. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8010005>

Kalyani, K., Radha, K., Kumar, S. V. S., & Vasu, P. (2020). Review on Bioanalytical Methods for Determination of Cephalosporins by Using HPLC and LC-MS Abstract : 15(4), 35–50. <https://doi.org/10.9790/3008-1504013550>

Lai, T., Shu, H., Yao, B., Lai, S., Chen, T., Xiao, X., & Wang, Y. (2023). A Highly Selective

Electrochemical Sensor Based on Molecularly Imprinted Copolymer Functionalized with Arginine for the Detection of Chloramphenicol in Honey. *Biosensors*, 13(5), 505. <https://doi.org/10.3390/bios13050505>

Li, Z., Zhang, R., Niu, H., Chen, X., Wang, Y., Li, F., Gao, H., Yu, H., Yuan, Y., Yin, Y., & Li, D. (2023). Biomimetic imprinted electrochemical sensor for selective detection of streptomycin residue in milk. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(9), 100266. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100266>

López, R., Khan, S., Wong, A., Sotomayor, M. del P. T., & Picasso, G. (2021). Development of a New Electrochemical Sensor Based on Mag-MIP Selective Toward Amoxicillin in Different Samples. *Frontiers in Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.615602>

Lorenzo, R. A., Carro, A. M., Alvarez-Lorenzo, C., & Concheiro, A. (2011). To Remove or Not to Remove? The Challenge of Extracting the Template to Make the Cavities Available in Molecularly Imprinted Polymers (MIPs). *International Journal of Molecular Sciences*, 12(7), 4327–4347. <https://doi.org/10.3390/ijms12074327>

Manyi-Loh, C., Mamphweli, S., Meyer, E., & Okoh, A. (2018). Antibiotic Use in Agriculture and Its Consequential Resistance in Environmental Sources: Potential Public Health Implications. *Molecules*, 23(4), 795. <https://doi.org/10.3390/molecules23040795>

Masood, R., Rahim, A., Wajid, A., Sabahat, S., Ul Haq Khan, Z., Qadeer, A., & Irshadullah, H. (2024). *Electrochemical Sensor for Antibiotic Detection*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1008295>

Mittas, N., Gkika, D. A., Georgiou, K., Alodhayb, A. N., AbdelAll, N., Khouqeer, G. A., & Kyzas, G. Z. (2023). Bibliometric research analysis of molecularly imprinted polymers (MIPs): evidence and research activity dynamics. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(57), 119903–119924. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30752-w>

Prakash, J. (2024). CNT aerogel film based novel approach for development of ultra-sensitive electrochemical sensor platforms with glassy carbon, screen-printed, and interdigitated electrodes. *Discover Electrochemistry*, 1(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s44373-024-00010-w>

Rosslan, A. S., Shakhiah, M. F. M., Amirrudin, F. N. M., Wahab, A. A., Abdullah, F., & Ramlee, M. H. (2022). A Review on Molecularly Imprinted Polymer (MIP) for Electrochemical Sensor Development. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 18(3), 283–294. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v18n3.2252>

Sadighara, P., Rostami, S., Shafaroodi, H., Sarshogi, A., Mazaheri, Y., & Sadighara, M. (2023). The effect of residual antibiotics in food on intestinal microbiota: a systematic review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1163885>

Shao, Y., Zheng, R., Wang, P., Li, Y., Zhao, Z., An, J., Hao, C., & Kang, M. (2023). A novel surface molecularly imprinted polymer electrochemical sensor based on porous magnetic TiO₂ for highly sensitive and selective detection of tetracycline. *Environmental Science: Nano*, 10(6), 1614–1628. <https://doi.org/10.1039/D3EN00091E>

Subramanian, A. (2026). Emerging Trends and Challenges in Molecular Imprinted Polymer-Based Electrochemical and Optical Sensors for Food Safety. *Food Analytical Methods*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s12161-025-02917-5>

Sun, Y., Luo, Y., Wang, H., He, Y., Wang, R., Lu, M., & Xu, D. (2025). Electrochemical detection of tetracycline by zinc oxide modified with molecularly-imprinted polymers. *Analytical Methods*, 17(15), 3027–3035. <https://doi.org/10.1039/D5AY00270B>

Wang, M., Cetó, X., & del Valle, M. (2022). A Sensor Array Based on Molecularly Imprinted Polymers and Machine Learning for the Analysis of Fluoroquinolone Antibiotics. *ACS Sensors*, 7(11), 3318–3325.

<https://doi.org/10.1021/acssensors.2c01260>

War, M., Şen, F., Halvacı, E., Bouchikhi, B., & El Bari, N. (2025). Electrochemical sensor based on molecularly imprinted polymer and voltammetric electronic tongue technology: an efficient strategy for sensitive detection of tobramycin residues. *RSC Advances*, 15(45), 37579–37596. <https://doi.org/10.1039/D5RA03963K>

Wasid Ullah Khan and Zaheen Ullah Khan. (2019). Development of Electrochemical Sensor Based on Magnetic Molecularly Imprinted Polymer Implanted onto a Graphite-Epoxy Composite Electrode for Sulfonamides Recognition. *Modern Chemistry & Applications*, 7(1), 1000265–1000273. <https://doi.org/10.4172/2329-6798.1000265>

Wei, X., Xu, X., Qi, W., Wu, Y., & Wang, L. (2017). Molecularly imprinted polymer/graphene oxide modified glassy carbon electrode for selective detection of sulfanilamide. *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(3), 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.05.001>

Wu, S., Mao, J., Zhang, Y., Wang, S., Huo, M., & Guo, H. (2023). Sensitive electrochemical detection of enrofloxacin in eggs based on carboxylated multi-walled carbon nanotubes-reduced graphene oxide nanocomposites: Molecularly imprinted recognition versus direct electrocatalytic oxidation. *Food Chemistry*, 413, 135579. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135579>

Yu, X., Yang, Y., Shen, Q., Sun, Y., Kang, Q., & Shen, D. (2024). A novel differential ratiometric molecularly imprinted electrochemical sensor for determination of sulfadiazine in food samples. *Food Chemistry*, 434, 137461. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137461>

Zhang, L., Zhao, S., Zhu, J., & Fu, L. (2025). Advances in Molecularly Imprinted Electrochemical Platforms for Food Quality Control: Targeting Antioxidants, Sweeteners, Colorants, Contaminants and Toxicants. *Chemosensors*, 13(11), 398. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13110398>

Zhao, G., Zhang, Y., Sun, D., Yan, S., Wen, Y., Wang, Y., Li, G., Liu, H., Li, J., & Song, Z. (2023). Recent Advances in Molecularly Imprinted Polymers for Antibiotic Analysis. *Molecules*, 28(1), 335. <https://doi.org/10.3390/molecules28010335>