

Pengembangan Material Polimer Cetak Molekul sebagai Elemen Pengenalan Selektif pada Sensor Elektrokimia Meropenem

Development of Molecularly Imprinted Polymer Materials as Selective Recognition Elements for Electrochemical Meropenem Sensors

Herlina Herlina^{1*}, Ahmad Hafizullah Ritonga², Andy Febriady³, Asvia Rahayu⁴, Naomi
Geraldin Sinaga⁵

^{1,2,3,4,5}Institut Kesehatan Medistra Lubuk Pakam,
Jl. Sudirman No. 38 Lubuk Pakam, Deli Serdang, 20512, Indonesia.
Email: herlinalbsz@gmail.com

Abstrak

Meningkatnya resistensi bakteri terhadap antibiotik golongan karbapenem, khususnya meropenem, menuntut pengembangan metode deteksi yang cepat, selektif, dan efisien. Penelitian ini berfokus pada sintesis material polimer cetak molekul (*Molecularly Imprinted Polymer*) berbasis metil metakrilat (MMA) sebagai elemen pengenalan selektif dalam sensor elektrokimia meropenem. Sintesis dilakukan melalui metode polimerisasi ruah dengan menggunakan MMA sebagai monomer fungsional, etilen glikol dimetakrilat (EGDMA) sebagai pengikat silang, dimetil sulfoksida (DMSO) sebagai pelarut, dan benzoil peroksida (BPO) sebagai inisiator. Polimer non-cetak (NPCM) dan polimer cetak molekul (PCM) yang terbentuk selanjutnya melalui tahap ekstraksi template secara bertahap menggunakan asetonitril, metanol–asam asetat, dan metanol–akuabides untuk menghasilkan rongga pengenalan spesifik. Karakterisasi dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan keberhasilan imprinting yang ditandai dengan hilangnya pita khas meropenem serta terbentuknya pori berongga pada PCM. Uji adsorpsi memperlihatkan kapasitas PCM (8,9940 mg/g) lebih tinggi dibandingkan NPCM (3,9904 mg/g) dengan nilai imprinting factor (IF) sebesar 2,25. Uji selektivitas terhadap analit pembeding amoksisilin menghasilkan koefisien selektivitas (α) sebesar 1,06, yang menegaskan adanya kecenderungan pengikatan spesifik terhadap meropenem meskipun relatif rendah. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa PCM berbasis MMA–EGDMA memiliki kemampuan sebagai elemen pengenalan selektif dan berpotensi untuk diintegrasikan ke dalam platform sensor elektrokimia portabel. Dengan demikian, temuan ini tidak hanya memperkuat pengembangan material fungsional dalam bidang kimia polimer, tetapi juga membuka peluang aplikasi nyata dalam pemantauan kadar antibiotik pada sampel klinis maupun lingkungan.

Kata kunci: Polimer Cetak Molekul; Meropenem; Selektivitas; Sensor; *Imprinting Factor*.

Abstract

The rising prevalence of bacterial resistance to carbapenem antibiotics, particularly meropenem, highlights the urgent need for rapid, selective, and efficient detection methods. This study reports the synthesis of molecularly imprinted polymers (MIPs) based on methyl methacrylate (MMA) as selective recognition elements for electrochemical meropenem sensors. Bulk polymerization was employed using MMA as the functional monomer, ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) as the crosslinker, dimethyl sulfoxide (DMSO) as the porogen, and benzoyl peroxide (BPO) as the initiator. Both non-imprinted polymers (NIPs) and molecularly imprinted polymers (MIPs) were prepared, followed by template extraction through sequential washing with acetonitrile, methanol–acetic acid, and methanol–deionized water to generate specific recognition cavities. Characterization using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM) confirmed the success of molecular imprinting, as evidenced by the disappearance of characteristic meropenem bands and the formation of porous cavities in the MIP. Adsorption studies revealed that the MIP exhibited a higher adsorption capacity (8.9940 mg/g) compared to the NIP (3.9904 mg/g), yielding an imprinting factor (IF) of 2.25. Selectivity testing against the competing analyte amoxicillin produced a selectivity coefficient (α) of 1.06, indicating preferential binding toward meropenem despite modest discrimination. These results demonstrate that MMA–EGDMA-based MIPs possess promising potential as

Corresponding author: Herlina, Institut Kesehatan Medistra Lubuk Pakam, Deli Serdang, Indonesia.

E-mail : herlinalbsz@gmail.com

Doi : 10.35451/j884sv81

Received : September 03, 2024. Accepted: October 18, 2025. Published: October 31, 2025

Copyright: © 2025 the Author(s). Creative Commons License This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

selective recognition elements for electrochemical meropenem sensors. The developed material not only contributes to the advancement of functional polymer research but also offers practical opportunities for real-time monitoring of antibiotic levels in clinical and environmental samples.

