FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung

MATERIAL FUNGSIONAL POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL: APLIKASI DAN TANTANGANNYA DI MASA DEPAN

Profesor Muhammad Ali Zulfikar

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
19 November 2022

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
19 November 2022

Profesor Muhammad Ali Zulfikar

MATERIAL FUNGSIONAL POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL: APLIKASI DAN TANTANGANNYA DI MASA DEPAN

Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: MATERIAL FUNGSIONAL POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL:
APLIKASI DAN TANTANGANNYA DI MASA DEPAN
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 19 November 2022.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).**
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).**

Hak Cipta ada pada penulis

Prof. Muhammad Ali Zulfikar
MATERIAL FUNGSIONAL POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL:
APLIKASI DAN TANTANGANNYA DI MASA DEPAN
Disunting oleh Prof. Muhammad Ali Zulfikar

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2022
xiv+82 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-6624-67-3
1. Kimia Analitik 1. Muhammad Ali Zulfikar

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, bahwasanya atas berkat dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB.

Pada kesempatan ini penulis dengan segala kerendahan hati mengucapkan terima kasih kepada Rektor Institut Teknologi Bandung, Senat Akademik Institut Teknologi Bandung, Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, Dekanat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Bandung, para dosen dan kolega peneliti di Program Studi Kimia Institut Teknologi Bandung, para karyawan, mahasiswa S1, S2 dan S3 yang banyak membantu dan mendukung penulis hingga meraih jabatan guru besar ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih serta doa tulus kepada almarhum/almarhumah kedua orang tua yang selama hidupnya senantiasa mendukung dan memanjatkan doa bagi berkahnya kiprah penulis berkarir di ITB. Terima kasih juga untuk adinda Rahmat Hidayat dan istri tercinta Ike Sumiati Fatah, serta anak-anak Muhammad Rifky Farrel dan Muhammad Rafly Alfaridzy yang selalu mendampingi penulis

dan menjadi pendorong dan sumber semangat dalam berkarya dan menjalani hidup.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 19 November 2022

Prof. Muhammad Ali Zulfikar

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR iii

DAFTAR ISI v

DAFTAR GAMBAR vii

SINOPSIS xi

1. PENDAHULUAN 1

2. POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL 3

2.1 Sejarah perkembangan sintesis polimer bercetakan molekul .. 3

2.2 Pemilihan komponen yang tepat pada sintesis MIPs 6

2.2.1 Monomer 6

2.2.2 Pengikat silang *(Cross-linker)* 8

2.2.3 Pelarut (Porogen) 9

2.3 Metode sintesis MIPs 11

2.3.1 Polimerisasi massal 12

2.3.2 Polimerisasi suspensi 14

2.3.3 Polimerisasi emulsi 16

2.3.4 Polimerisasi presipitasi/pengendapan 19

2.3.5. Pengembangan metode sintesis MIPs dan pelepasan *template* 21

3. MEMBRAN BERCETAKAN MOLEKUL 22

4. POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL - NANOFIBER 30

5. APLIKASI 35

5.1 MIPs dalam pemisahan dan pemurnian 35
5.2 MIP sebagai sensor kimia dan biosensor 39
5.3 MIPs untuk aplikasi katalitik 42
5.4 MIP untuk aplikasi *drug delivery* 45
6. PENELITIAN 5 TAHUN TERAKHIR 47
7. TANTANGAN/PROSPEK 50
7.1 Tantangan dalam sintesis MIPs 51
7.2 Tantangan dalam aplikasi MIPs 53
7.3 Tantangan dalam penanganan limbah 57
8. UCAPAN TERIMA KASIH 58
KATA PENUTUP 61
DAFTAR PUSTAKA 62
CURRICULUM VITAE 73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Skema pembuatan MIPs 4
Gambar 2. Struktur monomer yang paling umum digunakan untuk sintesis MIPs. 7
Gambar 3. Struktur *cross-linker* yang umum digunakan untuk pencetakan molekul 9
Gambar 4. Beberapa metode polimerisasi yang digunakan dalam sintesis MIPs 12
Gambar 5. Citra SEMs Curcumin MIPs yang disintesis dengan polimerisasi massal 13
Gambar 6. Teknik polimerisasi suspensi. 15
Gambar 7. Citra SEM Curcumin MIPs yang disintesis melalui metode polimeriasi suspense 16
Gambar 8. Skema metode polimerisasi emulsi 18
Gambar 9. Citra SEM dari Curcumin MIPs yang dihasilkan melalui proses polimeriasi emulsi 19
Gambar 10. Tahap polimerisasi presipitasi (A) Pembentukan sistem yang homogen. (B) Pertumbuhan oligomer dan inti (C) Nukleus tumbuh dan menghasilkan pembentukan segregat polimer (Porogen ditunjukkan oleh warna kuning dalam skema). 20
Gambar 11. Citra SEM MIPs yang disiapkan melalui polimerisasi presipitasi 20
Gambar 12. (A) Proses pembuatan MIMs melalui polimerisasi secara in situ, (B) Pembuatan lapisan tipis MIP melalui polimerisasi foto-radikal, (C) Preparasi sensor

elektrokimia berbasis MIMs untuk penentuan artemisin. 24

Gambar 13. (A) Proses pembuatan MIMs melalui metode inversi fasa, (B) Preparasi MIMs melalui inversi fasa berbasis medan magnet, (C) Sintesis membran nanokomposit tercetak molekul melalui inversi fasa 25

Gambar 14. (A) Proses pembuatan MIMs melalui polimerisasi sol-gel, (B) Prosedur sintesis membrane nanokomposit tercetak berbasis PDA/CaCO3, dan (C) Preparasi membran serat berongga tercetak molekul (MSHM) melalui polimeriasi sol-gel 26

Gambar 15. (A) Proses pembuatan MIMs melalui polimerisasi emulsi, (B) Prosedur penyiapan membran elektrospun nanofiber tercetak molekul dengan bantuan batang pengaduk. 27

Gambar 16. (A) Proses penyiapan MIMs melalui polimerisasi pencangkokan pada permukaan *(surface grafting polymerization)*, (B) Pencetakan immunoglobulin G melalui polimeriasi pencangkokan, (C) Rute sintesis MIMs. 28

Gambar 17. Gambar SEM dari (1) RCMs murni, (2) non-imprinted composite membranes (NICMs), (3) MICMs, (4) penampang RCMs murni, (5) penampang NICMs, (6) penampang MICMs, (7) MICMs setelah elusi, dan gambar AFM dari (8) RCMs murni dan (9) MICMs. 30

Gambar 18. Metode sintesis MIP nanofibers (a) pencetakan molekul selama proses electrospinning; (b) pengembangan

lapisan MIP pada permukaan mikro/nanofiber electrospun; (c) pendekatan pencetakan fase padat, dan (d) dispersi/konjugasi mikro atau nanopartikel MIP. 34

Gambar 19. Tahapan dalam proses pemisahan dengan menggunakan MISPE 37

Gambar 20. Sistem katalitik MIPs 44

Gambar 21. Sejumlah tantangan dalam penghilangan senyawa template pada MIPs 53

Gambar 22. (a) Struktur antibiotik yang termasuk dalam kelas yang berbeda, (b) pembagian artikel peer-review untuk kelas antibiotik yang berbeda antara tahun 2010 dan 2019, (c) tahunan dan (d) laporan dua tahunan penelitian pencetakan antibiotik antara tahun 2010-2021. 55

SINOPSIS

Molecular imprinting technology (MIT) atau teknologi pencetakan molekul adalah teknik untuk merancang reseptor buatan dengan selektivitas dan spesifitas yang telah ditentukan untuk analit tertentu. MIT didasarkan pada pembentukan kompleks antara analit atau yang disebut sebagai senyawa *template* dan monomer fungsional. Penambahan agen *crosslinker* atau pengikat silang dapat membentuk jaringan polimer tiga dimensi. Beberapa teknik polimerisasi yang dapat dilakukan, diantaranya adalah polimerisasi massal, polimerisasi emulsi, polumerisasi suspensi, dan polimerisasi presipitasi. Setelah polimer terbentuk, senyawa *template* dilepaskan dari polimer sehingga meninggalkan situs pengenalan spesifik yang saling melengkapi dalam baik dalam hal ukuran, bentuk, dan penataan ruang gugus fungsi kimia terhadap molekul *template*. Interaksi yang mendorong fenomena pengenalan molekul tersebut adalah ikatan hidrogen, dipol-dipol, dan interaksi ionik antara molekul *template* dan gugus fungsi yang ada dalam matriks polimer. Material yang dihasilkan melalui teknik MIT disebut dengan *molecularly imprinted polymers* (MIPs) atau polimer bercetakan molekul. MIPs adalah polimer sintetik yang memiliki rongga yang spesifik dirancang untuk molekul target. Material MIPs sangat penting untuk dikembangkan karena memiliki beberapa keunggulan, seperti preparasi yang relatif mudah dan murah, memiliki ketahanan mekanik, termal dan kimia yang baik, serta mempunyai reusabilitas dan selektivitas yang tinggi. Seiring dengan berkembangnya

metode MIT dan kebutuhan manusia, selain MIPs, saat ini juga tengah marak dipelajari sintesis *molecularly imprinted membranes* (MIMs) dan *molecularly imprinted polymer nanofibers* (MIP-NFs) untuk berbagai aplikasi. MIPs dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti pemisahan dan pemurnian, sensor kimia dan biosensor, aktivitas katalitik, dan *drug delivery*. Akan tetapi, dalam perkembangannya, teknologi pencetakan molekul menghadapi sejumlah tantangan dan peluang. Tantangan yang dihadapai dalam hal sintesis MIPs, seperti jenis dan jumlah monomer fungsional, zat pengikat silang, inisiator, dan pelarut; pemilihan metode; durasi polimerisasi; rasio monomer: template dan pelarut pencuci template. Selain itu, pilihan pelarut yang tidak tepat dapat menyebabkan pembengkakan MIPs, dan menghancurkan situs pengikatan. Beberapa masalah seperti kapasitas pengikatan yang rendah, ketidakcocokan dengan media berair, terjadinya kebocoran *template*, pencetakan makromolekul yang sulit, pelepasan *template*, pelepasan *template* yang tidak lengkap, dan kerusakan rongga setelah pelepasan *template* juga merupakan tantangan yang perlu dihadapai dan dicari solusinya. Hal ini mendorong untuk mengetahui mekanisme pencetakan dan kemudian memberikan kinerja terbaik untuk beberapa analit. Penggabungan MIT dan berbagai teknologi dapat dikembangkan untuk menciptakan MIPs yang beragam untuk aplikasi lebih lanjut dengan jangkauan yang lebih luas. Selain itu, pembuangan limbah hasil sintesis MIPs dan bahan kimia yang tak digunakan lainnya juga dapat menjadi perhatian yang serius. Hal ini mendorong penelitian mengenai

material/komponen pengganti dalam sintesis MIPs menjadi material yang lebih ramah lingkungan. Dengan demikian ruang lingkup penggunaan dan sintesis MIPs di masa depan diharapkan dapat menggunakan metode pencetakan, polimerisasi, templat, monomer, dan pelarut yang lebih berkelanjutan dan "hijau" untuk membuatnya lebih ramah lingkungan dan aman bagi ekosistem.

MATERIAL FUNGSIONAL POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL: APLIKASI DAN TANTANGANNYA DI MASA DEPAN

1. PENDAHULUAN

Perancangan material sintetik yang mampu meniru proses pengenalan molekul seperti yang ditemukan di alam telah menjadi bidang penelitian yang penting dan terus berkembang dalam beberapa tahun terakhir. *Molecular imprinting technology* (MIT) atau teknologi pencetakan molekul adalah teknik untuk merancang reseptor buatan dengan selektivitas dan spesifitas yang telah ditentukan untuk analit tertentu (Ertürk dan Mattiasson, 2017). MIT dinilai sebagai teknik serbaguna dan menjanjikan untuk dikembangkan karena mampu mengenali molekul biologis dan kimia, termasuk asam amino dan protein, turunan nukleotida, obat-obatan, bahan makanan, dan polutan. Dengan demikian, area aplikasi MIT meliputi ilmu pemisahan dan pemurnian (Lasáková dan Jandera, 2009), katalisis (Li dan Li, 2006) , sensor kimia (Ertürk dan Mattiasson, 2017), antibodi biologis dan sistem reseptor (Bossi dkk., 2007; Longo dan Vasapollo, 2008), serta drug delivery (Puoci dkk., 2008).

MIT didasarkan pada pembentukan kompleks antara analit atau yang disebut sebagai senyawa *template* dan monomer fungsional. Penambahan agen *crosslinker* atau pengikat silang dapat membentuk jaringan polimer tiga dimensi. Setelah polimer terbentuk, senyawa *template* dilepaskan dari

polimer sehingga meninggalkan situs pengenalan spesifik yang saling melengkapi dalam baik dalam hal ukuran, bentuk, dan penataan ruang gugus fungsi kimia terhadap molekul *template*. Interaksi yang mendorong fenomena pengenalan molekul tersebut adalah ikatan hidrogen, dipol-dipol, dan interaksi ionik antara molekul *template* dan gugus fungsi yang ada dalam matriks polimer.

Material yang dihasilkan melalui tenik MIT disebut dengan *molecularly imprinted polymers* (MIPs) atau polimer bercetakan molekul. MIPs adalah polimer sintetik yang memiliki rongga yang spesifik dirancang untuk molekul target. Polimer tersebut disintesis melalui proses kopolimerisasi antara agen pengikat silang dengan kompleks yang terbentuk antara molekul cetak *(template)* dan monomer fungsional yang secara spesifik berinteraksi melalui ikatan kovalen maupun non-kovalen. Pelepasan molekul cetak akan menghasilkan rongga dengan bentuk, ukuran, dan gugus fungsi yang spesifik terhadap molekul cetak. Material MIPs sangat penting untuk dikembangkan karena memiliki beberapa keunggulan, seperti preparasi yang relatif mudah dan murah, memiliki ketahanan mekanik, termal dan kimia yang baik, serta mempunyai reusabilitas dan selektivitas yang tinggi (Vasapollo dkk., 2011).

Pada orasi ilmiah Guru Besar ini, akan dipaparkan mengenai polimer bercetakan molekul, membran bercetakan molekul yang merupakan pengembangan dari MIT, aplikasi penggunaan polimer bercetakan molekul, serta tantangan di masa depan yang dihadapi.

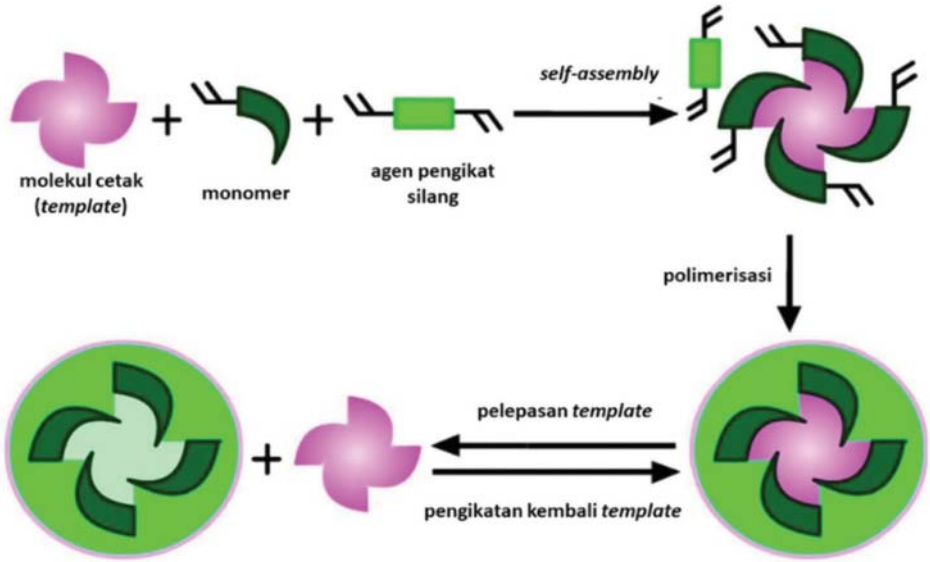
2. POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL

2.1 Sejarah perkembangan sintesis polimer bercetakan molekul

Teknologi pencetakan secara molekuler pertama kali diperkenalkan pada tahun 1931 oleh Polyakov yang menjelaskan mengenai selektivitas dalam hal efek *template* meskipun zat aditif ditambahkan setelah polimerisasi (Polyakov, 1931). Hingga pada tahun 1940, Pauling pertama kali mengajukan gagasan tentang pencetakan molekul yang melibatkan *self-assembly* antibody protein dengan antigen yang bertindak sebagai cetakan. Akan tetapi, setelah itu tidak ada kemajuan signifikan dalam teknologi pencetakan molekul hingga pada tahun 1972, Wuff dan Sarhan mempublikasikan penemuannya dalam hal polimer organik yang disintesis melalui ikatan kimia yang reversible (Wuff dan Sarhan, 1972). Hingga pada era berikutnya, Vlatakis dan tim telah berhasil membuat MIPs melalui teknologi pencetakan molekul yang terbentuk secara non-kovalen (Vlatakis dkk., 1993). Studi ini menjadi pionir dalam pengembangan teknologi pencetakan molekul yang tumbuh dengan pesat.

Skema pembuatan MIPs secara umum dapat dilihat pada Gambar 1. Secara konvensional, produksi MIPs melibatkan pengenalan sisi ikatan *(binding sites)* di mana kopolimer yang terikat silang terbentuk di sekitar molekul analit yang bertindak sebagai pembuat rongga cetakan *(template)*. Pelepasan molekul *template* tersebut memberikan sisi ikatan dalam polimer yang idealnya menyerupai *template* dalam hal bentuk, ukuran dan

fungsionalitas. Selanjutnya, pengikatan kembali molekul target pada sisi yang telah tercetak ini dapat terjadi ketika polimer diinkubasi dengan adanya molekul *template* (Nicholls & Rosengren, 2001).



Gambar 1. Skema pembuatan MIPs

Interaksi yang terjadi antara molekul target terlarut dan monomer fungsional dapat berupa ikatan kovalen, non-kovalen, atau koordinasi logam. Akibatnya, pencetakan molekuler menurut jenis interaksi antara blok bangunan monomer *template* - tautan silang - polimer fungsional dapat diklasifikasikan menjadi pencetakan kovalen, non-kovalen, dan semi kovalen (Moreno-Bondi dkk., 2008). Pendekatan interaksi MIPs secara kovalen pertama kali diperkenalkan oleh Wulff dan Sarhan (1972) yang melibatkan pembentukan ikatan kovalen reversibel antara *template* dan monomer fungsional sebelum polimerisasi. Keuntungan dari teknik

ini adalah bahwa situs pengikatan lebih homogen karena stabilitas interaksi *template*-monomer yang tinggi (Martín-Esteban, 2013). Namun, interaksi yang sangat kuat ini mengakibatkan kesulitan dalam melepas *template* secara menyeluruh.

Sementara itu, Arshady mengembangkan pendekatan non-kovalen yang menggabungkan *template* dan monomer secara *in situ* melalui interaksi non-kovalen seperti gaya elektrostatik, ikatan hidrogen, atau gaya *van der Waals* dan sebagainya (Arshadi dan Mosbach, 1981). Karena interaksi yang lemah, prosedur ini lebih sederhana, dan sejumlah besar monomer yang dapat berinteraksi dengan berbagai *template* tersedia secara komersial. Sejauh ini, pendekatan secara non-kovalen merupakan yang paling banyak digunakan dalam teknik persiapan MIPs (Tamayo dkk., 2007 dan Malitesta dkk., 2012). Akan tetapi, cara ini juga memiliki kelemahan seperti lemahnya situs pengikatan sehingga selektivitasnya rendah.