Keywords: *Molecularly Imprinted Polymer; Meropenem; Selectivity; Sensor; Imprinting Factor*

1. PENDAHULUAN

Fenomena meningkatnya resistensi bakteri terhadap antibiotik telah menjadi isu global dalam bidang kesehatan,[1] khususnya terkait dengan penggunaan antibiotik spektrum luas seperti meropenem. Meropenem merupakan antibiotik golongan karbapenem yang sering digunakan sebagai terapi lini terakhir pada infeksi bakteri multidrug resistant (MDR). Namun, pemantauan konsentrasi meropenem dalam sampel biologis maupun lingkungan masih menghadapi keterbatasan. Metode analisis konvensional, seperti kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC) dan spektrofotometri,[2, 3] meskipun akurat, seringkali membutuhkan instrumen yang mahal, prosedur kompleks, serta waktu analisis yang relatif lama. Kondisi ini mendorong pengembangan metode deteksi yang lebih cepat, selektif, dan efisien. [4,5]

Molecularly Imprinted Polymer (PCM), polimer cetak molekul (PCM) hadir sebagai salah satu pendekatan yang potensial untuk meningkatkan selektivitas sensor. PCM merupakan material polimer yang dirancang dengan “cetakan molekul” spesifik, sehingga mampu mengenali molekul target dengan afinitas tinggi. Dalam penelitian ini, meropenem digunakan sebagai molekul template, sementara metil metakrilat (MMA) dipilih sebagai monomer fungsional. Pemilihan MMA didasarkan pada sifat mekanik dan kestabilannya yang lebih baik dibandingkan asam metakrilat (MAA), sehingga diharapkan menghasilkan polimer yang lebih tahan lama dengan situs pengenalan yang stabil. [6–8]

Penelitian dalam lima tahun terakhir menunjukkan perkembangan signifikan penggunaan polimer cetak molekul (PCM) untuk deteksi antibiotik, termasuk meropenem. Frigoli dkk.[9] menyoroti peran PCM sebagai elemen pengenalan selektif pada sensor elektrokimia, dengan keunggulan stabilitas tinggi, biaya rendah, serta kemudahan integrasi ke berbagai transduser, meskipun tantangan terkait optimasi monomer dan sensitivitas masih perlu diatasi. Studi eksperimental oleh Ma dkk.[10] berhasil mengembangkan *magnetic* PCM berpori (MMIP) berbasis Fe_3O_4 untuk meropenem dengan kapasitas adsorpsi tinggi ($11,49 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), kinetika cepat, serta sifat superparamagnetik yang memudahkan pemisahan, sekaligus menunjukkan kinerja baik pada sampel serum dan air lingkungan. Sementara itu, penelitian oleh Sirumapea dkk.[11] menekankan penerapan MIP berbasis MAA–EGDMA melalui metode polimerisasi ruah pada teknik ekstraksi fase padat (SPE) untuk isolasi meropenem dari plasma darah, dengan hasil yang menjanjikan berupa faktor imprinting (IF) 2,58 dan recovery hingga 78,5%. Secara keseluruhan, literatur tersebut memperkuat bahwa MIP, baik dalam bentuk bulk, magnetic, maupun berbasis SPE, memiliki potensi besar sebagai material fungsional untuk deteksi selektif meropenem, serta menjadi pembanding yang relevan bagi pengembangan PCM berbasis MMA–EGDMA yang diteliti dalam studi ini.

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan penggunaan PCM pada aplikasi sensor, [12–15] sebagian besar berfokus pada molekul obat lain dan belum secara spesifik diarahkan untuk meropenem. Di sinilah terdapat research gap: belum tersedia material PCM yang secara khusus dikembangkan untuk pengenalan meropenem dengan kinerja selektivitas yang terukur. Dari sisi prinsip penelitian ini layak dilakukan dengan ketersediaan bahan dan metode polimerisasi ruah yang sederhana; topik ini menarik dan mengingat urgensi resistensi antibiotik; bersifat baru karena penggantian monomer asam metakrilat (MAA) dengan metil metakrilat (MMA) jarang diterapkan untuk meropenem; etis (ethical) karena dilakukan pada level material sintesis tanpa melibatkan uji hewan/manusia; serta relevan untuk bidang kesehatan, farmasi, dan teknologi sensor.[6, 16, 17]

Hasil pengembangan PCM meropenem dalam penelitian menunjukkan faktor imprinting (IF) yang besar serta koefisien selektivitas yang relatif kecil terhadap beberapa matriks pengganggu lainnya, yang menegaskan keberhasilan cetakan molekul.[18–20] Ke depan, material PCM ini berpotensi diintegrasikan ke dalam platform sensor elektrokimia, seperti sensor berbasis voltametri, potensiometri atau impedansi, untuk menghasilkan metode deteksi meropenem yang cepat, selektif, dan portabel. Dengan demikian, PCM yang dikembangkan bukan hanya

memberikan kontribusi pada pengembangan material fungsional, tetapi juga membuka peluang aplikasi praktis dalam pemantauan kadar antibiotik, baik pada laboratorium klinik maupun surveilans lingkungan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan mengevaluasi material polimer cetak molekul berbasis metil metakrilat (MMA) sebagai elemen pengenalan selektif terhadap meropenem, serta mengkaji kinerjanya melalui uji kapasitas adsorpsi, faktor imprinting, dan selektivitas, sehingga dapat memberikan landasan untuk pemanfaatan lebih lanjut dalam sistem sensor elektrokimia.

2. METODE

Bahan

Bahan yang digunakan berupa larutan prepolimer merupakan campuran dari meropenem trihidrat sebagai template, metilmetakrilat (MMA) sebagai monomer, *ethylene glycol methacrylic acid* (EGDMA) sebagai pengikat silang, dan benzoil peroksida (BPO) sebagai inisiator. Metanol, asetonitril, asam asetat glasial dan dimetil sulfoksida (DMSO), amoksisilin dan aquabides. Seluruh bahan adalah bahan pro analisis.

Alat

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini diantaranya neraca analitik (quattro), peralatan gelas (Pyrex), oven (Sharp), Magnetic stirrer (IKA C-Mag), seperangkat alat Spektrofotometri UV-Vis (GENESYS 150), FTIR (Shimadzu) dan Mikroskop Pemindai Elektron (SEM).

Prosedur

Pembuatan Polimer Non-Cetak (NPCM)

Menyiapkan larutan pra-polimer dengan mencampurkan 2,0 mL DMSO, 0,3 mL MMA, 0,5 mL EGDMA, dan 0,07 g BPO secara berurutan dalam gelas kimia. Larutan dimasukkan ke dalam botol sintesis, ditutup rapat, lalu didinginkan dalam lemari pendingin selama 60 menit. Proses polimerisasi dilakukan dengan pemanasan dalam oven pada suhu 70 °C selama 150 menit hingga terbentuk padatan polimer. Padatan yang dihasilkan merupakan polimer non-cetak (NPCM), kemudian dikarakterisasi dengan SEM dan FTIR. [21, 22]

Pembuatan Polimer Bercetak (PCM)

Menyiapkan larutan pra-polimer dengan mencampurkan 2,0 mL DMSO, 0,3 mL MMA, 0,5 mL EGDMA, dan 0,07 g BPO dalam gelas kimia. Meropenem sebanyak 0,22 g dilarutkan dalam 2,0 mL DMSO, kemudian diaduk dengan stirrer selama 15 menit. Larutan pra-polimer dicampurkan dengan larutan meropenem ke dalam botol sintesis, ditutup rapat, lalu didinginkan dalam lemari pendingin selama 60 menit. Campuran dipanaskan dalam oven pada suhu 70 °C selama 150 menit hingga terbentuk padatan polimer bercetak (PCM). Material PCM yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi dengan SEM dan FTIR. [23]

Penghilangan Template dari PCM

PCM yang terbentuk dicampurkan dengan 10 mL asetonitril dan didiamkan selama 24 jam hingga terjadi sedimentasi. Dilakukan pencucian bertahap, pertama pencucian dengan campuran metanol:asam asetat (87,5:12,5) selama 1 jam, larutan pencuci diperiksa dengan spektrofotometer UV-Vis. Tahap kedua pencucian dengan campuran metanol:akuabides (6 mL:12,5 mL) selama 1 jam, kemudian diperiksa kembali. Terakhir, tahap ketiga pencucian dengan 3 mL metanol selama 20 jam. Efektivitas penghilangan template dievaluasi dengan SEM untuk analisis pori dan FTIR untuk identifikasi gugus fungsional.[11]

Uji Adsorpsi Meropenem

Larutan standar meropenem 100 ppm diencerkan menjadi seri konsentrasi 1, 5, 10, 25, dan 50 ppm untuk pembuatan kurva standar dengan Spektrofotometer UV-Vis. Sebanyak 30 mL larutan meropenem 50 ppm dikontakkan dengan polimer cetak molekul (PCM) dan polimer non-cetak molekul (NPCM) selama 24 jam. Konsentrasi awal (C_0) dan akhir (C_t) ditentukan dengan spektrofotometer UV-Vis. Kapasitas adsorpsi dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = V \frac{(C_0 - C_t)}{m} \dots\dots\dots \text{(Pers. 1)}$$

Keterangan:

Q = kapasitas adsorpsi mgg-1

V = volume larutan analit, mL
 M = massa polimer yang digunakan, mg
 C₀ = konsentrasi awal larutan analit, mgL⁻¹
 C_t = Konsentrasi akhir larutan analit setelah kontak, mgL⁻¹

Uji Selektivitas

Penentuan *Imprinting Factor (IF)* dilakukan dengan cara mengontakkan 30 mL larutan meropenem 50 ppm dikontakkan dengan PCM dan NPCM selama 24 jam. Kapasitas adsorpsi masing-masing polimer ditentukan. Nilai *Imprinting Factor (IF)* dihitung dengan persamaan:

$$IF = \frac{Q_{PCM}}{Q_{NPCM}} \dots\dots\dots(Pers. 2)$$

Keterangan:

IF : *imprinting factor*
 Q_{PCM} : Kapasitas adsorpsi oleh PCM
 Q_{NPCM} : Kapasitas adsorpsi oleh NPCM.