Semi kovalen adalah metode persiapan MIPs yang menggabungkan metode kovalen dan non-kovalen. MIPs disintesis oleh interaksi kovalen dan kemudian mengenali kembali *(re-recognize)* molekul *template* melalui proses pencetakan molekul non-kovalen dikarenakan ikatannya yang reversibel (Zhan et al. 2013). Dengan demikian, pencetakan semi kovalen menggabungkan keunggulan utama dari dua teknik sebelumnya, yaitu kompleks yang terbentuk lebih stabil dan stoikiometrik, namun juga pengikatan terhadap senyawa target dapat berlangsung lebih mudah dan cepat.

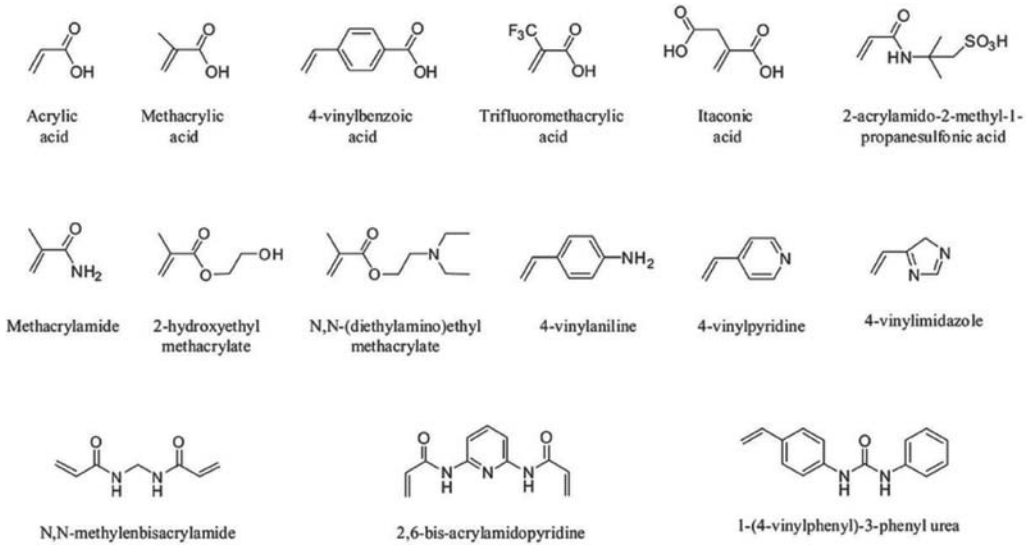
2.2 Pemilihan komponen yang tepat pada sintesis MIPs

2.2.1 Monomer

Pilihan reagen kimia sangat penting untuk mendapatkan MIPs fungsional yang efisien. Dalam hal ini, ketepatan dalam menentukan monomer untuk sintesis MIPs sangat penting dalam menghasilkan rongga yang sangat spesifik yang dirancang untuk molekul *template*. Terdapat tiga jenis monomer fungsional yang digunakan dalam sintesis MIPs, yaitu (i) senyawa monomer yang bersifat asam, seperti asam metakrilat, (ii) senyawa yang bersifat basa, seperti 4-vinil piridin, dan (iii) senyawa yang bersifat netral, seperti stirena atau metil metakrilat (MMA). Beberapa struktur monomer yang umum digunakan pada sintesis MIPs ditunjukkan oleh Gambar 2. Diantara monomer tersebut, asam metakrilat (MAA) adalah salah satu monomer yang paling banyak digunakan dalam sintesis MIPs karena kemampuannya untuk membentuk ikatan hidrogen dengan baik sebagai donor proton dan akseptor ikatan hidrogen.

Dalam sintesis MIPs, jumlah monomer fungsional yang cukup banyak diperlukan untuk memastikan kapasitas pengikatan molekul target yang tinggi. Akan tetapi, jika jumlah monomer yang ditambahkan terlalu banyak, hal ini biasanya akan menghasilkan situs interaksi yang tidak spesifik. Oleh karena itu, penggunaan proporsi monomer dan template yang tepat dalam proses pra-polimerisasi akan menghasilkan MIPs yang memiliki situs afinitas tinggi. Sebuah studi membuktikan bahwa kemampuan adsorpsi dari MIPs akan meningkat seiring dengan pertambahan jumlah monomer, namun ketika telah mencapai titik

optimum, maka penambahan jumlah monomer justru akan menurunkan nilai kapasitas adsorpsi dari MIPs tersebut (Zhao dkk., 2020).



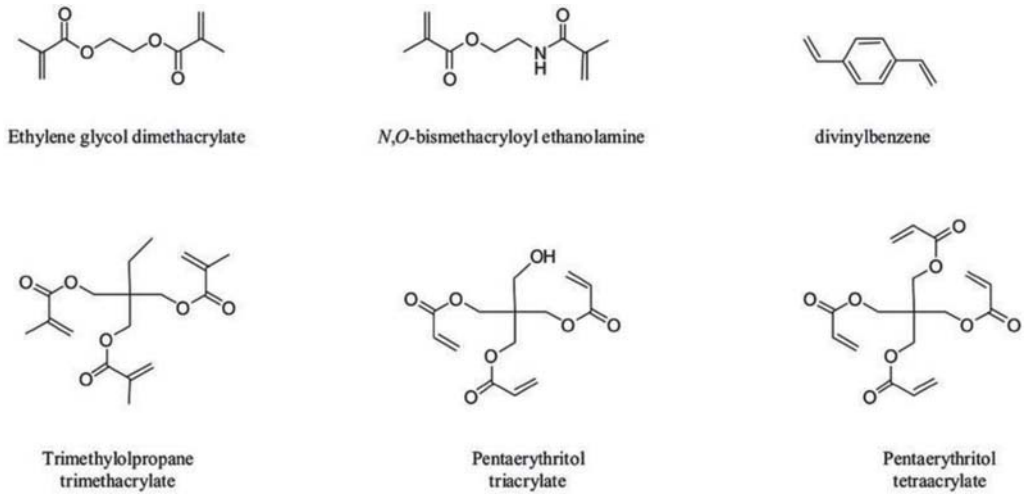
Gambar 2. Struktur monomer yang paling umum digunakan untuk sintesis MIPs.

Pemiilihan monomer fungsional dalam sintesis MIP juga harus didasarkan pada interaksi yang dibentuk oleh *template* berdasarkan gugus fungsi yang terdapat pada *template*. Misalnya, sintesis MIP dilakukan dengan menggunakan hidroklorotiazid sebagai *template*. Secara struktur, hidroklorotiazid memiliki tiga situs interaksi, satu situs pada cincin tiazid dan dua situs pada kelompok sulfonamida. Gugus-gugus ini dapat membentuk ikatan hidrogen dengan gugus karboksil, hidroksil, amina, dan bahkan amida. Oleh karena itu, berbagai monomer seperti asam metakrilat (MAA), alilamin, 4-vinil piridin, metakrilamida, akrilamida (AM), asam akrilat, dan asam 2-(trifluorometil)akrilat) dapat

dipertimbangkan untuk menjadi pilihan agar dapat berinteraksi melalui ikatan hidrogen dengan hidroklorotiazid. Selain itu, pemilihan monomer didasarkan pada energi interaksi yang terbentuk antara monomer dan hidroklorotiazid melalui simulasi komputasi. Dalam hal ini, diketahui bahwa asam metakrilat merupakan monomer terbaik untuk mensintesis hidroklorotiazid MIP karena memiliki energi interaksi paling tinggi dibandingkan monomer lainnya (Barros dkk., 2016).

2.2.2 Pengikat silang *(Cross-linker)*

Dalam sintesis MIPs, agen pengikat silang atau *cross-linker* juga memiliki fungsi yang penting dalam mengontrol morfologi matriks polimer sehingga dapat menstabilkan situs pengikatan pada polimer bercetakan molekul dan memberikan stabilitas mekanis pada matriks polimer. Hal ini berpengaruh pada interaksi spesifik antara *template* dan monomer fungsional sehingga pemilihan *cross-linker* yang sesuai dapat mempertahankan kemampuan pengenalan molekul dari MIPs yang dihasilkan. Penambahan *cross-linker* juga dapat mempengaruhi morfologi MIP yang akan mempengaruhi kapasitas pengikatan MIP. Diantara beberapa senyawa *cross-linker* (Gambar 3), etilen glikol dimetakrilat (EGDMA) dan trimetilolpropana trimetakrilat (TRIM) adalah yang paling umum digunakan.



Gambar 3. Struktur *cross-linker* yang umum digunakan untuk pencetakan molekul.

Beberapa faktor penting dalam penggunaan *cross-linker*, seperti jenis dan jumlah *cross-linker* yang digunakan untuk polimerisasi diperlukan untuk menghasilkan MIPs dangan karakteristik yang diharapkan. Semakin banyak jumlah *cross-linker* yang ditambahkan memungkinkan untuk mendapatkan bahan berpori yang stabil. Seperti halnya monomer, kinerja adsorpsi MIPs akan meningkat hingga konsentrasi *cross-linker* tertentu. Setelah mencapai kondisi optimum tersebut, penambahan *cross-linker* lebih lanjut tidak akan meningkatkan kinerja adsorpsi, bahkan dapat menurunkan kinerja adsorpsi.

2.2.3 Pelarut (Porogen)

Sifat dan volume pelarut juga memainkan peran penting dalam proses pencetakan molekul. Pelarut dalam hal ini berperan sebagai media reaksi sehingga memiliki efek yang signifikan pada interaksi antara *template*

dengan monomer fungsional. Pelarut berfungsi untuk membawa semua komponen (monomer, template, inisiator, *cross-linker*) menjadi satu fase dalam polimerisasi dan bertanggung jawab untuk menciptakan pori-pori pada polimer berpori. Pelarut harus menghasilkan pori-pori besar untuk memastikan aliran yang baik melalui sifat-sifat MIP yang dihasilkan dan meningkatkan volume pelarut, volume pori polimer membesar. Oleh karena itu, pelarut dalam sintesis MIP juga sering disebut sebagai "porogen".

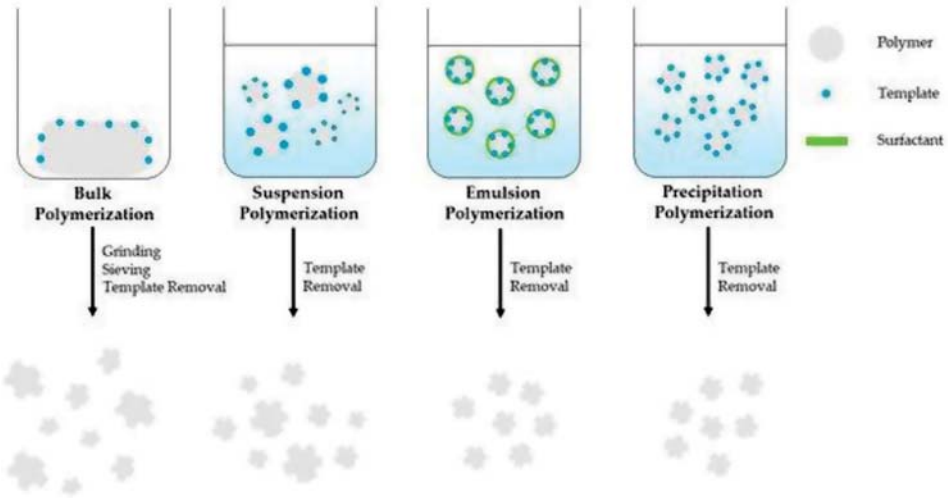
Porogen yang paling umum digunakan untuk sintesis MIP adalah toluena, kloroform, diklorometana atau asetonitril. Pelarut yang kurang polar seperti kloroform, diklorometana, atau toluena dapat meningkatkan pembentukan kompleks yang memfasilitasi interaksi non-kovalen polar seperti ikatan hidrogen. Sedangkan pelarut yang lebih polar cenderung memisahkan interaksi non-kovalen dalam kompleks prapolimer, terutama pelarut protik yang menghasilkan tingkat gangguan ikatan hidrogen yang tinggi.

Dalam pembuatan MIP, pelarut harus berinteraksi dan melarutkan semua bahan awal tetapi tidak boleh terlalu mengganggu selama proses reaksi polimerisasi. Pernyataan tersebut didukung oleh hasil penelitian yang dilakukan oleh Song dan tim tentang pengaruh pelarut porogenik dalam pembuatan MIPs untuk quercetin. Dalam hal ini, mereka menggunakan empat pelarut organik dengan polaritas yang berbeda. Pelarut yang digunakan adalah 1,4-dioksan, tetrahidrofuran (THF), aseton, dan asetonitril. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan

pelarut dengan kepolaran menengah (THF) akan membentuk interaksi optimal antara *template* dan monomer dan mengembangkan situs pencetakan yang seragam pada MIPs. Bila menggunakan pelarut polar (asetonitril), pelarut berinteraksi kuat dengan quercetin *(template)* dan akrilamida (monomer fungsional), sehingga sulit bagi *template* dan akrilamida untuk berinteraksi satu sama lain. Sedangkan menggunakan pelarut yang kurang polar (1,4-dioksan) akan terbentuk interaksi yang kuat antara *template*-monomer, tetapi karena kelarutan polimer dalam 1,4-dioksan yang rendah, maka MIPs yang terbentuk akan cepat membentuk endapan (Song dkk., 2009). Oleh karena itu, pertimbangan pelarut yang baik sangat diperlukan untuk menghasilkan MIPs yang selektif terhadap molekul target.

2.3 Metode sintesis MIPs

Secara umum, MIPs dapat disintesis melalui metode polimerisasi massal *(bulk polymerization)*, polimerisasi suspensi *(suspension polymerization)*, dan polimerisasi pengendapan *(precipitation polymerization)*. Beberapa teknik polimerisasi tersebut dilakukan untuk menghasilkan MIPs dengan ukuran yang diinginkan (Gambar 4).

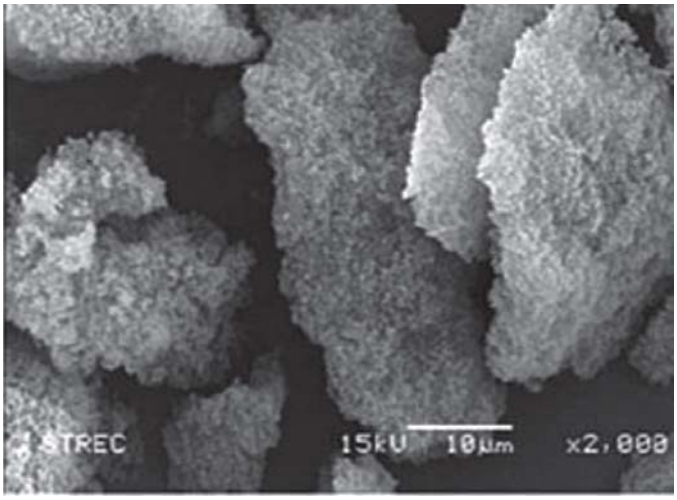


Gambar 4. Beberapa metode polimerisasi yang digunakan dalam sintesis MIPs (Bitas & Samanidou, 2018)

2.3.1 Polimerisasi massal

Polimerisasi massal *(bulk polymerization)* adalah pendekatan paling sederhana dan mudah untuk mensintesis MIPs. Secara umum, polimerisasi dengan metode bulk untuk pembuatan MIPs adalah sebagai berikut: ion *template* dan monomer fungsional dilarutkan dalam sejumlah kecil pelarut untuk membuat kontak penuh selama periode waktu tertentu, dan kemudian sejumlah zat pengikat silang dan inisiator ditambahkan. Kemudian, campuran tersebut dialirkan gas nitrogen untuk menggantikan oksigen, lalu dipolimerisasi dengan adanya inisiator di bawah fotoinisiasi atau inisiasi termal untuk mendapatkan padatan MIP. Partikel yang dihasilkan memiliki berbagai berat molekul dan ukuran sehingga MIPs yang terbentuk perlu digiling dan diayak dengan ukuran yang sesuai. Adapun citra SEM dari MIPs yang dihasilkan oleh

polimerisasi massal tersebut contohnya seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5 berikut ini (Suwanwong dkk., 2014).



Gambar 5. Citra SEMs Curcumin MIPs yang disintesis dengan polimerisasi massal

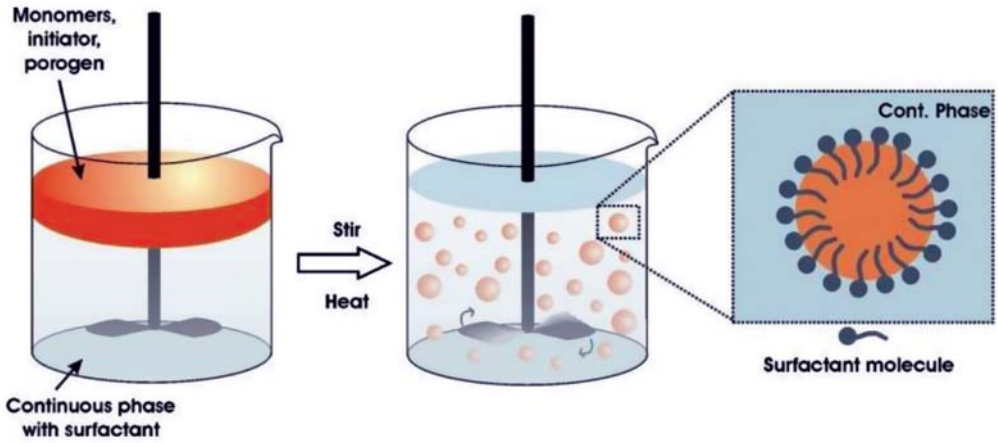
Beberapa keuntungan dari polimerisasi *bulk* dibandingkan dengan metoda lainnya adalah proses sintesisnya sederhana, dan mempunyai selektivitas yang baik untuk molekul/ion target, sehingga membuatnya menjadi metode yang umum digunakan dalam sintesis MIPs. Namun, ada beberapa kelemahan dari metode ini, yaitu: (1) polimer yang diperoleh perlu dihancurkan dan diayak karena memiliki berbagai ukuran dan berat molekul, sehingga menyebabkan hasil MIPs tergerus < 50%; (2) distribusi ukuran partikel MIPs heterogen dan bentuknya tidak beraturan, yang merugikan banyak aplikasi kromatografi dan pemisahan; (3) ada penghancuran beberapa tempat pengikatan selama penggilingan, yang menyebabkan hilangnya kapasitas adsorpsi yang besar; dan (4) tempat

adsorpsi dalam polimer terlalu jauh dari permukaan, sehingga kapasitas pengikatan untuk ion target buruk.

2.3.2 Polimerisasi suspensi

Polimerisasi suspensi adalah salah satu pendekatan produksi MIPs yang berpotensi untuk dikembangkan. Tidak seperti pada metode polimerisasi secara *bulk*, polimerisasi dengan metode suspensi, semua komponen yang terlibat dalam polimerisasi didispersikan dalam fasa air dengan hadirnya surfaktan dan *stabilizer*. Akan tetapi, penggunaan air dalam hal ini sebagai agen pendispersi dapat mengurangi jumlah sisi aktif ikatan dan menurunkan kekuatan ikatan antara monomer fungsional dan *template*.

Polimerisasi suspensi dilakukan dengan melibatkan proses yang heterogen dengan campuran reaksi biasanya terdiri dari matriks cair dan tetesan monomer (Gambar 6). Monomer dan inisiator tidak larut dalam fase cair, namun tetesan monomer dapat dihasilkan dalam matriks cair dan tersuspensi ketika viskositas meningkat di bawah pengadukan mekanis terus menerus. Polimerisasi terjadi pada tetesan fase terdispersi, yang digunakan sebagai reaktor berukuran kecil, menghasilkan butiran polimer.

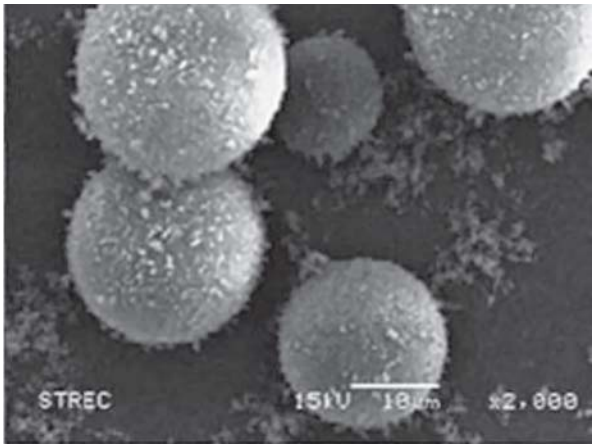


Gambar 6. Teknik polimerisasi suspensi.

Prosedur pencetakan suspensi umum adalah sebagai berikut: (1) monomer fungsional, pengikat silang, dan inisiator dilarutkan dalam pelarut organik sebagai fase organik; (2) pendispersi dilarutkan dalam air sebagai fase air; (3) fasa air dan fasa organik dicampur dengan cara diaduk hingga membentuk suspensi; dan (4) akhirnya, reaksi polimerisasi terjadi pada tetesan tunggal dan sangat kecil yang dapat dipolimerisasi, menghasilkan partikel seragam yang besar. Ukuran partikel mikrosfer polimer tercetak dapat dikontrol dengan menyesuaikan kecepatan pengadukan dan laju volume fase organik dan berair.

Dalam polimerisasi suspensi, perpindahan panas dalam tetesan relatif cepat karena luas permukaan dan rasio volume yang besar, sehingga hambatan perpindahan panas dapat diatasi. Karena tetesan monomer tidak tergantung pada pengadukan, suspensi yang lebih seragam terbentuk dan distribusi ukuran butiran yang relatif sempit dapat dengan

mudah diperoleh. Citra SEM dari MIPs yang dihasilkan melalui metode polimerisasi suspense seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Citra SEM Curcumin MIPs yang disintesis melalui metode polimeriasi suspensi

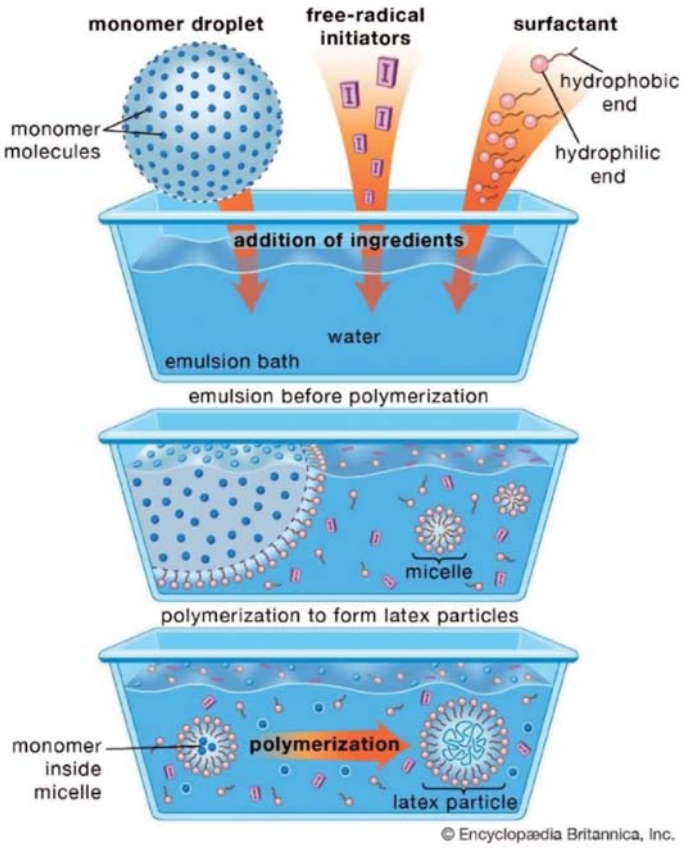
Dalam mempersiapkan MIPs tersebut hal yang perlu diperhatikan adalah adalah *multiple swelling polymerizations* yang melibatkan suspensi partikel benih dengan ukuran seragam pada air. Setelah melalui penambahan sejumlah pelarut organik, partikel benih dapat mengalami swelling hingga ukuran tertentu yang diharapkan. Akan tetapi metode ini memerlukan banyak penambahan pelarut sehingga tidak bernilai ekonomis.

2.3.3 Polimerisasi emulsi

Dalam proses polimerisasi emulsi untuk pembuatan MIPs, pemilihan pengemulsi sangat penting karena sangat mempengaruhi ukuran

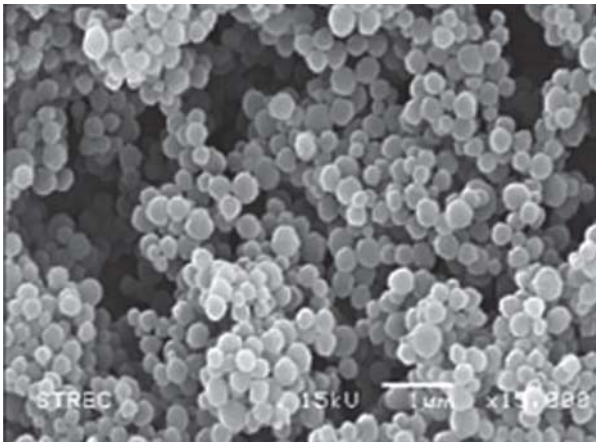
partikel, hidrofilisitas, dan kekakuan MIP. Proses utama polimerisasi emulsi untuk persiapan MIPs melibatkan pelarutan molekul *template* dan monomer fungsional dalam pelarut organik dan prapolimerisasi. Setelah zat pengikat silang dan inisiator dimasukkan, air dan pengemulsi ditambahkan dan larutan diaduk untuk emulsifikasi, setelah itu polimerisasi dilakukan dengan fotoinisiasi atau inisiasi termal dengan adanya inisiator. Mikrosfer polimer lalu dielusi dan dikeringkan untuk mendapatkan mikrosfer MIP.

Emulsi minyak dalam air adalah jenis emulsi yang paling umum, dan monomer terdispersi dalam cairan inert dengan adanya zat pengemulsi untuk membentuk misel kecil (berdiameter sekitar 0,1-1 ?m). Beberapa monomer terletak di dalam misel, sementara yang lain tersuspensi dalam air. Setiap partikel dikelilingi oleh surfaktan, yang mencegah koagulasi partikel. Polimerisasi terjadi ketika inisiator bermigrasi ke dalam misel, menginduksi molekul monomer untuk membentuk molekul besar yang membentuk partikel lateks (Gambar 8).



Gambar 8. Skema metode polimerisasi emulsi

Uniknya, selama proses polimerisasi emulsi, viskositas campuran reaksi tetap tidak berubah meskipun kandungan padatan mencapai 60%. Keunggulan lain dari metode ini, MIPs yang dihasilkan dapat sangat seragam dalam ukuran partikel (Gambar 9). Namun demikian, ada kelemahan pada polimerisasi emulsi yang meliputi kesulitan menghilangkan pengemulsi, kekakuan polimer yang rendah, dan penggunaan kembali yang rendah, yang menyebabkan jarangnya penerapan polimerisasi emulsi.



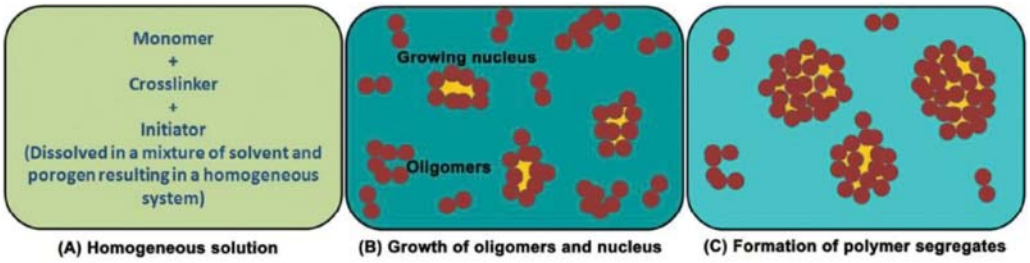
Gambar 9. Citra SEM dari Curcumin MIPs yang dihasilkan melalui proses polimeriasi emulsi

2.3.4 Polimerisasi presipitasi/pengendapan

Precipitation polymerization (polimerisasi pengendapan) merupakan metode yang hingga saat ini dinilai paling sesuai untuk menghasilkan MIPs dengan ukuran yang diinginkan. Pada metode ini, monomer fungsional, molekul template, agen pengikat silang, dan inisiator dilarutkan dalam sejumlah porogen yang lebih banyak dibandingkan dalam *bulk polymerization*. Dalam hal ini, polimer yang tumbuh besar akan mengendap dalam porogen. Jumlah porogen dapat diatur untuk mendapatkan ukuran MIPs yang diharapkan.

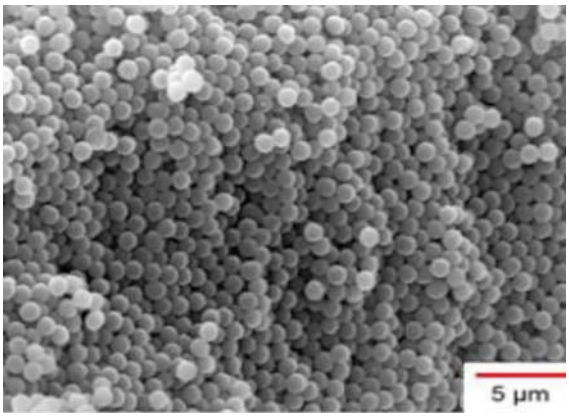
Polimerisasi presipitasi dapat juga disebut sebagai proses polimerisasi heterogen bebas surfaktan yang awalnya dimulai sebagai larutan homogen pengikat silang dan monomer (biasanya <5% b/v) dalam campuran pelarut dan porogen. Saat polimerisasi dimulai, oligomer dan inti sedang terbentuk, oligomer masih larut dalam medium (pelarut), inti

mengendap menghasilkan campuran heterogen. Inti membengkak oleh porogen dan distabilkan oleh lapisan oligomer (Gambar 10).



Gambar 10. Tahap polimerisasi presipitasi (A) Pembentukan sistem yang homogen. (B) Pertumbuhan oligomer dan inti (C) Nukleus tumbuh dan menghasilkan pembentukan segregat polimer (Porogen ditunjukkan oleh warna kuning dalam skema). (Pardeshi and Singh, 2016)

Keuntungan dari metode pengendapan ini adalah tidak memerlukan penambahan surfaktan dan dapat menghasilkan rentang ukuran MIPs dalam skala mikron melalui pengontrolan terhadap kondisi polimerisasi. Adapun citra SEM dari MIPs yang disintesis melalui metode polimerisasi presipitasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 11 (Karnka dkk., 2017).



Gambar 11. Citra SEM MIPs yang disiapkan melalui polimerisasi presipitasi

2.3.5. Pengembangan metode sintesis MIPs dan pelepasan *template*

Dewasa ini, dikembangkan pula metode pencetakan pada permukaan *(surface imprinting technique)* sebagai alternatif metode sintesis untuk meningkatkan performa dari MIPs. Dalam strategi sintesis MIPs ini, situs pengikatan yang dicetak terletak pada atau sangat dekat dengan permukaan polimer. Hal ini dapat menjadi solusi terhadap beberapa masalah dalam penggunaan MIPs, seperti perpindahan massa yang terbatas, rendahnya kapasitas adsorpsi, dan pelepasan molekul cetak yang tidak lengkap. Pencetakan permukaan polimer biasanya dilakukan dengan mensintesis lapisan polimer tipis menggunakan pendekatan yang serupa dengan persiapan melalui *bulk polymerization* atau dengan menempelkan *template* pada permukaan substrat (dapat berupa lapisan datar atau bulat) melalui polimerisasi.

Dalam hal pelepasan *template*, terdapat tiga pendekatan utama yang dapat dilakukan, yaitu ekstraksi dengan pelarut umum yang sesuai, ekstraksi pelarut dengan dibantu dengan pengadukan, serta ekstraksi dengan cairan sub-kritik atau superkritik. Masing-masing teknik ekstraksi ini memiliki kelebihan dan kelemahan, bergantung pada sifat dan stabilitas *template* dan MIPs. Oleh karena itu, pertimbangan teknik pelepasan *template* yang sesuai diperlukan untuk menentukan proses yang lebih sederhana, cepat, ramah lingkungan, tidak berlebihan dalam penggunaan pelarut yang dapat berakibat pada biaya yang lebih ekonomis dan berpotensi untuk digunakan pada skala industri.

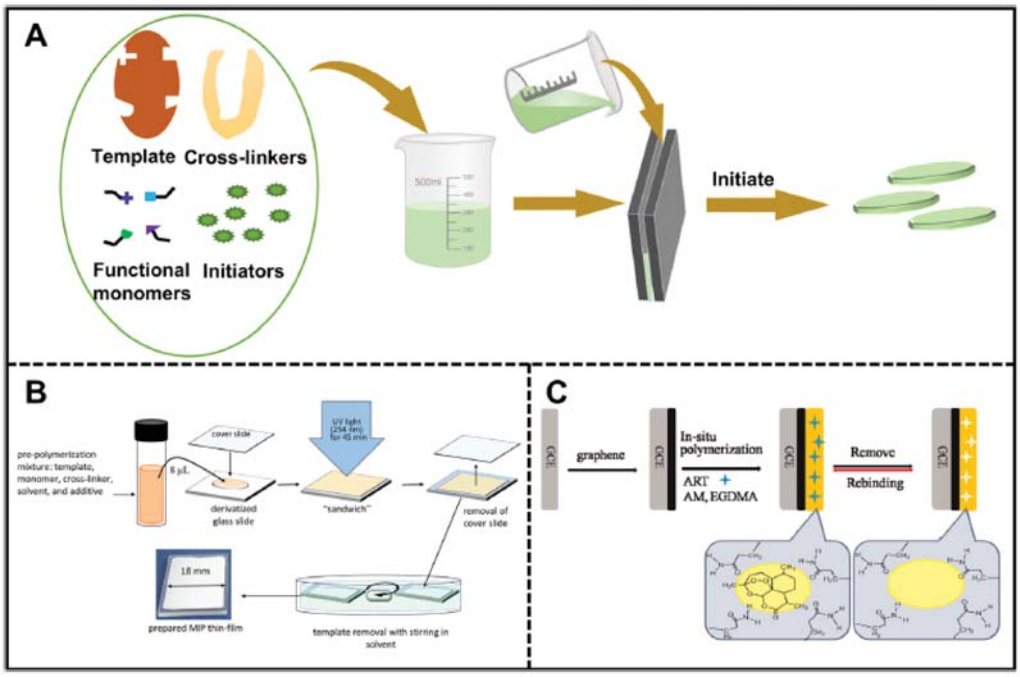
3. MEMBRAN BERCETAKAN MOLEKUL

Proses pemisahan menggunakan membran merupakan teknologi yang dapat dilakukan dengan memanfaatkan bahan baku secara lebih baik, efisiensi pemisahan lebih besar dengan biaya lebih rendah, serta pemurnian zat cair dari senyawa pencemar. Hingga saat ini, teknologi pemisahan dengan membran banyak digunakan di berbagai bidang, sepeti kimia, fisika, farmasi, pangan, bioteknologi, pengolahan air, dan lain sebagainya. Akan tetapi, penggunaan membran sangat memerlukan peningkatan selektivitas membran terhadap senyawa kimia tertentu sebagai zat yang akan dipisahkan agar kinerja pemisahannya semakin baik. Berdasarkan hal tersebut, pembuatan sisi pengenalan spesifik dalam matriks membran atau pada permukaan membran diperlukan untuk produksi membran yang selektif.

Dewasa ini, mulai dikembangkan membran bercetakan molekul atau *molecularly imprinted membranes* (MIMs) yang merupakan material membran yang diproduksi melalui proses pencetakan secara molekuler sehingga memiliki sisi pengenalan yang spesifik namun juga memiliki kemampuan pemisahan dengan fitur khas membran. Keberadaan situs pengenalan molekuler tertentu dalam matriks MIMs tersebut mampu membedakan antara molekul yang ditargetkan yang disebut sebagai *"template"* dengan molekul lainnya. Pengenalan spesifik ini disebabkan oleh komplementer secara kimiawi dan spasial antara senyawa *template* dan situs pengenalan membran. Membran tercetak molekul ini dikembangkan dengan memanfaatkan keunggulan dari teknik

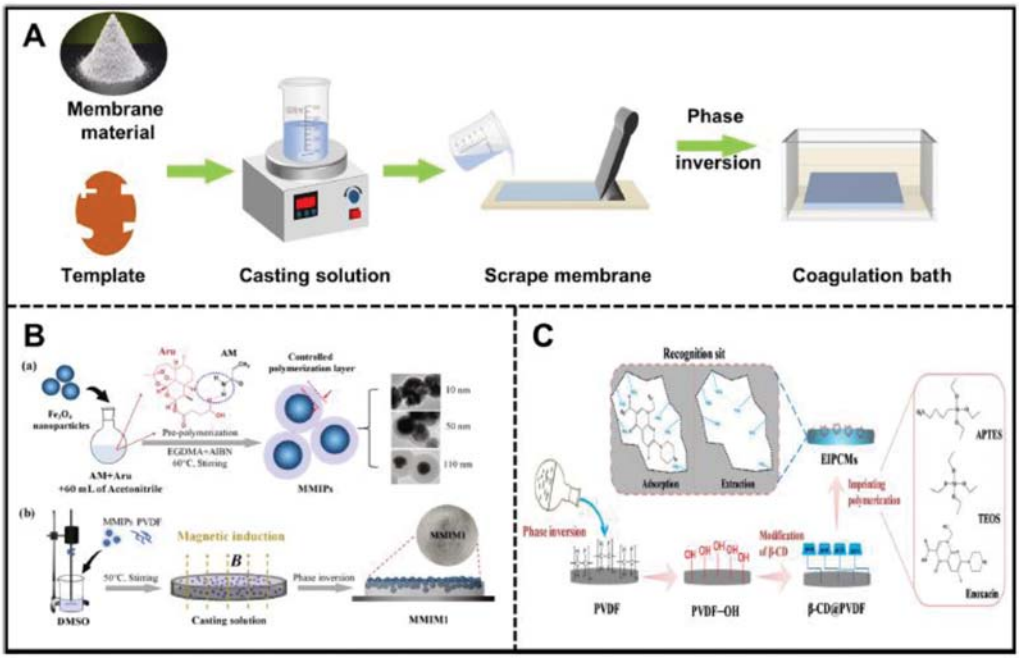
pencetakan *bioinspired* dan teknologi membran. Pengembangan sistem tersebut telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan proses deteksi dan pemisahan pada tingkat molekuler. Apabila dibandingkan terhadap aplikasi polimer tercetak, proses berdasarkan membran tercetak molekul lebih efisien karena memungkinkan untuk beroperasi secara kontinu, tanpa memerlukan aditif, dan dapat beroperasi pada suhu rendah sehingga mengurangi biaya operasi. Selain itu, MIMs mempunyai kespesifikan yang lebih baik dibandingkan membran tradisional dengan tetap mempertahankan sifat efisiensi pemisahan.

Pada tahun 1990, Piletsky dkk. berhasil menyiapkan MIMs menggunakan adenilat sebagai molekul *template* untuk pertama kalinya dengan polimerisasi *in-situ* (Piletsky dkk., 1990). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 12A, metode polimerisasi *in-situ* melibatkan pelarutan proporsi tertentu dari molekul *template*, monomer fungsional, pengikat silang, dan aditif dalam pelarut yang sesuai, dan menuangkan campuran yang diperoleh di antara dua pelat.