Penentuan Koefisien Selektivitas (α)

Sebanyak 25 mg polimer ditempatkan dalam vial, kemudian dikontakkan dengan larutan meropenem dan amoksisilin. Campuran didiamkan selama 24 jam dengan shaker. Konsentrasi meropenem dan amoksisilin setelah kontak diukur. Koefisien selektivitas dihitung dengan persamaan: [24]

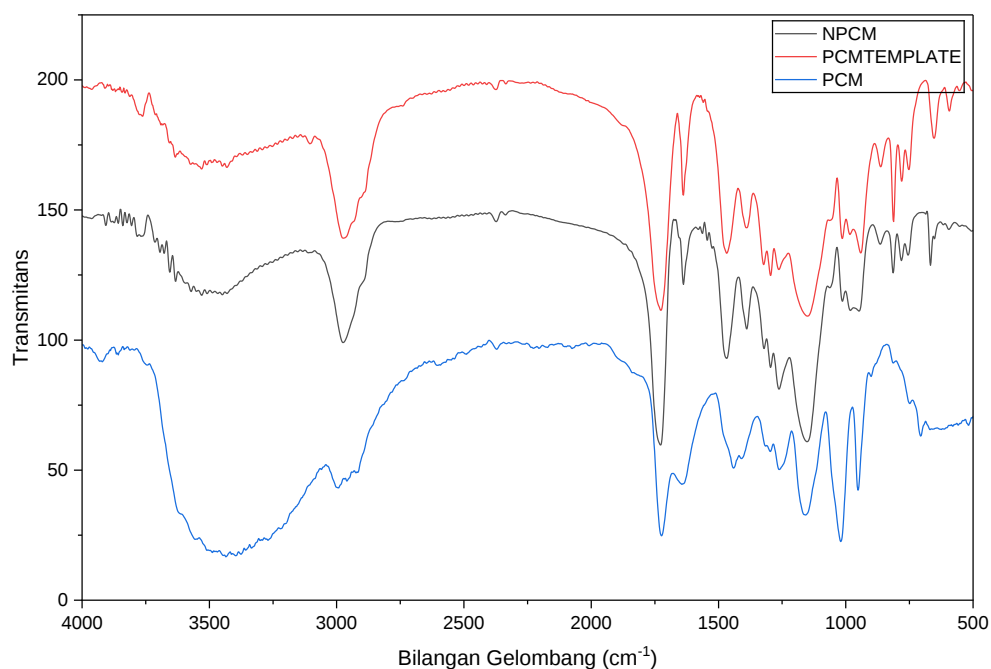
$$\alpha = \frac{Q_{analit}}{Q_{senyawa analog}} \dots\dots\dots(Pers. 3)$$

3. HASIL

Polimer cetakan meropenem (PCM) disintesis menggunakan metode *bulk polymerization* dengan monomer metil metakrilat (MMA) dan etilen glikol dimetakrilat (EGDMA) sebagai pembentuk kerangka polimer. Monomer MMA berperan penting karena memiliki gugus fungsional yang mampu membentuk interaksi, khususnya ikatan hidrogen, dengan molekul cetakan meropenem selama proses polimerisasi.

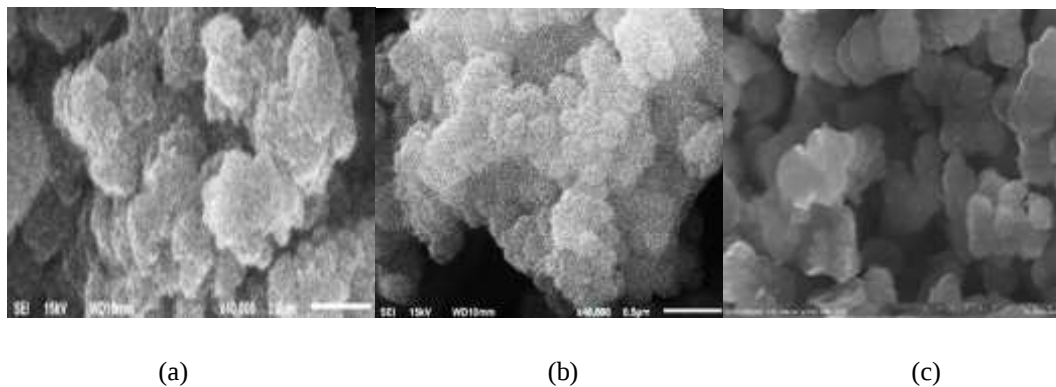
Dalam penelitian ini, disintesis dua jenis material polimer, yaitu *Non-Imprinted Polymer* (NPCM) dan *Molecularly Imprinted Polymer* (PCM). Pada PCM, setelah proses polimerisasi selesai, dilakukan tahap ekstraksi molekul cetakan untuk menghilangkan meropenem yang terperangkap di dalam matriks polimer. Tahap ini bertujuan menghasilkan rongga spesifik yang sesuai secara ukuran, bentuk, dan interaksi kimia dengan molekul meropenem sehingga polimer berfungsi sebagai PCM template.

Sementara itu, NPCM disintesis dengan prosedur yang serupa, namun tanpa penambahan molekul meropenem. Oleh karena itu, NPCM tidak memiliki rongga spesifik yang dapat mengenali meropenem dan berfungsi sebagai kontrol dalam evaluasi kinerja PCM. Kedua jenis polimer tersebut kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR dan SEM untuk memastikan keberhasilan sintesis, keberadaan rongga pengenalan pada PCM, serta membandingkan sifat struktural dan fungsional antara keduanya.