Gambar 12. (A) Proses pembuatan MIMs melalui polimerisasi secara in situ, (B) Pembuatan lapisan tipis MIP melalui polimerisasi foto-radikal (Hijazi dkk., 2020), (C) Preparasi sensor elektrokimia berbasis MIMs untuk penentuan artemisin (Bai dkk., 2015).

Gambar Membran cetakan molekuler yang paling umum dikembangkan memiliki konfigurasi berupa lembaran datar dan dibuat melalui teknik inversi fasa dari larutan kental polimer pembentuk membran yang juga mengandung molekul *template* (Gambar 13). Memori molekuler *template* diinduksi dalam membran pada saat yang sama dengan membran yang terbentuk dari larutan polimernya.

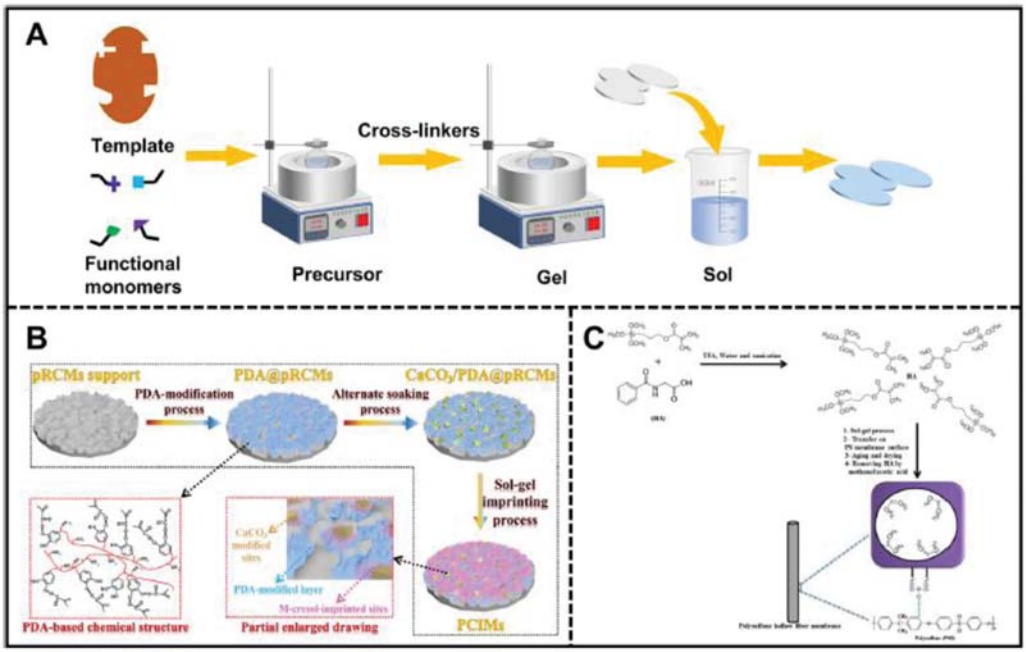


Gambar 13. (A) Proses pembuatan MIMs melalui metode inversi fasa, (B) Preparasi MIMs melalui inversi fasa berbasis medan magnet (Bai dkk., 2021), (C) Sintesis membran nanokomposit tercetak molekul melalui inversi fasa (Wu dkk., 2020)

Selain menggunakan teknik inversi fasa, membran yang memiliki konfigurasi serat berongga juga dapat disintesis setelah melaui tahap penambahan senyawa *template* dan melepaskannya. Dikarenakan spesifisitasnya yang tinggi, MIMs berfungsi untuk pengenalan molekuler dalam berbagai bidang, termasuk lingkungan, makanan, dan farmasi (Noaman dan Park 2008; Trotta dkk., 2007; Donato dkk., 2010 dan Sergeyeva dkk., 2008).

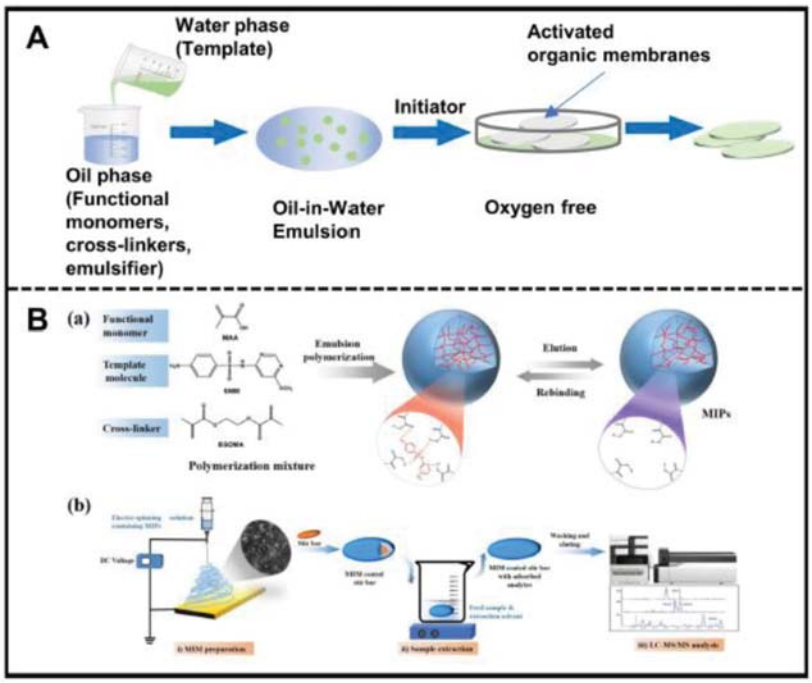
Sol-gel adalah metode pencetakan molekuler yang dilakukan dengan memasukkan molekul *template* ke dalam struktur jaringan anorganik dan organik-anorganik. Dalam beberapa tahun terakhir, metode ini telah

berkembang pesat dan telah diterapkan secara bertahap untuk pemisahan campuran, pengembangan sensor, dan bidang lainnya. Seperti ditunjukkan pada Gambar. 14, umumnya, *template*, *cross-linker*, inisiator, dan senyawa lainnya dicampur untuk membentuk gel melalui reaksi kondensasi hidrasi, dan kemudian monomer fungsional ditambahkan untuk menyiapkan MIMs. Proses preparasi melalui metode ini memerlukan kondisi reaksi yang *mild* dan operasional yang sederhana. Selain itu, porositas, ukuran pori, dan luas permukaan bahan membran dapat dikontrol dengan mengubah komponen, konsentrasi, dan pH sistem reaksi selama proses preparasi.

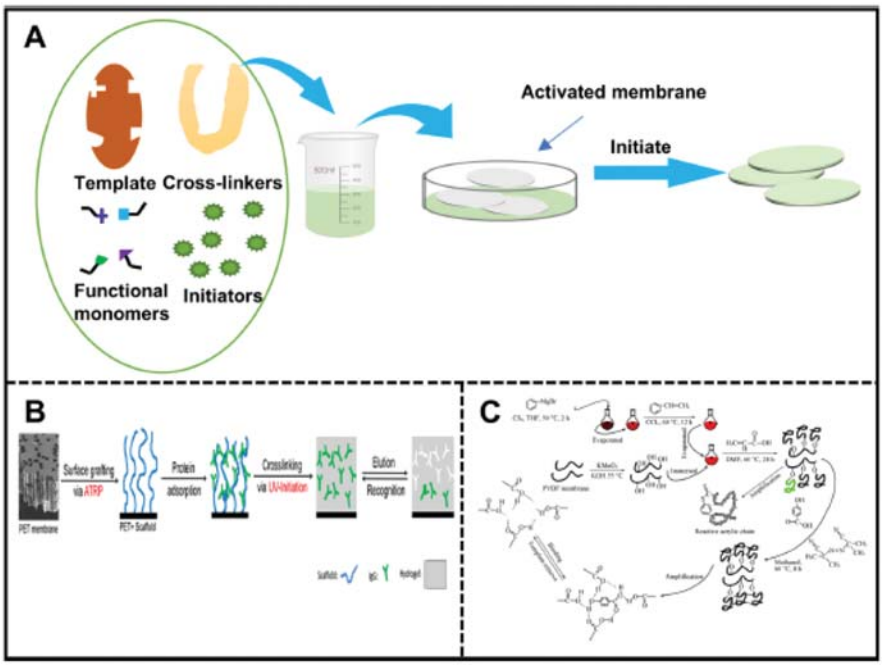


Gambar 14. (A) Proses pembuatan MIMs melalui polimerisasi sol-gel, (B) Prosedur sintesis membrane nanokomposit tercetak berbasis PDA/CaCO3 (Wu dkk., 2020), dan (C) Preparasi membran serat berongga tercetak molekul (MSHM) melalui polimeriasi sol-gel (Moein dkk., 2015)

Polimerisasi emulsi mengacu pada modifikasi permukaan membran komersial berpori dengan polimerisasi emulsi air dalam minyak dengan kondisi yang *mild*. Prosesnya pertama-tama membutuhkan persiapan emulsi air-dalam-minyak yang mengandung molekul *template* dan monomer fungsional, dan kemudian merendam membran dalam emulsi untuk memulai polimerisasi (Gambar 15). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15A, Cui dkk pertama-tama menyiapkan MIP melalui polimerisasi emulsi menggunakan senyawa *template*. Kemudian diperoleh MIM dengan larutan MIPs-doping-*spinning* menggunakan teknik *electrospinning* (Cui dkk., 2021).



Gambar 15. (A) Proses pembuatan MIMs melalui polimerisasi emulsi, (B) Prosedur penyiapan membran elektrospun nanofiber tercetak molekul dengan bantuan batang pengaduk (Cui dkk., 2021).



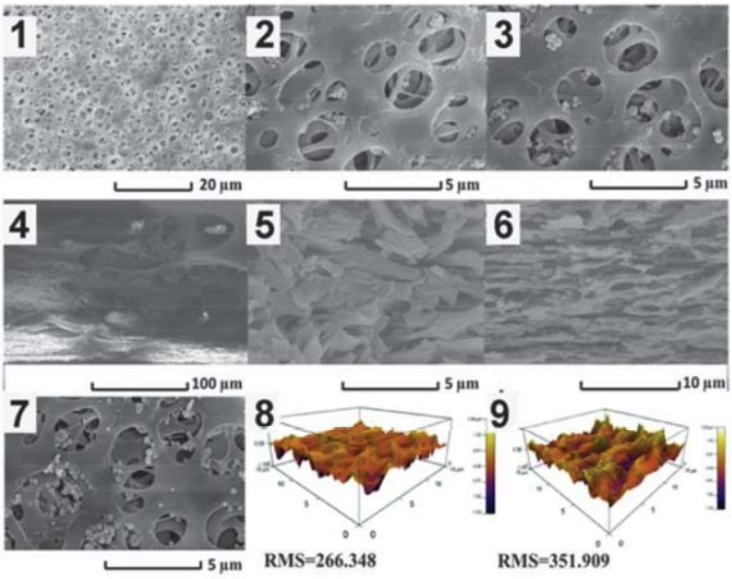
Gambar 16. (A) Proses penyiapan MIMs melalui polimerisasi pencangkokan pada permukaan (surface grafting polymerization), (B) Pencetakan immunoglobulin G melalui polimeriasi pencangkokan, (C) Rute sintesis MIMs.

Metode pencangkokan pada permukaan merupakan salah satu metode dalam penyiapan membran komposit bercetakan molekul di mana membran dengan fluks tinggi (misalnya membran mikrofiltrasi) dicangkok dan dikopolimerisasi secara termal atau diinisasiasi melalui cahaya (Gambar 16). Dibandingkan dengan beberpa metode yang lain, modifikasi pada permukaan ini memiliki keuntungan dalam hal mengurangi jumlah polimer bercetakan molekul yang digunakan, meningkatkan laju transfer massa, meningkatkan aksesabilitas dari sisi pengenalan pada membrane, dan memperbesar nilai kapasitas adsorpsinya. Yin dkk mengembangkan MIMs sebagai adorben untuk

immunoglobulin G melalui dua tahap strategi pencetakan, yaitu pencetakan pada permukaan dan pada jaringan (Gambar 16A). MIMs tersebut mampu memisahkan imunogloblin G dari campurannya yang mengandung *human serum albumin* (Yin dan Ulbricht, 2013).

Untuk memahami struktur dan kinerja MIMs lebih jelas, mereka perlu dikarakterisasi dengan metode fisik dan kimia, termasuk spektroskopi UV-Vis, spektroskopi fourier-transform infrared (FT-IR), thermogravimetric analysis (TGA), transmission electron microscopy (TEM), energy dispersive X-ray (EDX), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), diffuse reflectance spectroscopy (DRS), scanning electron microscopy (SEM), dan atomic force microscopy. TGA digunakan untuk mempelajari termostabilitas dan hidrofilisitas MIMs. Sementara itu, TEM digunakan untuk mengamati struktur mikro dari MIPs yang telah disiapkan. Karakterisasi XPS, EDS, dan DRS dapat menyelidiki distribusi komposisi elemen pada membran untuk menunjukkan keberhasilan sintesis struktur MIMs nanokomposit.

Karakterisasi SEM umum digunakan untuk menyelidiki lebih lanjut morfologi MIMs yang disintesis secara berbeda. Sedangkan AFM dapat digunakan untuk mengamati tingkat kekasaran permukaan dan struktur berpori dari lapisan polimer pada permukaan membran untuk mengkonfirmasi pencangkokan yang tepat. Contoh citra SEM dan hasil karakterisasi AFM terhadap regenerated cellulose membranes (RCMs) dan molecularly imprinted composite membranes (MICMs) ditunjukkan oleh Gambar 17 (Lu dkk., 2020).



Gambar 17. Gambar SEM dari (1) RCMs murni, (2) non-imprinted composite membranes (NICMs), (3) MICMs, (4) penampang RCMs murni, (5) penampang NICMs, (6) penampang MICMs, (7) MICMs setelah elusi, dan gambar AFM dari (8) RCMs murni dan (9) MICMs.

4. POLIMER BERCETAKAN MOLEKUL – NANOFIBER

Electrospinning adalah teknologi serbaguna dan menarik untuk menghasilkan serat ultra-halus dengan diameter dari beberapa mikrometer bahkan hingga sub-nanometer. Sejauh ini, sejumlah besar bahan seperti polimer, keramik komposit, logam, nanotube karbon, bahkan bakteri dan virus dapat dibuat atau digabungkan ke dalam serat mikro/nano dengan elektrospinning. Bahan nanofiber sebagai produk dari electrospinning memiliki sifat unik, seperti diameter ultra-halus, rasio luas permukaan terhadap volume yang besar, porositas besar, rasio aspek panjang terhadap diameter yang tinggi, sifat mekanik yang tinggi

karena orientasi molekul yang tinggi di sepanjang sumbu serat, dan produk nanofiber yang mudah berekor. Karena sifatnya yang sangat baik, bahan nanofiber/nanofiber *electrospinning* telah diterapkan ke berbagai bidang, seperti untuk rekayasa/perbaikan jaringan, pelepasan obat, pemisahan dan pemurnian, bahan dielektrik, sel surya, penyimpanan hidrogen, sensor, dan untuk fabrikasi komposit yang diperkuat nanofiber (Jiang dkk., 2018).

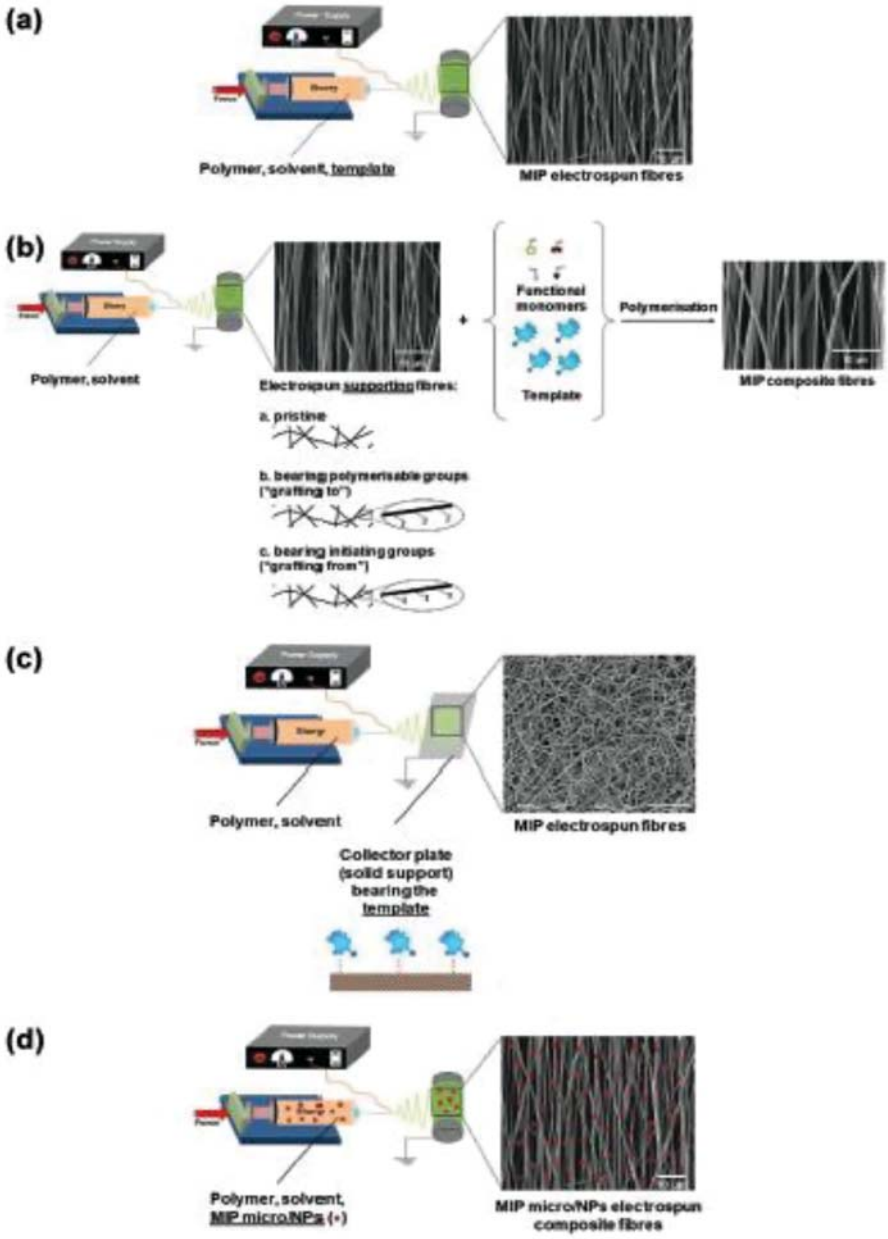
Secara umum, metode electrospinning terdiri dari tiga bagian, yaitu (1) catu daya bertegangan tinggi, (2) pemintal/spinneret (jarum logam atau kawat) dan (3) kolektor (jaring logam, kertas aluminium, kertas roti, piring, cakram berputar atau drum). Selama proses *electrospinning*, tegangan tinggi diterapkan pada tetesan dari larutan polimer atau lelehan polimer di ujung pemintal. Ketika daya tegangan tinggi terus meningkat, tetesan akan mulai memanjang menjadi bentuk kerucut yang dikenal sebagai "Taylor cone" yang dalam hal ini, tegangan kritis yang diterapkan tercapai. Jika gaya elektrostatik eksternal yang diterapkan melebihi tegangan kritis dalam kisaran tertentu, jet *electrospinning* yang stabil dapat diperoleh. Morfologi dan diameter serat akhir tergantung pada tiga faktor utama: 1) parameter dari set-up *electrospinning*, seperti laju alir, diameter dan bentuk spinneret, jarak antara kolektor dan ujung jarum/spinneret, dan kecepatan rotasi kolektor; 2) parameter dari larutan polimer, seperti sifat polimer (jenis, berat molekul, atau indeks dispersi polimer), sifat pelarut (jenis, titik didih, konstanta dielektrik, dan tegangan permukaan), sifat larutan polimer (konsentrasi, viskositas, perilaku reologi,

konduktivitas listrik, dan tegangan permukaan) dan adanya aditif (garam, surfaktan); 3) parameter dari lingkungan sekitar, seperti kelembaban relatif, suhu, dan kecepatan gas dalam pengaturan *electrospinning* (Vaseashta, 2007). Oleh karena itu, parameter *electrospinning* dapat bervariasi untuk masing-masing polimer. Namun, pengubahan parameter tersebut dengan seksama, dapat menghasilkan sejumlah serat polimer dengan morfologi/struktur dan diameter yang bervariasi dalam kisaran dari beberapa nanometer hingga beberapa mikrometer melalui *electrospinning*.

Pendekatan utama untuk menghasilkan MIPs melalui *electrospinning* dapat dibagi menjadi empat kategori utama (Gambar 18), yaitu (i) pencetakan molekul selama proses e*lectrospinning* (*template* dilarutkan dalam larutan electrospinning); (ii) pengembangan lapisan MIP pada permukaan mikro/nanofiber *electrospun* yang bertindak sebagai pendukung untuk MIP, yang dihasilkan baik tanpa adanya interaksi spesifik dengan penyangga (murni), atau melalui pendekatan pencangkokan khusus di mana salah satu gugus yang dapat dipolimerisasi ("grafting to") atau bagian awal ("grafting from") terdapat pada permukaan serat electrospun pendukung; (iii) pendekatan pencetakan fase padat di mana templat diimobilisasi ke media pengumpul untuk produk electrospun dan dihilangkan secara mekanis; (iv) dispersi/konjugasi mikro atau nanopartikel MIP (MIP NPs) menjadi/ke mikro/nanofiber electrospun.

Baru-baru ini, fabrikasi membran poliakrilonitril (PAN) tercetak ion

magnetik (MII-PMs) berdasarkan serat nano elektro-spun dengan peningkatan kemampuan adsorpsi, selektivitas, dan daur ulang telah dilakukan untuk penghilangan Pb(II) yang efisien dan selektif dari air. Menariknya, dalam percobaan adsorpsi kompetitif, MII-PM menunjukkan kapasitas adsorpsi yang jauh lebih tinggi terhadap Pb(II) daripada ion logam pengganggu lainnya dengan urutan selektifitas Pb2+>Cu2+>Mg2+>Co2+>Ni2+>Cd2+>Zn2+>Na+>K+ (Wang dkk., 2022).



Gambar 18. Metode sintesis MIP nanofibers (a) pencetakan molekul selama proses *electrospinning*; (b) pengembangan lapisan MIP pada permukaan mikro/nanofiber *electrospun*; (c) pendekatan pencetakan fase padat, dan (d) dispersi/konjugasi mikro atau nanopartikel MIP.

5. APLIKASI

5.1 MIPs dalam pemisahan dan pemurnian

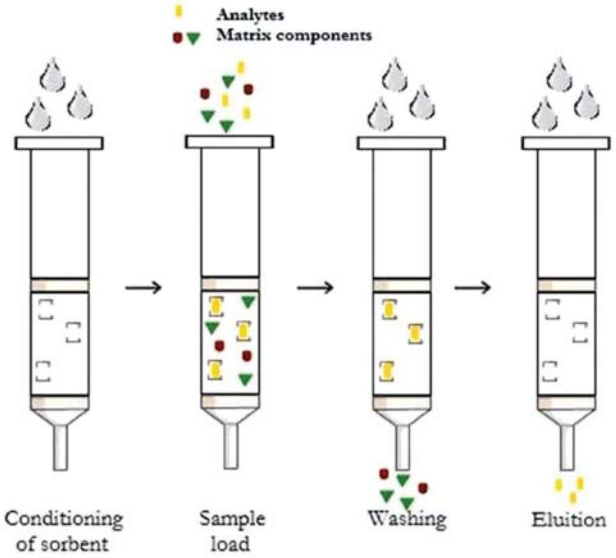
Salah satu aplikasi paling tradisional dari molecularly imprinted polymers (MIPs) terutama untuk *liquid chromatography* (LC) adalah *molecularly imprinted chromatography* dengan MIPs yang biasanya disintesis dengan polimerisasi *bulk* (massal), kemudian digiling dan diayak secara mekanik lalu dikemas dalam wadah kolom kromatografi. Namun, pemrosesan secara mekanik tersebut menghasilkan partikel tidak beraturan dengan distribusi ukuran yang relatif luas, sehingga menghasilkan pengemasan dengan kualitas yang tidak dapat direproduksi. Untuk alasan inilah kolom pencetakan molekul monolitik baru-baru ini disiapkan langsung di dalam kolom baja tahan karat atau kolom kapiler.

MIPs monolitik memiliki lebih sedikit situs nonselektif daripada partikel MIPs yang dihasilkan oleh polimerisasi *bulk*, sehingga memberikan pemisahan enansiomer yang lebih buruk. Oleh karena itu, banyak upaya yang telah dilakukan untuk mengurangi distribusi ukuran yang heterogen tersebut.

MIPs juga dapat digunakan sebagai *Chiral Stationary Phases* (MIP-CSPs) pada *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) untuk mendapatkan resolusi enansiomer dari larutan rasemat pada senyawa yang berbeda, seperti turunan asam amino dan obat-obatan. Akan tetapi, salah satu kelemahan utama dari MIPs untuk kolom HPLC yang

membatasi aplikasi komersialnya adalah pelebaran puncak dan *tailing* yang berlebihan. Bahkan, sering ditemukan dalam kromatogram untuk *template* ketika MIPs digunakan sebagai sorben dan hal ini dikaitkan dengan heterogenitas situs pengikatan di polimer tersebut. Fenomena ini tergantung pada konstanta asosiasi dan beban sampel, dan akan meningkat untuk nilai konstanta asosiasi yang tinggi. Upaya terbaru untuk meningkatkan efisiensi kromatografi telah dilakukan yang mencakup penggantian pencetakan non-kovalen dengan yang kovalen dan penggunaan beberapa strategi untuk mendapatkan partikel mikrosfer berukuran seragam.

Ekstraksi Fase Padat (SPE) adalah area penting lain dari penerapan MIPs dalam kimia analitik. MIPs untuk ekstraksi fase padat (MISPE) telah diterapkan baik dalam prosedur online maupun off-line. Partikel MIPs, yang digunakan sebagai bahan sorben selektif, dapat dikemas dalam precolumn HPLC untuk mode on-line dan dalam *cartridge* antara dua frit untuk mode off-line. Prosedur MISPE on-line, secara langsung digabungkan dengan sistem analitis tertentu seperti HPLC, meminimalkan manipulasi sampel dan mengurangi hilangnya analit dan risiko kontaminasi. Selanjutnya, metode ini sangat mengurangi waktu untuk *pre-treatment* sampel. Terlepas dari kelebihan ini, metode off-line adalah yang paling banyak digunakan karena prosedurnya yang sederhana. Tahapan proses pemisahan menggunakan MISPE ditunjukkan oleh Gambar 19.



Gambar 19. Tahapan dalam proses pemisahan dengan menggunakan MISPE

MISPE diterapkan untuk ekstraksi beberapa senyawa dalam matriks sampel yang berbeda seperti sampel biologis, sampel lingkungan dan juga dalam analisis makanan. Aplikasi pertama MISPE dibuat oleh Sellergren pada tahun 1994 yang menyiapkan ekstraksi selektif pentamidin, obat yang digunakan untuk pengobatan gangguan terkait AIDS, dalam sampel urin. Dalam beberapa tahun terakhir, MISPE juga diterapkan secara luas untuk penentuan analit dalam sampel lingkungan. Secara khusus, senyawa fenolik dipelajari secara luas karena toksisitasnya yang nyata dan distribusinya yang luas di beberapa sampel lingkungan.

Dalam beberapa tahun terakhir, sorben selektif kelas baru untuk SPE untuk mengkonsentrasikan polutan lingkungan, senyawa fenolik, dari sampel air berduri dikembangkan oleh Peipei dkk. Sebuah MIP dibuat

dengan metode polimerisasi *bulk* menggunakan 2,4-dimetilfenol sebagai *template* karena toksisitasnya yang rendah. Optimasi sintesis dilakukan dengan menggunakan tiga porogen yang berbeda, kloroform, asetonitril dan toluena dan perbedaan selektivitas pengenalan kolom polimer diamati dalam sistem HPLC. Metodologi SPE kemudian dikembangkan dan digunakan untuk mengkonsentrasikan senyawa fenolik di lingkungan air. MIP yang dihasilkan menunjukkan selektivitas yang baik untuk 2,4-dimetilfenol, 2,4-diklorofenol, 4-klorofenol, 4-metilfenol dan fenol. Penerapan MIP-SPE pada sampel air lingkungan menegaskan kemampuan sorben MIP untuk mengisolasi senyawa fenolik secara selektif.

Selain itu, beberapa penelitian yang menerapkan teknologi pencetakan pada berbagai teknik ekstraksi selektif telah muncul selama beberapa tahun terakhir seperti teknik *Solid-Phase Microextraction* (SPME), *Stir-Bar Sorptive Extraction* (SBSE) dan *Matrix Solid Phase Dispersion* (MSPD). Pada SPME, MIP digunakan sebagai sorben pada suatu serat yang telah disintesis dengan menggunakan metode polimerisasi massal *(bulk)*. Sedangkan pada SBSE, teknik ini bertujuan untuk meningkatkan massa sorben yang digunakan dalam serat SPME. SBSE didasarkan pada penggunaan magnet yang dilapisi polidimetilsiloksan yang mampu menahan beberapa senyawa yang ada dalam larutan. Desorpsi senyawa yang diekstraksi dilakukan dengan menggunakan volume pelarut organik yang sangat rendah atau secara termal dalam peralatan kromatografi gas. Contohnya seperti yang telah dilakukan oleh Hu dkk.

yang secara selektif mengekstraksi empat ekstrogen dari sampel air. MSPD merupakan teknik ekstraksi yang berbeda dari yang sebelumnya telah disebutkan, karena ekstraksi ini umumnya dilakukan secara langsung pada sampel padat, semipadat dan kental. Seperti yang telah dilakukan oleh Gua dkk. Yaitu dengan menentukan jumlah kloramfenikol yang terdapat pada sampel jaringan ikan dan mendapatkan perolehan yang lebih tinggi daripada sorben lain yang tersedia secara komersial.

5.2 MIP sebagai sensor kimia dan biosensor

Sensor kimia dan biosensor sangat penting digunakan terutama dalam hal diagnostik klinis, analisis makanan dan analisis lingkungan. Dewasa ini, dilakukan upaya untuk mensintesis reseptor buatan yang mampu mengikat analit target dengan afinitas dan selektivitas yang meniru mekanisme kerja antibodi maupun enzim, yaitu menggunakan MIT. Integrasi MIP dengan sensor dapar diwujudkan dengan polimerisasi *in situ* menggunakan inisiator termal atau fotokimia, atau melalui pencangkokan di permukaan dengan inisiasi kimia maupun sinar UV. Keuntungan dari pendekatan terakhir ini terletak pada kemungkinan modifikasi permukaan elektroda inert yang terkontrol dengan film tipis polimer tertentu.

Selain itu, polimer juga dapat dielektropolimerisasi pada permukaan platform transduksi. Dalam hal ini, ada beberapa masalah adhesi, terutama selama proses pencucian QCM *(Quartz Crystal Microbalance)* yang dipolimerisasi berlapis MIPs dengan pelarut organik yang

terkadang menyebabkan terkelupasnya sebagian dari lapisan MIPs yang dihasilkan. Oleh karena itu, pre-treatment khusus harus dilakukan untuk meningkatkan adhesi MIPs pada platform transduser.

Sensor MIPs generasi pertama disiapkan menggunakan polimer tercetak yang disintesis dalam bentuk monolit. Partikel MIPs yang diperoleh diendapkan di dekat elektroda dengan memasukkan partikel ke dalam pasta karbon dari elektroda screen-printed atau ke dalam gel agarosa pendukung. Diamati bahwa respons sensor sangat bergantung pada seberapa dekat elemen MIPs dan transduksi terintegrasi dan seberapa efisien gaya elekstrostatik di antara keduanya. Beberapa aplikasi penerapan MIPs pada bidang sensor kimia diantaranya adalah:

1. Sensor morfin amperometrik menggunakan partikulat MIPs yang diimobilisasi dengan gel agar pada permukaan elektroda (Kriz dan Mosbach, 1995). Pada metode ini, perangkat menggunakan strategi perpindahan dua tahap yang kompetitif di mana awalnya *template* elektro-aktif terikat pada polimer tercetak morfin yang telah diimobilisasi dalam lapisan tipis agarosa. Selanjutnya pesaing elektro-inaktif yang berupa kodein ditambahkan sehingga mengakibatkan perpindahan morfin dari MIPs. *Template* yang dipindahkan kemudian ditentukan secara amperometrik.
2. Sensor QCM-MIP yang merupakan kombinasi MIPs dengan transduser piezoelektrik, missal kristal kuarsa untuk mendapatkan perangkat sensor untuk deteksi atropine dalam serum dan urin manusia. Pelapisan kristal dengan MIPs dapat diperoleh

dengan polimerisasi *in situ* langsung ke permukaan perangkat atau melalui partikel MIPs yang telah disiapkan sebelumnya yang diimobilisasi pada permukaan sensor menggunakan matriks PVC. Dalam hal ini, pendekatan elektropolimerisasi digunakan untuk menyiapkan anilin-ko-O-fenilendiamin atropin lapisan MIPs ke kristal kuarsa piezoelektrik untuk menghasilkan sensor *Bulk Acoustic Wave* (BAW).

3. Penentuan jumlah parasetamol dan nikotin dalam cairan biologi oleh sensor berlapir polimer (Tan dkk., 2001). Dalam hal ini, permukaan kristal kuarsa piezoelektrik dimodifikasi menggunakan polimer tercetak parasetamol sebagai *template* untuk mendapatkan sensor BAW yang selektif.
4. Sensor QCM untuk penentuan 8-hidroksi-2′-deoksiguanosin (8-OHdG) secara selektif dalam darah pasien kanker.
5. Sensor QCM-MIP juga diaplikasikan untuk mendeteksi daminozide yang merupakan bahan kimia bersifat karsinogenik dalam kemasan makanan. Selain itu, digunakan juga untuk mendeteksi polutan lingkungan bisfenol A, asetaldehid, dan monoterpen.
6. Dickert dan tim menyelidiki kemampuan QCM-MIP dalam mengikat ragi dan menggunakan *Saccaromyces cerevisiae* sebagai *template*. Selain itu, mereka menggunakan pendekatan serupa untuk mendapatkan sensor polimer yang dicetak secara molekuler untuk virus mosaik tembakau dan sel darah merah.

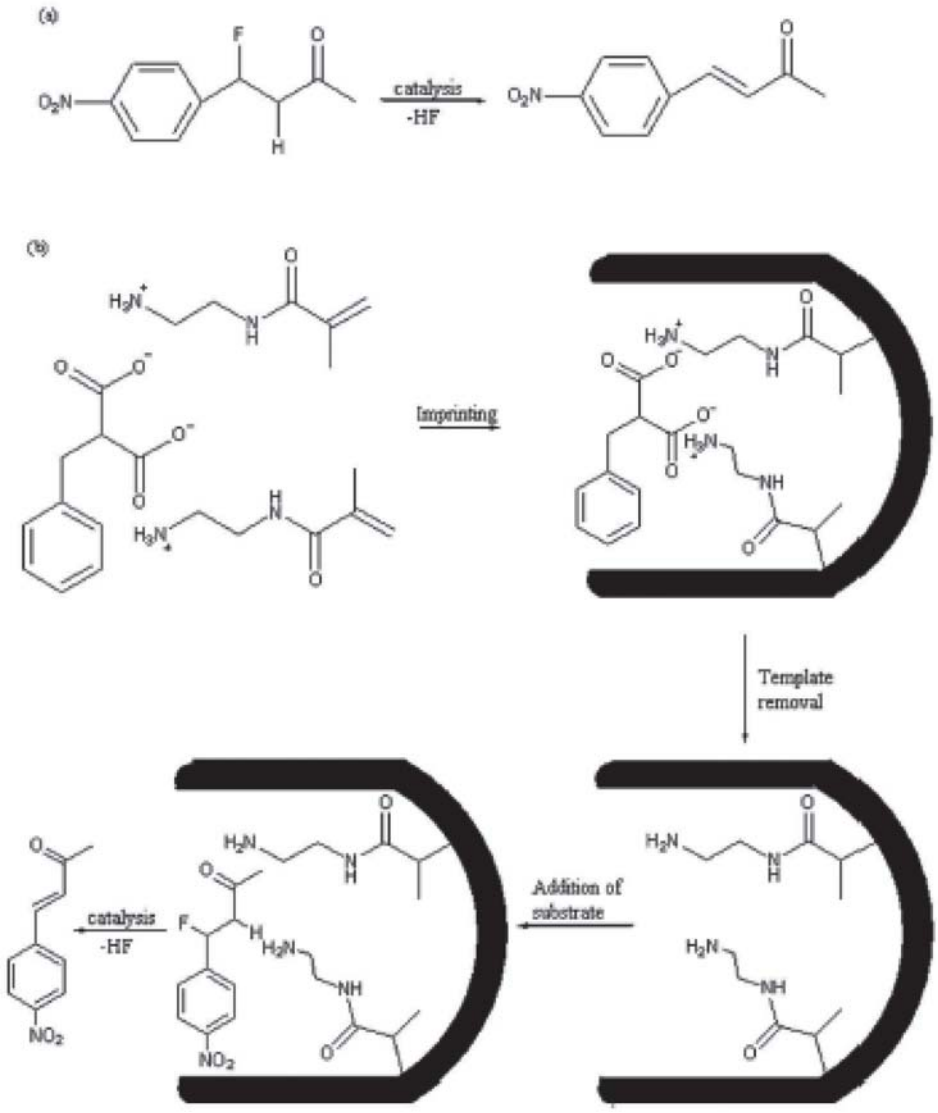
7. Selama dekade terakhir, teknologi MIP telah dipelajari secara ekstensif untuk aplikasi potensial dalam pseudo-immunoassay. Secara khusus, *Molecularly Imprinted Sorbent Assay* (MIA) pertama dilaporkan oleh Mosbach untuk mendeteksi teofilin dalam serum dibandingkan dengan *Enzyme-Multiplied Immunoassay Technique* (EMIT) komersial. MIA pertama ini menunjukkan korelasi yang sangat baik dengan EMIT dan juga menghasilkan profil reaktivitas silang yang sangat mirip dengan antibodi alami.

5.3 MIPs untuk aplikasi katalitik

Selektivitas dan kekuatan yang tinggi dari MIPs membuatnya dapat digunakan pada suhu dan tekanan tinggi. Selain itu, MIPs juga memiliki stabilitas yang baik terhadap beberapa pelarut organik, dan juga dalam kondisi reaksi asam dan basa. Dengan demikian, MIPs dapat digunakan sebagai pengganti biomolekul, seperti enzim dan antibodi katalitik alami yang sangat rentan terhadap kondisi tertentu.

Penggunaan MIPs untuk aplikasi katalitik sangat penting karena katalis MIPs mampu meniru selektivitas dan sterospesifisitas domain pengikat antibodi dan enzim yang umumnya digunakan sebagai katalis dalam beberapa reaksi. Matriks polimer yang diperoleh memiliki rongga dengan bentuk yang mirip dengan bentuk *template* yang digunakan tetapi MIT dalam prosesnya perlu memastikan penempatan yang tepat dari gugus fungsi di situs pengikatan dengan mempertimbangkan jenis proses katalitiknya.