Gambar 1. Hasil karakterisasi FTIR untuk NPCM, PCM dan PCM Template

Spektrum FTIR pada Gambar 1 memperlihatkan perbedaan jelas antara NPCM, PCM, dan PCM setelah ekstraksi template. Pada NPCM hanya tampak pita khas polimer (C=O ester, C-H alifatik, dan C-O-C). Pada PCM sebelum ekstraksi muncul pita tambahan yang berkaitan dengan gugus fungsi meropenem, menandakan adanya interaksi ikatan hidrogen antara monomer MMA dengan molekul template. Setelah ekstraksi, pita khas meropenem berkurang secara signifikan, menegaskan bahwa molekul template berhasil dielusi dan rongga pengenalan spesifik terbentuk dalam polimer.



Gambar 2. Hasil karakterisasi SEM untuk (a) NPCM; (b) PCM; dan (c) PCM template

Analisis morfologi SEM pada Gambar 2, menunjukkan bahwa NPCM memiliki struktur padat dengan porositas rendah, sedangkan PCM menampilkan permukaan lebih kasar akibat adanya molekul template yang masih terperangkap. Setelah ekstraksi, PCM memperlihatkan morfologi berpori dengan cavity yang lebih jelas, sebagai bukti terbentuknya situs pengikatan spesifik yang penting bagi fungsi selektivitas polimer.

Nilai Kapasitas adsorpsi dan IF untuk selektifitas pada konsentrasi larutan meropenem seperti yang terlihat pada Tabel 1:

Tabel 1 Kapasitas Adsorpsi dan nilai IF dari polimer cetakan

Polimer	Co (mg/L)	Ct (mg/L)	Q (mg/g)	IF
PCM	50	5,067	11,9820	
NPCM	50	30,03	26,9595	2,25

Nilai α selektifitas senyawa meropenem terhadap amoksisilin pada konsentrasi 10 ppm

Tabel 2 Penentuan Selektivitas Meropenem terhadap Amoksisilin

Analit	Co (mg/L)	Ct _{NPCM} (mg/L)	Ct _{PCM} (mg/L)	Q _{NPCM} (mg/g)	Q _{PCM} (mg/g)	n _{NPCM} (mg)	n _{PCM} (mg)
Meropenem	50	30.048	5.03	3.9904	8.9940	0.1995	0.4497
Amoksisilin	10	5.896	1.26	0.8208	1.7480	0.0410	0.0874

Uji adsorpsi pada Tabel 1 menunjukkan bahwa PCM memiliki kapasitas pengikatan meropenem sebesar 8,9940 mg/g, jauh lebih tinggi dibanding NPCM sebesar 3,9904 mg/g. Perbandingan keduanya menghasilkan imprinting factor (IF) = 2,25, yang menunjukkan keberhasilan proses imprinting dalam menciptakan situs spesifik dengan afinitas tinggi terhadap meropenem. Pengujian dengan analit pembanding amoksisilin menunjukkan bahwa PCM tetap memiliki preferensi pengikatan terhadap meropenem dengan koefisien selektivitas (α) = 1,06, seperti yang terlihat pada Tabel 2. Nilai ini memang relatif rendah, namun tetap mengindikasikan adanya kecenderungan spesifisitas PCM terhadap target dibanding molekul dengan struktur mirip.

4. PEMBAHASAN

Hasil karakterisasi menggunakan FTIR Gambar 1 menunjukkan adanya perbedaan spektrum antara NPCM, PCM, dan PCM setelah ekstraksi (PCM template). Spektrum NPCM memperlihatkan pita khas polimer berupa serapan kuat pada 1730 cm⁻¹ yang berasal dari gugus karbonil ester (C=O) milik MMA dan EGDMA, pita regangan C–H alifatik pada 2950–2850 cm⁻¹, serta pita C–O–C ester yang muncul pada 1150–1050 cm⁻¹. Spektrum ini merepresentasikan kerangka polimer tanpa kehadiran meropenem sehingga digunakan sebagai kontrol. [11]

Pada PCM sebelum ekstraksi (PCM) teramati perubahan penting. Pita lebar pada 3200–3500 cm⁻¹ muncul lebih jelas, yang dapat dikaitkan dengan vibrasi O–H/N–H dari meropenem serta interaksi ikatan hidrogen dengan monomer MMA. Selain itu, daerah karbonil pada 1750–1700 cm⁻¹ menunjukkan penguatan intensitas dan pembentukan *shoulder* yang tidak tampak pada NPCM, menandakan kontribusi dari gugus karbonil β -laktam dan karboksilat meropenem. Ketiga jenis polimer yang berhasil disintesis tersebut di atas menunjukkan keberadaan gugus khas dari meropenem, yaitu pada daerah serapan 1000 cm⁻¹ yang mengindikasikan adanya ikatan C–N pada cincin β -laktam. Selain itu, pada daerah 800–900 cm⁻¹ terdeteksi puncak yang berkaitan dengan vibrasi ikatan C–C pada cincin β -laktam. Sementara itu, vibrasi gugus karbonil (C=O) tampak dengan munculnya puncak pada rentang bilangan gelombang 1720–1724 cm⁻¹. Temuan ini menunjukkan bahwa meropenem berinteraksi dengan gugus fungsional monomer pada saat proses polimerisasi, mendukung terbentuknya situs pengikatan spesifik.[3, 21, 23, 25]

Setelah dilakukan ekstraksi molekul cetakan (PCM template), pita O–H/N–H di sekitar 3200–3500 cm⁻¹ dan *shoulder* karbonil yang diasosiasikan dengan meropenem mengalami penurunan intensitas yang nyata. Spektrum yang tersisa didominasi oleh pita ester dari kerangka polimer MMA/EGDMA. Hal ini mengindikasikan bahwa molekul meropenem berhasil dielusi dari matriks, sehingga rongga pengenalan spesifik terbentuk pada polimer.

Secara keseluruhan, perbandingan ketiga spektrum FTIR menunjukkan bahwa tahap imprinting dan ekstraksi berlangsung dengan baik. Kehadiran, lalu hilangnya, pita khas meropenem menegaskan terbentuknya rongga selektif dalam PCM yang sesuai dengan ukuran dan gugus fungsi meropenem, yang selanjutnya berperan penting dalam selektivitas pengikatan analit.

Tabel 3. Ringkasan Pita FTIR NPCM, PCM, dan PCM setelah Ekstraksi

Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Penugasan Gugus Fungsi	NPCM (NPCM)	PCM (PCM)	PCM setelah ekstraksi (PCM template)	Keterangan
3200–3500	Regangan O–H / N–H (meropenem, H-bond)	–	++	+	Muncul pita lebar saat ada meropenem; berkurang setelah ekstraksi
2950–2850	Regangan C–H alifatik (MMA/EGDMA)	+	+	+	Pita khas backbone polimer
1750–1700	C=O ester (MMA/EGDMA) + C=O β-laktam/karboksilat (meropenem)	+	++ (ada shoulder tambahan)	+	Perubahan intensitas/shoulder pada PCM akibat kontribusi meropenem
1650–1600	Amida I / interaksi H-bond karbonil	±	+	±	Perubahan kecil menunjukkan interaksi hidrogen dengan meropenem
1450–1370	Deformasi –CH ₃ , vibrasi C–N	+	+	+	Umum, tidak spesifik, tetap muncul pada semua spektrum
1150–1050	Regangan C–O–C ester (MMA/EGDMA)	+	+	+	Karakteristik crosslinker EGDMA
1000–800	C–N / <i>fingerprint</i> meropenem	–	+	±	Muncul tambahan pita saat meropenem ada, menurun setelah ekstraksi

Analisis morfologi permukaan menggunakan SEM menunjukkan perbedaan yang jelas antara NPCM, PCM, dan PCM setelah ekstraksi template. Pada NPCM (Gambar 2a), morfologi polimer tampak padat dengan aglomerasi partikel yang relatif homogen dan minim porositas. Hal ini mengindikasikan bahwa polimer yang disintesis tanpa kehadiran molekul meropenem tidak menghasilkan rongga spesifik pada matriksnya. Sebaliknya, PCM (Gambar 2b) menampilkan morfologi yang lebih kasar dengan indikasi adanya depresi pada permukaan, yang mencerminkan keberadaan molekul template meropenem yang masih terperangkap dalam struktur polimer.[26]

Setelah tahap ekstraksi, PCM template (Gambar 2c) memperlihatkan permukaan yang lebih berongga dan berpori dibanding PCM maupun NPCM. Peningkatan porositas ini merupakan bukti terbentuknya situs pengenalan spesifik akibat penghilangan molekul template dari kerangka polimer. Kehadiran cavity ini sangat krusial dalam menentukan kemampuan PCM untuk berinteraksi secara selektif dengan meropenem pada tahap aplikasi sensorik. Perubahan morfologi dari struktur padat pada NPCM menuju permukaan berpori pada PCM menunjukkan bahwa proses *imprinting* berlangsung efektif, sesuai dengan mekanisme pembentukan polimer cetak molekul. Temuan ini memperkuat hipotesis bahwa PCM memiliki potensi unggul sebagai material pengenalan selektif, selaras dengan laporan sebelumnya pada sistem berbasis antibiotik β-laktam.[26]

Analisis Kapasitas Adsorpsi, IF, dan Selektivitas, hasil pengujian adsorpsi menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi (Q) untuk meropenem pada PCM (8,9940 mg/g) jauh lebih tinggi dibandingkan dengan NPCM (3,9904 mg/g). Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan rongga cetakan spesifik hasil interaksi antara monomer fungsional MMA dengan meropenem selama proses polimerisasi mampu meningkatkan kemampuan pengikatan polimer. Perbandingan nilai Q antara PCM dan NPCM menghasilkan imprinting factor (IF) sebesar 2,25, yang menunjukkan bahwa keberhasilan proses imprinting cukup signifikan dalam menciptakan situs pengenalan selektif.