Strategi menggunakan analog substrat sebagai *template* melibatkan penggunaan senyawa yang meniru kompleks reaksi antara substrat dan matriks. Gugus katalitik akan dimasukkan dalam posisi yang tepat ke dalam rongga polimer dan selanjutnya akan bertindak secara katalitik dengan adanya substrat yang sebenarnya. Contohnya seperti strategi yang diterapkan oleh Shea dan Beach untuk mendapatkan dehidrofluorinasi -fluoroketon menggunakan N-(2-aminoetil) metakrilamida sebagai monomer fungsional dasar dengan gugus katalitik (Gambar 20). Beberapa asam dikarboksilat digunakan sebagai analog template untuk mendapatkan posisi yang benar dari gugus amino dalam rongga polimer. Telah terlihat bahwa aktivitas katalitik polimer terutama tergantung pada posisi gugus karboksilat dari *template*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa asam benzilmalonat merupakan template terbaik untuk mendapatkan polimer tercetak paling aktif (Beach dan Shea, 1994).



Gambar 20. Sistem katalitik MIPs (Beach dan Shea, 1994)

Sementara itu, aplikasi lain di bidang katalisis ini menunjukkan bahwa polimer tercetak cerdas dengan kinerja yang menyerupai enzim terdiri dari poli(N-isopropilakrilamida)-mengandung jaringan tercetak p-nitrofenil fosfat telah berhasil disintesis. Dalam hal ini, pada suhu yang

relatif rendah, seperti 20 oC, katalitik MIPs menunjukkan reaksi katalisis yang kuat karena jaringan hidrofiliknya yang memungkinkan akses ke situs aktif, sementara pada suhu yang lebih tinggi, penurunan yang signifikan dari hidrofilisitas MIP menyebabkan menyusutnya polimer tercetak yang mengakibatkan aktivitas katalitiknya menjadi terhambat (Li dkk., 2011).

5.4 MIP untuk aplikasi *drug delivery*

Kemampuan MIPs dalam mengikat molekul bioaktif yang kuat dan selektif membuat material ini berpotensi untuk diaplikasikan di bidang biologi. MIPs untuk aplikasi *drug delivery* harus memiliki karakteristik khusus, seperti rongga yang dicetak harus stabil untuk mempertahankan konformasinya tanpa adanya *template*, tetapi juga fleksibel untuk memfasilitasi keseimbangan yang cepat antara pelepasan dan pengambilan kembali *template* pada rongga. Oleh karena itu, pencetakan non-kovalen memberikan kinetika kesetimbangan lebih cepat daripada pendekatan pencetakan kovalen. Selain itu, MIPs perlu memiliki kestabilan dalam menahan serangan enzimatik dan kimia serta tekanan mekanis yang terdapat dalam cairan biologis. Untuk menghasilkan MIPs dengan sifat seperti yang telah disebutkan tersebut, selain pemilihan reagen yang digunakan, sintesis dengan metode polimerisasi presipitasi dapat dilakukan karena polimer biasanya benar-benar tidak dapat bercampur dengan pelarut yang digunakan untuk preparasi MIPs yang memungkinkan pemisahan polimer dengan mudah dari pelarut.

Dewasa ini, banyak peneliti telah mempublikasikan hasil penelitiannya tentang penggunaan MIPs dalam aplikasi *drug delivery* dikarenakan sifat fisikokimia polimer tersebut untuk melindungi obat dari degradasi oleh enzim selama berada dalam tubuh. Beberapa obat telah digunakan sebagai *template* untuk berinteraksi dengan MIPs yang memiliki kinerja lebih baik dibandingkan dengan sistem penghantaran obat yang lebih tradisional dalam hal pelepasan zat obat tertentu di dalam tubuh.

Sistem MIPs dengan kinerja pelepasan agen terapeutik yang baik juga dapat terjadi sebagai akibat dari rangsangan tertentu seperti adanya molekul lain. Sebuah penelitian menunjukkan bahwa MIPs berbasis 2-hidroksi-etil-metakrilat dengan *template* berupa hidrokortison dapat menangkap sejumlah testosterone. Setelah penghilangan analit target, MIP dimuat dengan testosteron, yang merupakan molekul yang serupa secara struktural. Terlihat bahwa laju pelepasan testosteron meningkat ketika hidrokortison terdapat pada larutan sebagai akibat pelepasan *template* yang responsif. Ini membuka kemungkinan untuk mengembangkan sistem pelepasan obat yang mampu memodulasi pelepasan sehubungan dengan keberadaan molekul tertentu (Sreenivasan, 1999).

Penelitian yang lain menunjukkan bahwa hidrogel yang dicetak secara molekuler untuk pengenalan kolesterol telah disintesis dengan desain molekuler dari struktur berbasis metakrilat yang mengandung poli(etilena glikol) dalam jaringan ikatan silang. Berdasarkan penelitian tersebut, hidrogel yang dicetak itu menunjukkan kemampuan yang sangat baik untuk mengenali dan melepaskan analit yang diinginkan.

Selain itu, MIPs dapat digunakan juga untuk menangkap beberapa zat di saluran pencernaan, menghalangi penyerapannya di dalam tubuh, sebagai pelengkap terapi farmakologis. Oleh karena itu, dikembangkan pula MIPs yang berfungsi sebagai perangkap zat kimia untuk menghilangkan zat yang tidak diinginkan dari tubuh, seperti glukosa, kolesterol, asam empedu, dan melittin (Sellergen dkk., 1998; Hoshino dkk., 2010).

6. PENELITIAN 5 TAHUN TERAKHIR BERKAITAN DENGAN MIPs

Berdasarkan sifat dan kemampuan MIPs dalam berbagai aplikasi, beberapa penelitian di kelompok riset penulis yang berkaitan dengan sintesis, metode evaluasi, dan penerapan MIPs sebagai adsorben untuk ekstraksi dan pemisahan berbagai senyawa kimia dan ion logam telah dipublikasikan dalam beberapa jurnal internasional. Sebagai contoh, sebuah polimer tercetak molekuler baru (MeIP) untuk ekstraksi dan pemisahan meropenem sebagai senyawa obat telah dihasilkan. Dalam penelitian ini, MeIP disiapkan untuk mengekstraksi dan memisahkan meropenem dalam plasma darah manusia. Prosedur MISPE diterapkan dengan menggabungkannya dengan deteksi HPLC. Studi ini telah menunjukkan kinerja MeIP yang lebih baik, selektivitas molekul kompetitif yang tinggi, dan reusabilitas yang tinggi dibandingkan dengan NIP. Partikel polimer ini dapat menjadi bahan yang menjanjikan untuk

bahan pengemas SPE dan kolom (Simarupea dkk., 2021).

Dalam hal ekstraksi dan pemisahan bahan alam, polimer tercetak mangostin telah berhasil disintesis melalui polimerisasi radikal dengan pendekatan non-kovalen. Pemisahan maksimum mangostin pada MIPs diperoleh pada pH 2 dan waktu interaksi 180 menit. Polimer tercetak mangostin yang dibuat memiliki potensi penggunaan sebagai sorben dalam ekstraksi fase padat (SPE) untuk menghilangkan gangguan matriks kompleks dan proses prakonsentrasi (Zakia dkk., 2020). Selain itu, juga telah berhasil mensintesis MIPs untuk ekstraksi dan pemisahan cathecin dari daun teh (Triadhi dkk., 2018).

Untuk aplikasi pemisahan dan ekstraksi senyawa organik, polimer tercetak molekul magnetik baru (MMIP) selektif untuk di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) berhasil disintesis menggunakan asam metakrilat sebagai monomer fungsional, Fe_3O_4 dimodifikasi oleh asam oleat sebagai "inti" magnetik, dan etilen glikol dimetakrilat sebagai agen pengikat silang. MMIP yang disintesis (Fe_3O_4@MIPs) mempunyai sifat superparamagnetic dan menunjukkan kapasitas adsorpsi yang baik terhadap DEHP (Zulfikar dkk., 2022). Sebuah membran nanofiber yang difungsikan dengan *molecularly imprinted polymers* (NFMIPs) juga berhasil disiapkan dengan teknik electrospinning untuk memisahkan asam humat (HA) dari air gambut. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa MIP berhasil terlapisi pada permukaan nanofiber PVDF dan tidak menyebabkan perubahan strukturnya. Hasil penelitian ini juga dengan jelas menunjukkan bahwa NFMIP berhasil dimanfaatkan untuk

memisahkan dan menghilangkan HA dari air gambut (Zulfikar dkk., 2017).

Pendekatan baru berdasarkan kombinasi presipitasi etanol dan MIP stereospesifik menggunakan HSA *imprinted microsphere* (HSAIM) juga telah dilakukan untuk memisahkan HSA dari plasma darah. Karena HSAIM mudah disiapkan, metoda ini mungkin cocok untuk memurnikan HSA dari plasma darah dalam skala kecil untuk diterapkan di daerah terpencil. Hal ini bermanfaat untuk menyelidiki lebih lanjut peningkatan kapasitas pengikatan HSAIM dan menemukan bahan enkapsulasi tahan tekanan (Wulan dkk., 2022).

Dalam hal pemisahan zat warna dari larutannya, polimer yang dicetak secara molekuler (MIPs) juga telah dibuat menggunakan metode sintesis organik dengan bantuan gelombang mikro untuk memisahkan metilen biru (MB), suatu pewarna kationik dari larutannya. Pembuatan dye-MIP dilakukan dengan menggunakan asam metakrilat (MAA) sebagai monomer, divinil benzena (DVB) sebagai pengikat silang dan asetonitril sebagai porogen (Zulfikar dkk., 2018).

Untuk aplikasi sensor, metode yang telah dikembangkan adalah menggunakan elektroda pasta karbon sebagai elektroda kerja dan dimodifikasi dengan *molecularly imprinted polymers* (MIPs) untuk analisis fenol. Dalam hal ini, elektroda pasta karbon dimodifikasi secara elektrokimia menggunakan teknik voltametri siklik 15 siklus pada kisaran potensial -0,2 V – 1,0 V dan laju pemindaian 100 mV/s pada pH 9 dan 0,1 M

KCl sebagai elektrolit pendukung. Berdasarkan nilai persen recovery dan uji-t dapat disimpulkan bahwa pengukuran dengan metode potensiometri menggunakan elektroda kerja pasta karbon termodifikasi MIPs tidak memiliki perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan metode spektrofotometri UV-Vis (Setiyanto dkk., 2020).

Untuk aplikasi pemisahan ion logam berat, polimer tercetak ion merkuri dengan inti silika telah disintesis untuk digunakan sebagai sorben agar dapat memisahkan ion merkuri dari larutan berair. Untuk mensintesisnya, dilakukan polimerisasi radikal menggunakan kompleks ion Hg(II) dengan ligan 3-mercaptopropyltrimethoxysilane (MPTS) sebagai template, VTMS sebagai monomer, dan EGDMA sebagai *crosslinker*. Cetakan pada Hg-IIPs meningkatkan kapasitas adsorpsi optimal sorben untuk memisahkan ion merkuri apabila dibandingkan dengan NIP (tanpa cetakan ionik). Studi ini menunjukkan bahwa Hg-IIP dapat menjadi sangat penting untuk analisis merkuri dalam aplikasi industri, termasuk pemisahan, remediasi lingkungan, prakonsentrasi, atau pengembangan instrument (Basir dkk., 2020).

7. TANTANGAN/PROSPEK

Kemajuan penting dalam sintesis dan penerapan MIPs telah dilaporkan secara konsisten dalam publikasi pada beberapa tahun terakhir. Polimer ini berpotensi sebagai material yang menjanjikan untuk pengenalan molekuler di berbagai bidang ilmiah di masa yang akan

dating dikarenakan biayanya yang rendah, stabilitasnya yang tinggi, dan kinerja MIP yang terus meningkat. Akan tetapi, dalam perkembangannya, teknologi pencetakan molekul menghadapi sejumlah tantangan dan peluang.

7.1 Tantangan dalam sintesis MIPs

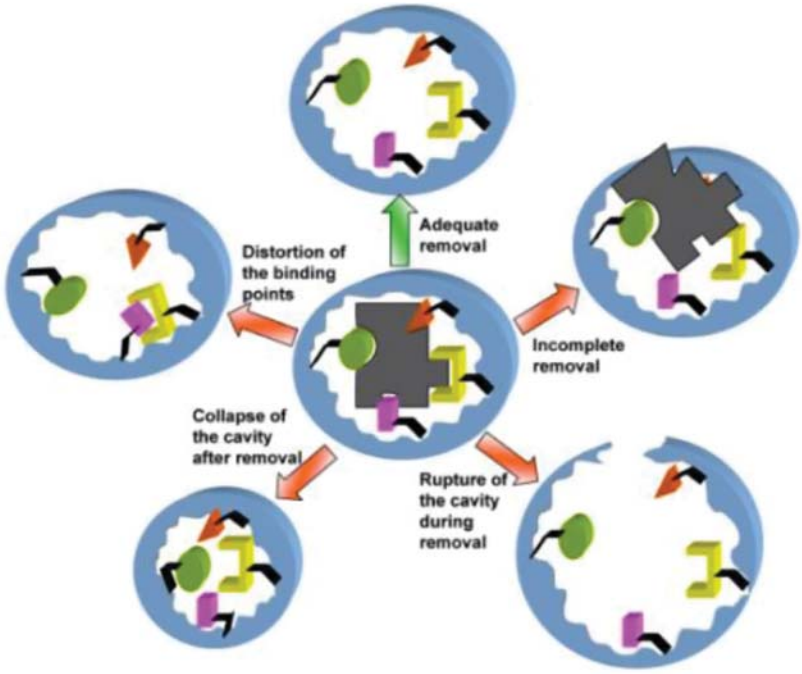
Sintesis MIPs merupakan hal yang menantang dikarenakan beberapa parameter yang mempengaruhi keberhasilan pembuatannya, seperti jenis dan tingkat monomer fungsional, zat pengikat silang, inisiator, pelarut, pemilihan metode, dan durasi polimerisasi. Rasio monomer: templat dan pelarut pencuci templat juga sangat berperan terhadap kapasitas adsorpsi, karena sisa template pada rongga MIPs akan menghambat kapasitas pengikatan MIPs. Selain itu, pilihan pelarut yang tidak tepat dapat menyebabkan pembengkakan MIPs, dan menghancurkan situs pengikatan.

Kekuatan interaksi antara monomer dan template, ikatan hidrogen, ikatan non-spesifik, dan harga (ekonomi) juga memainkan peran yang sangat penting dalam pemilihan monomer. Selain itu, monomer juga diharapkan stabil terhadap panas dan sinar UV, karena sebagian besar polimerisasi diinisasi oleh panas atau UV. Dalam hal pemilihan konsentrasi juga akan mempengaruhi selektivtas dan heterogeneitas dari MIPs yang dihasilkan. Oleh karena itu, simulasi komputasi dapat digunakan untuk memprediksi perilaku molekul dan meramalkan sifat-sifat MIPs. Energi interaksi MIPs dengan berbagai molekul dengan

berbagai jenis dan proporsi dapat dihitung dengan teori orbital ikatan alami. Metode konvensional yang biasa dilakukan untuk pemilihan monomer yang memadai adalah dengan coba-coba. Pemilihan monomer dengan metode ini melibatkan beban kerja yang sangat besar, dan strategi ini dapat berperan dalam menentukan kondisi optimal sintesis MIP.

Sejumlah tantangan lain seperti kapasitas pengikatan yang rendah, ketidakcocokan dengan media berair, terjadinya kebocoran *template*, pencetakan makromolekul yang sulit, pelepasan *template*, pelepasan *template* yang tidak lengkap, dan kerusakan rongga setelah pelepasan *template* (Gambar 21) perlu ditangani dengan serius. Dengan demikian, perlu diperhatikan prosedur pencetakan MIPs dengan mempertimbang-kan efisiensi untuk beberapa molekul/ion *template* agar mendapatkan hasil yang baik. Hal ini mendorong untuk mengetahui mekanisme pencetakan dan kemudian memberikan kinerja terbaik untuk beberapa analit. Penggabungan MIT dan berbagai teknologi dapat dikembangkan untuk menciptakan MIPs yang beragam untuk aplikasi lebih lanjut.

Pengenalan strategi pencetakan khusus seperti multi template, monomer multi-fungsi, template dummy, template segmen dan pencetakan material komposit dapat secara efektif mengatasi tantangan MIT dan dengan lancar mewujudkan berbagai aplikasi termasuk deteksi multi-analit, pemantauan sumber berbahaya, makromolekul pencetakan dan sebagainya. Pencetakan multi *template* menampilkan keunggulan luar biasa dan sangat diinginkan; namun, laporan terkait hal tersebut masih sangat terbatas.



Gambar 21. Sejumlah tantangan dalam penghilangan senyawa template pada MIPs

7.2 Tantangan dalam aplikasi MIPs

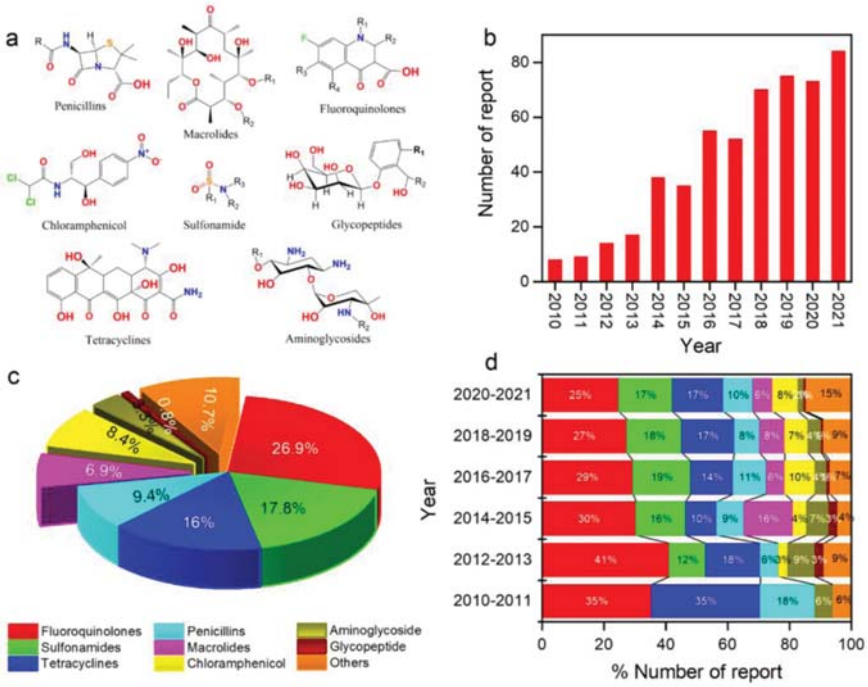
Dalam penerapan/aplikasi MIPs juga memiliki berbagai tantangan. Sebagai contoh, dalam bidang medis, sistem *drug delivery* menggunakan polimer bercetakan senyawa obat belum mencapai aplikasi klinis karena kemampuan teknologi pencetakan molekuler untuk penghantaran obat tersebut memerlukan perhatian penting, terutama dalam hal keamanan dan masalah toksikologi agar material polimer akan bersentuhan dengan jaringan biologis tanpa menyebabkan efek toksik. Selain itu, MIPs biasanya disintesis dalam pelarut organik untuk meningkatkan ikatan hidrogen dan interaksi elektrostatik. Namun, keberadaan pelarut organik, yang biasa digunakan dalam sintesis MIP juga dapat menyebabkan

kerusakan sel. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengembangan penelitian yang dapat menangani masalah tersebut sehingga MIPs dapat memiliki tingkat keamanan yang tinggi dan kinerja yang optimal untuk digunskan sebagai material *drug delivery*.

Dewasa ini, teknik penyiapan MIPs dengan *molecular imprinting water compatible* yang dinilai lebih aman masih dalam pengembangan dan memiliki banyak masalah, terutama diakibatkan oleh lemahnya ikatan hidrogen dan interaksi elektrostatik dalam air yang menurunkan selektivitas MIP untuk molekul target. Hal ini dapat diatasi dengan adanya koordinasi logam dan interaksi hidrofobik yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan interaksi template dengan monomer fungsional yang saat ini masih terus dipelajari (Piletska dkk., 2008; Benito-Peña dkk., 2009).

Dalam aplikasi di bidang sensor, penelitian dan laporan ilmiah dalam pengembangan sensor berbasis MIPs sebagai alat pemantauan lingkungan, pangan, obat-obatan, atau untuk polutan antibiotik semakin meningkat. Dalam dekade terakhir, laporan sensor berbasis MIPs untuk penentuan antibiotik telah mengalami tren yang meningkat (Gambar 22). Diketahui terdapat lebih dari 500 artikel MIP peer-review tentang deteksi antibiotik dalam dekade terakhir dan ditemukan bahwa fluoroquinolones merupakan bagian terbesar (sekitar 27%) dari semua kelas antibiotik (Gambar 22c), melebihi sulfonamid, tetrasiklin dan penisilin. Namun, pada laporan dua tahunan (Gambar 22d) menunjukkan penurunan pangsa fluoroquinolones, karena catatan sensor berbasis MIPs untuk kelas

antibiotik yang berbeda menjadi lebih menonjol.



Gambar 22. (a) Struktur antibiotik yang termasuk dalam kelas yang berbeda, (b) pembagian artikel peer-review untuk kelas antibiotik yang berbeda antara tahun 2010 dan 2019, (c) tahunan dan (d) laporan dua tahunan penelitian pencetakan antibiotik antara tahun 2010-2021.

Terlepas dari meningkatnya penelitian di bidang ini, implementasi komersial dari sensor berbasis MIP antibiotik belum tercapai. Ada beberapa tantangan yang membatasi penerapannya yang sebagian besar terkait dengan kebocoran template, penghapusan template yang tidak lengkap, komplikasi dalam pembuatan MIP yang kuat dan homogen pada elektroda, serta tantangan produksi massal dan analisis sampel nyata tanpa perlakuan awal sampel yang rumit.

Untuk memastikan kesederhanaan persiapan, akurasi kinerja, dan kemudahan penggunaan, beberapa penelitian telah difokuskan pada platform penginderaan, termasuk optik, piezoelektrik dan transduser elektrokimia. Di antaranya, sensor elektrokimia terungkap sebagai platform dominan di mana MIP antibiotik sering diintegrasikan, menunjukkan biaya produksi yang rendah, kemudahan pengoperasian, dan portabilitas. Sensor yang diperiksa tersebut sebagian besar menunjukkan kapasitas sensitif dan selektif untuk mendeteksi polutan antibiotik dalam sampel pada tingkat konsentrasi yang relevan dengan dibantu oleh pendekatan komputasi dalam pemilihan monomer fungsional yang efisien dan berbagai metode amplifikasi sinyal yang meningkatkan sensitivitas.

Selain dalam hal senseor untuk polutan antbiotik, teknologi MIP juga telah dipelajari secara ekstensif untuk aplikasi potensial dalam pseudo-immunoassays (Ge dan Turner, 2009). Secara khusus, *Molecularly Imprinted Sorbent Assay* (MIA) pertama telah dilaporkan oleh Mosbach untuk mendeteksi teofilin dalam serum dibandingkan dengan *Enzyme-Multiplied Immunoassay Technique* (EMIT) komersial (Vlatakis dkk., 1993). Meskipun metode MIA ini ditemukan lebih rumit, namun diketahui lebih murah dan lebih cepat daripada antibodi alami. Selain itu, MIP telah menunjukkan stabilitas yang luar biasa di bawah penyimpanan kering pada suhu sekitar, bertahan selama beberapa tahun tanpa kehilangan kemampuan pengenalan. Seperti yang baru-baru ini dikembangkan, butiran mikrosfer bercetakan sintesis (R,S)-propranolol dengan

polimerisasi presipitasi yang dimodifikasi untuk aplikasi MIA berlabel radio kompetitif untuk analisis kiral propranolol, menggunakan (S)-[4-^{3}H]Propranolol sebagai penyelidik radioaktif (Ye dkk., 2000). Dalam studi lain dilaporkan, butiran tercetak 17β-estradiol yang disintesis dengan polimerisasi presipitasi digunakan dalam MIA berlabel radio kompetitif untuk mendapatkan stereoselektivitas untuk 17β-estradiol di atas diasteroisomernya 17α-estradiol (Wei dkk., 2006).

Namun, penerapan praktis dari teknologi ini sangat terbatas karena komplikasi yang melekat dalam penanganan dan pembuangan bahan radioaktif. Untuk alasan ini, analog fluoresen analit digunakan sebagai probe alternatif di MIA. MIA berlabel fluoresen konvensional adalah contoh uji non-homolog di mana MIP dibuat menggunakan analit itu sendiri sebagai cetakan dalam proses pencetakan dan probe fluoresen sebagai pengganti probe radioaktif. Akan tetapi, masalah yang menghambat pengembangan teknik ini adalah struktur yang berbeda dari probe fluoresen, yang memiliki gugus fluoresen tambahan dengan analit, yang menyebabkan penurunan sensitivitas dan selektivitas. Namun demikian, dalam beberapa tahun terakhir, banyak peneliti telah memfokuskan minat mereka pada fluoresensi berlabel MIA terutama untuk fitur praktis yang menarik dalam aplikasi masa depan.

7.3 Tantangan dalam penanganan limbah

Tantangan besar lainnya dari MIPs adalah pembuangannya setelah analisis. Bahan kimia yang tidak digunakan setelah polimerisasi juga

dapat menjadi perhatian. MIPs biasanya mengandung asam metakrilat, atau asam akrilat yang berpotensi karsinogenik bagi manusia dan berbahaya bagi organisme akuatik. Oleh karena itu, komponen dari pembuatan MIPs dapat diganti menjadi material yang lebih ramah lingkungan. Seperti turunan alkoxysilane seperti 3-aminopropyl triethoxysilane yang sedang dikembangkan sebagai monomer fungsional karena volatilitas dan toksisitasnya yang rendah (Fu dkk., 2019). Selain itu, biopolimer alami seperti kitosan juga dapat digunakan sebagai monomer fungsional karena harganya yang murah, toksisitasnya rendah, dan multifungsi.

Tingginya konsumsi pelarut organik sebagai porogen juga memprihatinkan dan dapat diganti dengan *ionic liquids* (cairan ionik), deep eutectic solvents (DESs) atau pelarut eutektik dalam, dan CO_2 superkritis (Arabi dkk., 2021). Oleh karena itu, ruang lingkup penggunaan MIP di masa depan harus menggunakan metode pencetakan, polimerisasi, *template*, monomer, dan pelarut yang lebih berkelanjutan dan "hijau" untuk membuatnya lebih ramah lingkungan dan aman bagi ekosistem.

8. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama saya memanjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT, bahwasannya atas segala karuniaNya yang telah dilimpahkan hingga saat ini. Pada hari yang berbahagia ini, perkenankanlah saya menyampaikan

rasa terima kasih kepada yang terhormat Rektor dan jajaran Pimpinan ITB, Pimpinan dan Anggota Senat Akademik ITB, Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB, Pimpinan dan Anggota Senat FMIPA ITB, Dekan dan jajaran Pimpinan FMIPA ITB, serta staf kepegawaian yang yang senantiasa mendukung dan melancarkan proses pengurusan kenaikan jabatan.

Terima kasih yang tulus juga penulis sampaikan kepada kolega dosen dan tendik di lingkungan FMIPA serta kolega dosen di Program Studi Kimia ITB, khususnya kepada para senior: Prof. Cynthia Linaya Radiman, Prof. Euis Holisotan Hakim, Prof. Djulia Onggo, Prof. Muhammad Bachri Amran, Prof. Akhmaloka, Prof. I Made Arcana, Prof. Zeily Nurachman, Prof. Yana Maolana Syah, Prof. Dessy Natalia dan Prof. Ismunandar atas dorongan dan dukungannya. Terima kasih penulis ucapkan pula kepada kolega di KK Kimia Analitik, khususnya Prof. Dr. Muhammad Bachri Amran, DEA sebagai Ketua KK Kimia Analitik yang senantiasa menyemangati, mendorong, merekomendasikan dan mengawal proses kenaikan jabatan ke guru besar. Secara khusus penulis ucapkan terima kasih kepada Dr. Bunbun Bundjali dan Prof. Dr. Buchari yang telah "mencemplungkan" penulis menjadi dosen dan banyak membantu dan membina penulis pada saat awal berkarir menjadi dosen.

Ungkapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Buchari (ITB), Prof. Dr. I Made Arcana (ITB), Prof. Djulia Onggo, Ph.D (ITB), Prof. Ir. Samsul Bachri, Ph.D (Teknik Kimia UR), Prof. Ir. Abdul Wahab Mohamad, P. Eng., C. Eng (Teknik Kimia UKM), Prof. Hadi Nur,

Ph.D (UTM/UM) dan Prof. Eur. Ing. Nidal Hilal, P. Eng., C. Eng (Nottingham University, UK) yang telah bersedia menjadi rekomendator penulis ketika menjalani proses pengusulan kenaikan jabatan guru besar.

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada anggota Tim yang pernah dan saat ini masih bergabung dalam grup penelitian penulis: Dr. Nurrahmi Handayani, Siti Oryza Sativa, M.Si.P., Dr. Eng. Muhammad Nasir (BRIN), Dr. Muhammad Yudhistira Azis, Dr. Henry Setiyanto dan Dr. Deana Wahyuningrum yang banyak membantu penulis dalam penelitian dan publikasi.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada para Guru di SMAN 3 Pekanbaru yang telah memperkenalkan bidang Kimia kepada penulis, rekan-rekan Keluarga Mahasiswa Pekanbaru (GAHARU) Bandung, rekan-rekan KI'91 dan "Gank Cisitu" serta semua mahasiswa bimbingan S1, S2 dan S3 yang selalu mendorong dan menyemangati penulis sehingga meraih jabatan guru besar.

Kepada kedua orang tua yang telah berpulang, Ayahanda H. Muhammad Zein dan Ibunda Hj. Tuginam, terima kasih atas semua pengorbanan, dorongan dan do'a yang terus menerus sehingga penulis bisa berada dalam keadaan saat ini. Semoga Allah SWT senantiasa mencurahkan rahmat-Nya dan diberikan tempat yang layak di sisi-Nya. Kepada adinda Rahmat Hidayat, S. Tr., keluarga besar Simpang Kubu Air Tiris, keluarga besar Siak Sri Indrapura, keluarga besar Pekanbaru serta Bapak dan Ibu Mertua H. Nandang Fatah dan Hj. Tuti Rosmiati beserta

keluarga besar, terima kasih atas dukungan dan do'a serta kebersamaannya selama ini.

Terakhir, teruntuk istri dan anak-anak tercinta: Ike Sumiati Fatah, ST., M.Sc, Muhammad Rifky Farrel dan Muhammad Rafly Alfaridzy, terima kasih tak terhingga atas kesetiaannya mendampingi, mendo'akan, pengorbanan serta menjadi sumber semangat penulis dalam berkarya dan mejalani hidup.

PENUTUP

Perancangan material sintetik melalui pendekatan *Molecular Imprinting Technology* (MIT) atau teknologi pencetakan molekul dapat menghasilkan material fungsional yang memiliki selektivitas dan spesifitas yang tinggi terhadap reseptor/molekul target. Melalui sifatnya yang unggul dalam hal ketahanan mekanik, ketahanan terhadap bahan kimia, dan selektivitasnya, MIT populer dikembangkan untuk berbagai aplikasi termasuk pemisahan dan pemurnian, sensor kimia dan biosensor, katalisis dan aplikasi medis *(drug delivery)*. Akan tetapi, beberapa studi terhadap material tersebut dalam proses sintesis, aplikasi, dan juga aspek lingkungan menunjukkan ada berbagai tantangan di balik prospek penggunaannya di masa depan.

Merujuk pada beberapa fakta yang telah disampaikan sebelumnya, maka sangat penting pengembangan MIT ini diimbangi dengan pencarian solusi terhadap berbagai tantangan dan masalah yang dihadapi. Simulasi

komputasi dapat menjadi salah satu strategi yang digunakan untuk memprediksi perilaku molekul dan meramalkan sifat-sifat MIPs agar MIPs yang dihasilkan memiliki sifat seperti yang diharapkan dan sesuai dengan aplikasinya. Selain itu, pemilihan komponen dalam sintesis MIPs dengan material dan porogen yang lebih ramah lingkungan juga dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam pengembangan MIT di masa yang akan datang guna memenuhi kebutuhan hidup manusia.

Pengembangan MIT memberikan peluang besar bagi penelitian di Indonesia khususnya dalam hal sintesis material fungsional dan aplikasinya untuk menjawab tantangan yang selama ini ada di masyarakat kita yang belum sepenuhnya teratasi, seperti teknologi penyediaan air bersih agar lebih aman dikonsumsi, deteksi sampel, dan berbagai proses yang ada di industri. Harapan penulis, semoga tulisan ini dapat memberikan inspirasi, wawasan, dan konstribusi yang positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya pengembangan kimia analitik di masa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

Arabi, M., Ostovan, A., Li, J., Wang, X., Zhang, Z., Choo, J., & Chen, L. (2021). Molecular imprinting: green perspectives and strategies. *Advanced Materials*, 33(30), 2100543.

Arshady, R., & Mosbach, K. (1981). Synthesis of substrate-selective polymers by host-guest polymerization. *Die Makromolekulare Chemie:*

Macromolecular Chemistry and Physics, 182(2), 687-692.

Bai, H., Wang, C., Chen, J., Peng, J., & Cao, Q. (2015). A novel sensitive electrochemical sensor based on in-situ polymerized molecularly imprinted membranes at graphene modified electrode for artemisinin determination. *Biosensors and Bioelectronics*, 64, 352-358.

Bai, M., Qiang, L., Meng, M., Li, B., Wang, S., Wu, Y., ... & Pan, J. (2021). Upper surface imprinted membrane prepared by magnetic guidance phase inversion method for highly efficient and selective separation of Artemisinin. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126899.

Barros, L. A., Custodio, R., & Rath, S. (2016). Design of a new molecularly imprinted polymer selective for hydrochlorothiazide based on theoretical predictions using Gibbs free energy. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 27, 2300-2311.

Basir, D. N., Zulfikar, M. A., & Amran, M. B. (2020). The synthesis of imprinted polymer sorbent for the removal of mercury ions. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 42(5).

Beach, J. V., & Shea, K. J. (1994). Designed catalysts. A synthetic network polymer that catalyzes the dehydrofluorination of 4-fluoro-4-(p-nitrophenyl) butan-2-one. *Journal of the American Chemical Society*, 116(1), 379-380.

Benito-Peña, E., Martins, S., Orellana, G., & Moreno-Bondi, M. C. (2009). Water-compatible molecularly imprinted polymer for the selective recognition of fluoroquinolone antibiotics in biological samples.

Analytical and Bioanalytical Chemistry, 393(1), 235-245.

Bitas, D., & Samanidou, V. (2018). Molecularly imprinted polymers as extracting media for the chromatographic determination of antibiotics in milk. *Molecules*, 23(2), 316.

Bossi, A., Bonini, F., Turner, A. P. F., & Piletsky, S. A. (2007). Molecularly imprinted polymers for the recognition of proteins: the state of the art. *Biosensors and Bioelectronics*, 22(6), 1131-1137.

Cui, Y., Jiang, L., Li, H., Meng, D., Chen, Y., Ding, L., & Xu, Y. (2021). Molecularly imprinted electrospun nanofibre membrane assisted stir bar sorptive extraction for trace analysis of sulfonamides from animal feeds. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 96, 382-389.

Ertürk, G., & Mattiasson, B. (2017). Molecular imprinting techniques used for the preparation of biosensors. *Sensors*, 17(2), 288.

Fu, X., Zhu, D., Huang, L., Yan, X., Liu, S., & Wang, C. (2019). Superparamagnetic core-shell dummy template molecularly imprinted polymer for magnetic solid-phase extraction of food additives prior to the determination by HPLC. *Microchemical Journal*, 150, Article 104169

Ge, Y., & Turner, A. P. (2009). Molecularly imprinted sorbent assays: recent developments and applications. *Chemistry-A European Journal*, 15(33), 8100-8107.

Hijazi, H. Y., & Bottaro, C. S. (2020). Molecularly imprinted polymer thin-film as a micro-extraction adsorbent for selective determination of

trace concentrations of polycyclic aromatic sulfur heterocycles in seawater. *Journal of Chromatography* A, 1617, 460824.

Hoshino, Y., Koide, H., Urakami, T., Kanazawa, H., Kodama, T., Oku, N., & Shea, K. J. (2010). Recognition, neutralization, and clearance of target peptides in the bloodstream of living mice by molecularly imprinted polymer nanoparticles: a plastic antibody. *Journal of the American Chemical Society*, 132(19), 6644-6645.

Jiang, S., Chen, Y., Duan, G., Mei, C., Greiner, A., & Agarwal, S. (2018). Electrospun nanofiber reinforced composites: A review. *Polymer Chemistry*, 9(20), 2685-2720.

Karnka, R., Chaiyasat, P., & Chaiyasat, A. (2017). Synthesis of Uniform and Stable Molecularly Imprinted Polymer Particles by Precipitation Polymerization. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(5), 2370.

Lasáková, M., & Jandera, P. (2009). Molecularly imprinted polymers and their application in solid phase extraction. *Journal of Separation Science*, 32(5-6), 799-812.

Li, S., Ge, Y., Tiwari, A., Wang, S., Turner, A. P., & Piletsky, S. A. (2011). 'On/off'-switchable catalysis by a smart enzyme-like imprinted polymer. *Journal of catalysis*, 278(2), 173-180.

Li, W., & Li, S. (2006). Molecular imprinting: A versatile tool for separation, sensors and catalysis. *Oligomers-Polymer Composites-Molecular Imprinting*, 191-210.

Longo, L., & Vasapollo, G. (2008). Phthalocyanine-based molecularly

imprinted polymers as nucleoside receptors. *Metal-Based Drugs*, 2008.

Lu, J., Qin, Y., Wu, Y., Meng, M., Dong, Z., Yu, C., ... & Nyarko, F. K. (2020). Bidirectional molecularly imprinted membranes for selective recognition and separation of pyrimethamine: A double-faced loading strategy. *Journal of Membrane Science*, 601, 117917.

Malitesta, C., Mazzotta, E., Picca, R. A., Poma, A., Chianella, I., & Piletsky, S. A. (2012). MIP sensors-the electrochemical approach. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402(5), 1827-1846.

Martín-Esteban, A. (2013). Molecularly-imprinted polymers as a versatile, highly selective tool in sample preparation. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 45, 169-181.

Moein, M. M., Javanbakht, M., Karimi, M., Akbari-Adergani, B., & Abdel-Rehim, M. (2015). Three-phase molecularly imprinted sol-gel based hollow fiber liquid-phase microextraction combined with liquid chromatography-tandem mass spectrometry for enrichment and selective determination of a tentative lung cancer biomarker. *Journal of Chromatography B*, 995, 38-45.

Moreno-Bondi, M. C., Navarro-Villoslada, F., Benito-Pena, E., & Urraca, J. L. (2008). Molecularly imprinted polymers as selective recognition elements in optical sensing. *Current Analytical Chemistry*, 4(4), 316-340.

Nicholls, I. A., & Rosengren, J. P. (2001). Molecular imprinting of surfaces. *Bioseparation*, 10(6), 301-305.

Pardeshi, S., & Singh, S. K. (2016). Precipitation polymerization: a versatile

tool for preparing molecularly imprinted polymer beads for chromatography applications. *RSC Advances*, 6(28), 23525-23536.