Pada pengujian terhadap analit kompetitor, amoksisilin, nilai Q yang diperoleh untuk PCM (1,7480 mg/g) relatif lebih kecil dibandingkan dengan meropenem. Hal ini menandakan bahwa situs pengenalan dalam PCM bersifat lebih spesifik terhadap meropenem dibandingkan senyawa β -laktam lain. Dari data ini diperoleh koefisien selektivitas (α) sebesar 1,06 yang menunjukkan kemampuan PCM untuk membedakan meropenem dari molekul dengan struktur mirip. Meskipun nilai α relatif kecil, tren ini tetap mencerminkan adanya preferensi pengikatan yang khas pada PCM dibandingkan NPCM.[3, 27]

Jika dibandingkan dengan literatur yang menggunakan asam metakrilat (MAA) sebagai monomer fungsional, MAA umumnya membentuk interaksi hidrogen lebih kuat dengan gugus karbonil atau amida dari antibiotik β -laktam, sehingga menghasilkan nilai IF dan α yang lebih tinggi. Namun, penggunaan MMA dalam penelitian ini tetap menunjukkan kinerja yang baik, meskipun interaksi non-kovalen yang terbentuk cenderung lebih lemah dibanding MAA. Keunggulan MMA adalah kemampuannya menghasilkan struktur polimer yang lebih stabil dan homogen, apalagi bila dikombinasikan dengan EGDMA sebagai cross-linker yang kaku, sehingga rongga cetakan lebih permanen.[3, 19]

Dengan nilai kapasitas adsorpsi yang cukup besar, serta bukti adanya situs pengenalan spesifik meskipun α relatif mendekati 1, PCM meropenem berbasis MMA–EGDMA masih memiliki peluang besar untuk dikembangkan lebih lanjut. Potensi aplikatif yang menonjol adalah sebagai elemen pengenalan selektif dalam sensor elektrokimia. Rongga cetakan yang terbentuk dapat berperan sebagai host spesifik yang meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor terhadap meropenem. Jika dikombinasikan dengan transduser elektrokimia (misalnya elektroda karbon termodifikasi), material ini berpotensi menghasilkan sistem sensor yang cepat, sensitif, dan dapat diaplikasikan dalam monitoring kadar meropenem di sampel klinis.[28, 29]

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mensintesis PCM meropenem berbasis MMA–EGDMA yang menunjukkan perubahan morfologi signifikan dibanding NPCM, dibuktikan dengan hasil SEM berupa struktur berpori setelah ekstraksi template, serta konfirmasi FTIR terkait hilangnya pita khas meropenem di daerah 1000–800 cm^{-1} (pita yang berasal dari cincin β -laktam yang menunjukkan peregangan C–H dan peregangan C–N). Kapasitas adsorpsi PCM terhadap meropenem (8,9940 mg/g) lebih tinggi dibanding NPCM (3,9904 mg/g) dengan imprinting factor (IF) sebesar 2,25, yang mengindikasikan keberhasilan pembentukan rongga pengenalan spesifik. Uji selektivitas terhadap amoksisilin menghasilkan koefisien selektivitas (α) sebesar 1,06, menunjukkan adanya preferensi pengikatan meskipun relatif rendah. Dengan demikian, PCM Meropenem berbasis MMA–EGDMA berpotensi diaplikasikan sebagai elemen pengenalan selektif pada sensor elektrokimia meropenem,

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia (DRTPM Kemdiktisaintek) atas bantuan operasional melalui Program Penelitian Perguruan Tinggi yang mendukung Penelitian Dosen Pemula (PDP) yang dilaksanakan pada tahun 2025. Pendanaan ini difasilitasi melalui kontrak induk Nomor 122/C3/DT.05.00/PL/2025 Tanggal 28 Mei 2025, dengan kontrak turunan pertama Nomor 49/SPK/LL1/AL.04.03/PL/2025 Tanggal 11 Juni 2025, dan kontrak turunan kedua Nomor 014/AK/LPPM/INKES-MLP/VI/2025 Tanggal 12 Juni 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Herlina, Muhammad Ali Zulfikar, Lasmayna Sirumapea B Platinum and Cobalt hydroxide – modified Platinum Electrode as Sensor for Electrochemical Oxidation of Amoxicillin. 6:213–223
- [2] Milla P, Ferrari F, Muntoni E, Sartori M, Ronco C, Arpicco S (2020) Validation of a simple and economic HPLC-UV method for the simultaneous determination of vancomycin, meropenem, piperacillin and tazobactam in plasma samples. *J Chromatogr B Anal Technol Biomed Life Sci*. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2020.122151>
- [3] Amri AM, Azis MY, Zulfikar MA (2024) Synthesis and Characterization of Magnetic Molecularly Imprinted Polymers Targeting Capsaicin. *J Kim Val* 10:173–180
- [4] Steffens NA, Estevan S, Nichelle SM, Natália P (2021) Meropenem use and therapeutic drug monitoring in clinical practice : a literature review. 610–621