Patel, K. D., Kim, H. W., Knowles, J. C., & Poma, A. (2020). Molecularly imprinted polymers and electrospinning: Manufacturing convergence for next-level applications. *Advanced Functional Materials*, 30(32), 2001955.

Piletska, E. V., Guerreiro, A. R., Romero-Guerra, M., Chianella, I., Turner, A. P., & Piletsky, S. A. (2008). Design of molecular imprinted polymers compatible with aqueous environment. *Analytica Chimica Acta*, 607(1), 54-60.

Piletsky, S. A., Dubey, I. Y., Fedoryak, D. M., & Kukhar, V. P. (1990). Substrate-selective polymeric membranes. Selective transfer of nucleic acid components. *Biopolym. Kletka*, 6, 89-99.

Polyakov, M. V. (1931). Adsorption properties and structure of silica gel. *Zhur Fiz Khim*, 2, 799-805.

Puoci, F., Iemma, F., & Picci, N. (2008). Stimuli-responsive molecularly imprinted polymers for drug delivery: a review. *Current Drug Delivery*, 5(2), 85-96.

Sellergren, B., Wieschemeyer, J., Boos, K. S., & Seidel, D. (1998). Imprinted polymers for selective adsorption of cholesterol from gastrointestinal fluids. *Chemistry of Materials*, 10(12), 4037-4046.

Setiyanto, H., Rahmadhani, S., Sukandar, S., Saraswaty, V., Zulfikar, M. A., & Mufti, N. (2020). The performance of molecularly imprinted

polymers (MIPs)-modified carbon paste electrode and its application in detecting phenol. *Int. J. Electrochem. Sci*, 15, 5477-5486.

Sirumapea, L., Zulfikar, M. A., Amran, M. B., & Alni, A. (2021). Selective Solid-Phase Extraction of Meropenem from Human Blood Plasma Using a Molecularly Imprinted Polymer. *Indonesian Journal of Chemistry,* 21 (5), 1167 - 1179.

Song, X., Wang, J., & Zhu, J. (2009). Effect of porogenic solvent on selective performance of molecularly imprinted polymer for quercetin. *Materials Research*, 12, 299-304.

Sreenivasan, K. (1999). On the application of molecularly imprinted poly (HEMA) as a template responsive release system. *Journal of Applied Polymer Science,* 71(11), 1819-1821.

Suwanwong, Y., Kulkeratiyut, S., Prachayasittikul, V., & Boonpangrak, S. (2014). Effects of polymerization methods and functional monomers on curcumin imprinted polymer properties. *Separation Science and Technology*, 49(7), 1086-1095.

Tamayo, F. G., Turiel, E., & Martín-Esteban, A. (2007). Molecularly imprinted polymers for solid-phase extraction and solid-phase microextraction: Recent developments and future trends. *Journal of Chromatography A*, 1152(1-2), 32-40.

Triadhi, U., Zulfikar, M. A., Setiyanto, H., & Amran, M. B. (2018, May). Effects of (monomer-crosslinker-initiator) composition during non imprinted polymers synthesis for catechin retention. In *Journal of*

Physics: Conference Series (Vol. 1013, No. 1, p. 012192). IOP Publishing.

Vasapollo, G., Sole, R. D., Mergola, L., Lazzoi, M. R., Scardino, A., Scorrano, S., & Mele, G. (2011). Molecularly imprinted polymers: present and future prospective. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(9), 5908-5945.

Vaseashta, A. (2007). Controlled formation of multiple Taylor cones in electrospinning process. *Applied Physics Letters*, 90(9), 093115.

Vlatakis, G., Andersson, L. I., Müller, R., & Mosbach, K. (1993). Drug assay using antibody mimics made by molecular imprinting. *Nature*, 361(6413), 645-647.

Wang, R., Hu, Q. H., Wang, Q. Y., Xiang, Y. L., Huang, S. H., Liu, Y. Z., ... & Zhou, Q. H. (2022). Efficiently selective removal of Pb (II) by magnetic ion-imprinted membrane based on polyacrylonitrile electro-spun nanofibers. *Separation and Purification Technology*, 284, 120280.

Wei, S., Molinelli, A., & Mizaikoff, B. (2006). Molecularly imprinted micro and nanospheres for the selective recognition of 17β-estradiol. *Biosensors and Bioelectronics*, 21(10), 1943-1951.

Wu, J., Gao, J., Hou, Z., Xing, W., Dai, J., Yan, Y., & Wu, Y. (2020). Accelerating the Design of β-CD-PVDF-based Molecularly Imprinted Nanocomposite Membrane for Selective Separation: A Surface Functional Monomer-Directing Strategy. *Nano*, 15(11), 2050138.

Wu, Y., Xing, W., Yan, J., Cui, J., Ma, F., Gao, J., ... & Yan, M. (2020). Multilevel mineral-coated imprinted nanocomposite membranes for

template-dependent recognition and separation: A well-designed strategy with PDA/CaCO3-based loading structure. *Journal of Colloid and Interface Science*, 575, 356-366.

Wuff, G., & Sarhan, A. (1972). The use of polymers with enzyme-analogous structures for the resolution of racemate. *Angew. Chem. Int. Ed*, 11, 341-345.

Wulan, D. R., Rahmaniyah, W. R., Zulfikar, M. A., & Nurachman, Z. (2022). Enhancement of microsphere specificity to purify human serum albumin from blood plasma. *Journal of Chromatography A, inpress*.

Ye, L., Weiss, R., & Mosbach, K. (2000). Synthesis and characterization of molecularly imprinted microspheres. *Macromolecules*, 33(22), 8239-8245.

Yin, D., & Ulbricht, M. (2013). Antibody-imprinted membrane adsorber via two-step surface grafting. *Biomacromolecules*, 14(12), 4489-4496.

Zakia, N., Zulfikar, M. A., & Amran, M. B. (2020). Synthesis and characterization of α-mangostin imprinted polymers and its application for solid phase extraction. *Advances in Materials Research*, 9(4), 251-263.

Zhan, J., Fang, G., Yan, Z., Pan, M., Liu, C., & Wang, S. (2013). Preparation of a semicovalent, molecularly surface imprinted polymer for the rapid determination of trace acid orange II in food and environmental samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 405(19), 6353-6363.

Zhao, G., Liu, J., Liu, M., Han, X., Peng, Y., Tian, X., ... & Zhang, S. (2020).

Synthesis of molecularly imprinted polymer via emulsion polymerization for application in solanesol separation. *Applied Sciences*, 10(8), 2868.

Zulfikar, M. A., Afrianingsih, I., Nasir, M., & Handayani, N. (2017). Fabrication of a nanofiber membrane functionalized with molecularly imprinted polymers for humic acid removal from peat water. *Desalination and Water Treatment*, 97, 203-212.

Zulfikar, M. A., Amran, M. B., Alni, A., & Wahyuningrum, D. (2018). Adsorption of cationic dye from aqueous solution using molecularly imprinted polymers (MIPs). *Desalination and Water Treatment*, 103, 102-112.

Zulfikar, M. A., Utami, A. R., Handayani, N., Wahyuningrum, D., Setiyanto, H., & Azis, M. Y. (2022). Removal of phthalate ester compound from PVC plastic samples using magnetic molecularly imprinted polymer on the surface of superparamagnetic Fe_3O_4 (Fe3O4@ MIPs). *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100646.

CURRICULUM VITAE

Nama : **Prof. Ir. MUHAMMAD ALI ZULFIKAR, M.Si., Ph.D., IPP.**

Tempat/tgl lahir : Pekanbaru, 21 Desember 1971

Kel. Keahlian : Kimia Analitik

Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10, Bandung

Nama Istri : Ike Sumiati Fatah, ST., M.Sc.

Nama Anak : 1. Muhammad Rifky Farrel

2. Muhammad Rafly Alfaridzy

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Program Profesi Insinyur (Ir.), Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, 2021.
- Doctor of Philosophy (Ph.D.), Teknik Kimia, National University of Malaysia - Nottingham University, UK (Sandwich Program), 2002-2006
- Master of Science (M.Si), Kimia Analitik, Institut Teknologi Bandung (ITB), 1997-1999
- Sarjana Kimia (S.Si.), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1991-1996.

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Program Studi Kimia FMIPA ITB, 1997-Sekarang
- Ketua Laboratorium Kimia Analitik - Program Studi Kimia - ITB, 2006 -2012

- Anggota Tim Penilai Angka Kredit (TPAK) Dosen FMIPA, 2013 - 2020
- Koordinator Kimia Dasar TPB - ITB, 2012 - 2013
- Ketua Program Studi Magister Pengajaran Kimia ITB, 2018 - 2020
- Anggota Board of Reviewer ITB, 2020 - sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A 01 Februari 1997
- Penata Muda, III/A 01 Juni 1999
- Penata Muda TK 1, III/B 01 April 2002
- Penata, III/C 01 Oktober 2009
- Penata Tingkat I, III/D 01 Oktober 2014
- Pembina IV/A 01 April 2018
- Pembina Tingkat I, IV/B 01 Oktober 2022

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya 01 Juni 1999
- Asisten Ahli 01 April 2002
- Lektor Kepala 01 Juni 2009 (Loncat Jabatan)
- Profesor/Guru Besar 01 Desember 2021

V. KEGIATAN PENELITIAN

1. Nanofiber ionic imprinted membrane (NFIIM): suatu material fungsional untuk proses pemisahan ion logam tanah jarang Praseodymium (Pr) dari campurannya, Riset Unggulan ITB, 2022.

2. Ekstraksi senyawa di-(2- etilheksil) ftalat (DEHP) dari air limbah menggunakan material fungsional membran komposit magnetic imprinted polymer nanofiber (MKMIPNF), Kemendikbudristek, 2021-2022.
3. Sintesis dan karakterisasi material biohibrid nanofiber fotokatalis TiO_2/Ag/alga serta aplikasinya untuk pengolahan air gambut, Kemenristekdikti, 2020-2021.
4. Material clay terfungsionalisasi untuk penghilangan merkuri pada Mercury Removal Unit (MRU), PT. Pertamina, 2020-2021.
5. Membran magnetik imprinted polymers nanofiber (MMIPNF): suatu material fungsional untuk pengolahan air gambut, Kemenristekdikti, 2019-2021.
6. Ekstraksi logam tanah jarang Neodimium menggunakan material fungsional membran ion i imprinted nanofiber, Kemenristekdikti, 2019-2020.
7. Fungsionalisasi membran komposit nano fiber: sintesis, karakterisasi dan aplikasinya untuk pengolahan limbah zat warna industri tekstil, Riset Multidisiplin ITB, 2019.
8. Fungsionalisasi membran nano fiber: sintesis, karakterisasi dan aplikasinya untuk pengolahan air gambut, Riset Multidisiplin ITB, 2018.
9. Molecularly imprinted polymers membrane (MIPsM): a functional materials for peat water treatment, Osaka Gas Foundation, Japan, 2017.
10. Nanofiber ionic imprinted polymers (NFIIPs): suatu material fungsional untuk pengolahan dan produksi logam tanah jarang

Yttrium (Y) dari limbah tailing, Insinas, 2017.

11. Material nanofiber fotokatalis: sintesis, karakterisasi serta aplikasinya untuk pengolahan air gambut, Kemenristekdikti, 2017-2019.
12. Nanofiber fotokatalis ZnO/TiO_2 terdoping Co: Sintesis, karakterisasi dan aplikasinya untuk pengolahan limbah industri tekstil, Kemenristekdikti, 2016-2018.
13. Dual nano fiber molecularly imprinted polymers (DNFMIPs): sintesis, karakterisasi dan aplikasinya untuk pengolahan air gambut, Kemenristekdikti, 2016-2018.
14. Fungsionalisasi membran nano fiber dengan molecularly imprinted polymers (MIPs) untuk pengolahan air gambut, Riset KK dan Inovasi ITB, 2015.
15. Nano fiber molecularly imprinted polymers (NFMIPs): suatu material fungsional untuk pengolahan air gambut, Kemenristekdikti, 2015-2017.
16. Sintesis material nano Fe_3O_4 berbahan baku pasir lokal dengan metoda carbon encapsulated dan aplikasinya untuk pengolahan air gambut, Kemenristekdikti, 2014-2016.
17. Molecular Imprinted Polymers (MIPs) sebagai material fungsional untuk pemisahan dan pemurnian enzim lipase dari crude enzyme, ITB, 2014-2015.
18. Peningkatan kualitas industri garam rakyat, Pengabdian Kepada Masyarakat ITB, 2013-2014.
19. Molecular Imprinted Polymers sebagai material fungsional untuk penghilangan asam humus dari air gambut, ITB, 2013.

20. Material fungsional kitosan terlapis Fe_3O_4 magnetik: sintesis, karakterisasi dan aplikasinya untuk pengolahan air gambut, ITB, 2013.

PUBLIKASI TERPILIH 5 TAHUN TERAKHIR

- Enriyani, R., Zulfikar, M.A. and Alni, A., 2022. Degradasi asam humat menggunakan fotokatalis TiO2 yang disintesis dalam cairan ion 1-Butil-3-Metil-Imidazolium tetrafluoroborat. *Jurnal Warta Akab*, 46(1).
- Wulan, D.R., Rahmaniyah, W.R., **Zulfikar, M.A**. and Nurachman, Z., 2022. Enhancement of microsphere specificity to purify human serum albumin from blood plasma. *Journal of ChromatographyA*. Inpress.
- **Zulfikar, M.A**., Utami, A.R., Handayani, N., Wahyuningrum, D., Setiyanto, H. and Azis, M.Y., 2022. Removal of phthalate ester compound from PVC plastic samples using magnetic molecularly imprinted polymer on the surface of superparamagnetic Fe_3O_4 (Fe_3O_4@ MIPs). *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100646.
- Setiyanto, H., Ferizal, F., Saraswaty, V., Rahayu, R.S. and **Zulfikar, M.A.**, 2021, February. Carbon paste electrode modified Poly-Glutamic Acid (PGA) with molecularly imprinted for detection of Rhodamine B. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 1088(1), 012113.
- Utami, A.R., **Zulfikar, M.A**. and Wahyuningrum, D., 2021, April. The synthesis of magnetic molecularly imprinted polymer against di-(2-ethylhexyl) phthalate. In *IOP Conference Series: Materials*

Science and Engineering, IOP Publishing, 1143(1), 012003.

- Sativa, S.O., **Zulfikar, M.A**. and Alni, A., 2021, April. Optimization of pH and radiation time for photocatalytic activity of methyl orange using TiO2. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2331(1), 040006.
- Sativa, S.O., **Zulfikar, M.A**., Suryandari, E.T. and Nasir, M., 2021. Effect of composite composition in nanofiber for degradation of humic acid solution. In *Advanced Materials Research.* Trans Tech Publications Ltd, 1162, 87.
- Sirumapea, L., **Zulfikar, M.A.**, Amran, M.B. and Alni, A., 2021. Selective solid-phase extraction of meropenem from human blood plasma using a molecularly imprinted polymer. *Indonesian Journal of Chemistry,* 21(5), 1167.
- Herlina, **Zulfikar, M.A**. and Buchari, 2021. Electron transfer in electro-oxidation of amoxicillin using Platinum electrode and Platinum modified Cobalt electrodes. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 874, 155.
- **Zulfikar, M.A.**, Maulina, D., Nasir, M., Handayani, N. and Handajani, M., 2020. Removal of methylene blue from aqueous solution using poly (acrylic acid)/SiO_2 and functionalized poly (acrylic acid)/SiO_2 composite nanofibers. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100381.
- Zakia, N., **Zulfikar, M.A**. and Amran, M.B. 2020. Synthesis and characterization of α-mangostin imprinted polymers and its application for solid phase extraction. *Advances in Materials Research*, 9(4), 251.

- **Zulfikar, M.A**., Chandra, A.D., Setiyanto, H., Handayani, N. and Wahyuningrum, D., 2020. TiO_2/ZnO nanocomposite photocatalyst: Synthesis, characterization and their application for degradation of humic acid from aqueous solution. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 42(2).
- Basir, D.N., **Zulfikar, M.A**. and Amran, M.B., 2020. The synthesis of imprinted polymer sorbent for the removal of mercury ions. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 42(5), 1135.
- Setiyanto, H., Rahmadani, S., Sukandar, S., Saraswaty, V., **Zulfikar, M.A.** and Mufti, N. 2020. The performance of molecularly imprinted polymers (MIPs) modified carbon paste electrode and its application in detecting phenol. *International Journal of Electrochemical Sciences,* 15, 5477.
- Alni, A., Puspita, K. and **Zulfikar, M.A.,** 2019. Biosorbent from Chinese cabbage (Brassica pekinensia L.) for phenol contaminated waste water treatment. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 811, 71.
- Rahmadhani, S., Setiyanto, H. and **Zulfikar, M.A.,** 2018. Fabrication of carbon paste electrode modified with phenol imprinted polyaniline as a sensor for phenol analysis by potentiometric. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 936, 71.
- **Zulfikar, M.A**., Bahri, A., Setiyanto, H. and Nasir, M., 2017, July. Adsorption of methyl orange from aqueous solution onto PMMA nanofiber: Kinetics study. *AIP Conference Proceedings.* AIP Publishing LLC, 1858(1), 030001.
- **Zulfikar, M.A.,** Afrianingsih, I. and Nasir, M., 2017. Kinetics

adsorption of humic acid from water onto PVDF nanofiber. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 8(3), 175.

- **Zulfikar, M.A.**, Afrita, S., Wahyuningrum, D. and Ledyastuti, M., 2016. Preparation of Fe_3O_4-chitosan hybrid nano-particles used for humic acid adsorption. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 6, 64.
- Handayani, N., Wahyuningrum, D., **Zulfikar, M.A.**, Nurbaiti, S. and Radiman, C.L., 2016. The synthesis of biodiesel catalyzed by Mucor miehei lipase immobilized onto aminated polyethersulfone membranes. *Bioresources and Bioprocessing*, 3(1), 1.
- **Zulfikar, M.A.,** 2016. Adsorption of humic acid from aqueous solution onto PVDF nanofiber: Effect of Temperature. Materials Science Forum. *Trans Tech Publications Ltd*, 863, 123.
- Zulfikar, M.A., Afrianingsih, I. and Nasir, M., 2017. Kinetics adsorption of humic acid from water onto PVDF nanofiber. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 8(3), 175.

PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 10 Tahun (2009)
- Dosen Berprestasi dalam Bidang Penelitian ITB (2017)
- Satyalancana Karya Satya 20 Tahun (2019)
- Pengabdian 25 Institut Teknologi Bandung (2022)

SERTIFIKASI

- Sertifikasi Asesor Laboratorium Penguji, 1997. Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP).
- Sertifikasi Dosen Nasional, 2011. Kementerian Pendidikan Nasional.
- Sertifikasi Ahli Madya Teknik Air Minum, 2019. Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP).
- Sertifikasi Ahli Muda K3 Umum, 2020. Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP).
- Sertifikasi Insinyur Profesional Pratama, 2020. Persatuan Insinyur Indonesia (PII).
- Surat Tanda Registrasi Insinyur (STRI), 2020. Persatuan Insinyur Indonesia (PII).
- Sertifikasi Penanggung Jawab Pengendalian Pencemaran Air, 2022. Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP).

RIWAYAT ORGANISASI PROFESI

- Himpunan Kimia Indonesia (HKI)
- The Royal Society of Chemistry (RSC), UK
- Institution of Chemical Engineers (IChemE), UK
- The American Institute of Chemical Engineers (AIChE), US
- The Institution of Environmetal Sciences (IES), UK
- The Institute of Engineering and Technology (IET), UK
- Persatuan Insinyur Indonesia (PII)

Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
Telp. (022) 2512532, E-mail: sekretariat-fgb@pusat.itb.ac.id

ISBN 978-602-6624-67-3
9 786026 624673

fgb.itb.ac.id
FgbItb
FGB_ITB
@fgbitb_1920
Forum Guru Besar ITB