- [5] Wang Q, Xue Q, Chen T, Li J, Liu Y, Shan X, Liu F, Jia J (2021) Recent advances in electrochemical sensors for antibiotics and their applications. *Chinese Chem Lett* 32:19–29
- [6] Zhang Y, Zhao G, Han K, Sun D, Zhou N, Song Z, Liu H, Li J, Li G (2023) Applications of Molecular Imprinting Technology in the Study of Traditional Chinese Medicine. *Molecules* 28:1–25
- [7] Haghdoust S, Arshad U, Mujahid A, Schranzhofer L, Lieberzeit PA (2021) Development of a MIP-Based QCM Sensor for Selective Detection of Penicillins in Aqueous Media.
- [8] Golker K, Nicholls IA (2016) The effect of crosslinking density on molecularly imprinted polymer morphology and recognition. *Eur Polym J* 75:423–430
- [9] Frigoli M, Krupa MP, Hooyberghs G, Diliën H, Eersels K, Grinsven B Van, Lowdon JW, Cleij TJ (2024) Electrochemical Sensors for Antibiotic Detection: A Focused Review with a Brief Overview of Commercial Technologies.
- [10] Ma X, Wang Y, Wang W, Heinlein J, Pfefferle LD, Tian X (2023) Strategic preparation of porous magnetic molecularly imprinted polymers via a simple and green method for high-performance adsorption and removal of meropenem. *Talanta* 258:124419
- [11] Sirumapea L, Zulfikar MA, Amran MB, Alni A (2021) Selective solid-phase extraction of meropenem from human blood plasma using a molecularly imprinted polymer. *Indones J Chem* 21:1167–1179
- [12] Atta MY, Hegazy MA, Mahmoud AM, Ghoniem NS (2022) Electrochemical Sensor for Meropenem Therapeutic Monitoring in Human Plasma Based on Carbon Nanotubes Modified Basal Pyrolytic Graphite Electrode. *J Electrochem Soc* 169:097504
- [13] Ramanavicius S, Samukaite-Bubniene U, Ratautaite V, Bechelany M, Ramanavicius A (2022) Electrochemical molecularly imprinted polymer based sensors for pharmaceutical and biomedical applications (review). *J Pharm Biomed Anal.* <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2022.114739>
- [14] Herlina, Zulfikar MA, Buchari (2021) Electron transfer in electro-oxidation of amoxicillin using platinum electrode and platinum modified cobalt electrodes. *Key Eng Mater* 874 KEM:155–164
- [15] Mostafa IM, Meng C, Dong Z, Lou B, Xu G (2022) Potentiometric sensors for the determination of pharmaceutical drugs. *Anal Sci* 38:23–37
- [16] Gao M, Gao Y, Chen G, Huang X, Xu X, Lv J, Wang J, Xu D, Liu G (2020) Recent Advances and Future Trends in the Detection of Contaminants by Molecularly Imprinted Polymers in Food Samples. *Front Chem* 8:1–20
- [17] Yence M, Cetinkaya A, Çorman ME, Uzun L, Caglayan MG, Ozkan SA (2023) Fabrication of molecularly imprinted electrochemical sensors for sensitive codeine detection. *Microchem J* 193:109060
- [18] López R, Khan S, Wong A, Sotomayor M del PT, Picasso G (2021) Development of a New Electrochemical Sensor Based on Mag-MIP Selective Toward Amoxicillin in Different Samples. *Front Chem* 9:1–9
- [19] Handayani N, Setiadi Y, Sativa SO, Pinandita A, Serunting MA, Triadhi U, Nasir M, Zulfikar MA (2023) Tailored nanofibrous molecularly imprinted polymers for selective removal of di(2-ethylhexyl) phthalate: A computer-aided design and synthesis approach. *J Water Process Eng* 55:104112
- [20] Adeleke VT, Ebenezer O, Lasich M, Mugo SM (2024) Theoretical insights into the compatibility of template-monomer-crosslinker-solvent for cortisol molecularly imprinted polymer pre-polymerization. *Mol Syst Des Eng* 9:99–111
- [21] Lasmayna Sirumapea, M Ali Zulfikar, M Bachri Amran and AA Synthesis and characterization of meropenem imprinted polymer Synthesis and characterization of meropenem imprinted polymer. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012063>
- [22] Bow Y, Sutriyono E, Nasir S, Iskandar I (2017) Molecularly Imprinted Polymers (MIP) Based Electrochemical Sensors for Detection of Endosulfan Pesticide. 7:662–668
- [23] Sirumapea L, Zulfikar MA, Amran MB, Alni A (2018) An Optimization of Functional Monomer, A Preliminary Study of Meropenem Imprinted Polymer as Selective Sorbent. *JKPK (Jurnal Kim dan Pendidik Kim* 3:103
- [24] Hasanah AN, Safitri N, Zulfa A, Neli N, Rahayu D (2021) Factors affecting preparation of molecularly imprinted polymer and methods on finding template-monomer interaction as the key of selective properties of the materials. *Molecules.* <https://doi.org/10.3390/molecules26185612>
- [25] Putri T, Ali Zulfikar M, Wahyuningrum D, Syahjoko Saputra I (2022) Synthesis and Characterization of Molecularly Imprinted Polymers (MIPs) Using Humic Acid. *J Pure Appl Chem Res* 11:175–181
- [26] Hasaneen N, Akhtarian S, Pulicharla R, Brar SK, Rezai P (2024) Surface molecularly imprinted polymer-based sensors for antibiotic detection. *TrAC Trends Anal Chem* 170:117389
- [27] Surya SG, Khatoon S, Lahcen AA, Nguyen ATH, Dzantiev BB, Tarannum N, Salama KN (2020) A chitosan gold nanoparticles molecularly imprinted polymer based ciprofloxacin sensor. *RSC Adv* 10:12823–12832

- [28] Bow Y, Syakdani A, Purnamasari I (2023) Performance Test of the Molecularly Imprinted Polymer (MIP) Endosulfan Sensor Potentiometrically. 3:46–51
- [29] Majdi M, Mizani F, Mohammad-Khah A (2022) Quantitative Monitoring of Cefotaxim Ions by a New Potentiometric Sensor Based on Molecularly Imprinted Polymer. Anal Bioanal Electrochem 14:100–115