Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X **(Printed)**
6 (1) 2026, Page 13759-13775

ADSORPTIVE REMOVAL OF PHARMACEUTICAL RESIDUES USING SYNTHETIC AND BIO-BASED POLYMERS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Collin Angelicha[1], Hagia Sofia[2], Gadis Qurratu Aini[3]
[1,2,3]Program Studi S1 Farmasi Universitas Islam Sultan Agung
Corresponding Author: Collin Angelicha, E-mail: collinangelicha2004@gmail.com

Published: Februari, 2026

ABSTRAK
Residu farmasi merupakan kontaminan emergen yang semakin terdeteksi pada air limbah dan perairan permukaan, menimbulkan risiko ekologis dan resistensi antimikroba meskipun keterbatasan pengolahan konvensional. Penelitian ini bertujuan memetakan tren riset penghilangan residu farmasi melalui adsorpsi menggunakan polimer sintetik dan bio-based via systematic literature review dikombinasikan analisis bibliometrik. Menggunakan pendekatan mixed-methods kualitatif, populasi mencakup publikasi 1977-2026 dari Scopus, Google Scholar, dan ScienceDirect lewat Publish or Perish, menghasilkan 100 rekam bibliometrik dan 20 artikel SLR terpilih per pedoman PRISMA. Instrumen meliputi VOSviewer untuk jaringan kata kunci, overlay, dan density visualization, dengan teknik metrik sitasi dan sintesis tematik. Hasil mengungkap tema sentral adsorption, wastewater treatment, sustainable materials; polimer sintetik unggul stabilitas dan selektivitas (komposit, MIP), sementara bio-based seperti chitosan ramah lingkungan. Overlay (2021-2025) tunjukkan pergeseran ke keberlanjutan dan fokus pharmaceuticals. Kesimpulannya, adsorben polimer majukan polishing air limbah, merekomendasikan chitosan-komposit untuk IPAL skala nyata dan pengembangan lokal bio-based di Indonesia.

Kata Kunci : Adsorption, Bio-based Polymers, Pharmaceutical Residues, Synthetic Polymers, Wastewater Treatment

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Residu farmasi saat ini diakui sebagai salah satu kontaminan emergen yang paling mengkhawatirkan karena terus terdeteksi di air limbah domestik, efluen rumah sakit, dan badan air permukaan pada konsentrasi jejak namun bersifat bioaktif dan persisten. Berbagai studi menunjukkan bahwa senyawa seperti antibiotik, analgesik, antidepresan, beta-blocker, dan hormon steroid dapat memicu gangguan fisiologis, perubahan perilaku, efek toksik kronis pada organisme akuatik, serta berkontribusi pada munculnya resistensi antimikroba sehingga menimbulkan risiko ekologis dan kesehatan publik yang serius. Fenomena ini diperparah oleh pola konsumsi obat yang tinggi, pembuangan obat yang tidak tepat, serta ekskresi manusia dan hewan, yang menyebabkan kontaminan farmasi masuk ke lingkungan perairan melalui jalur domestik, fasilitas kesehatan, industri farmasi, serta kegiatan pertanian dan peternakan. Di luar sistem perairan, residu farmasi juga dapat terakumulasi dalam tanah melalui infiltrasi air tercemar, aplikasi sludge hasil pengolahan air limbah, dan penggunaan pupuk organik, sehingga memperluas ruang lingkup risiko dan menegaskan bahwa residu farmasi merupakan isu lintas media yang memerlukan pendekatan pengendalian terpadu dari hulu ke hilir.

Di sisi lain, sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah konvensional pada umumnya dirancang untuk mengurangi pencemar makro seperti BOD, COD, TSS, dan nutrien, bukan untuk secara spesifik menyisihkan mikropolutan persisten seperti residu farmasi yang memiliki struktur kimia kompleks. Berbagai kajian menunjukkan bahwa banyak senyawa farmasi mampu lolos dari proses biologis konvensional dan tetap terdeteksi pada efluen, sehingga berkontribusi terhadap kontaminasi berkelanjutan di lingkungan perairan dan memperbesar risiko akumulasi kronis. Kondisi ini memicu pengembangan teknologi pengolahan lanjut, termasuk proses oksidasi lanjut, filtrasi membran, fotokatalisis, dan kombinasi proses fisik-kimia, meskipun pendekatan tersebut kerap menghadapi

kendala biaya energi dan operasi yang tinggi, pembentukan produk transformasi yang berpotensi toksik, serta kebutuhan perawatan sistem yang kompleks. Dalam konteks kebutuhan teknologi yang lebih praktis, efisien, dan ekonomis, metode adsorpsi muncul sebagai salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk penyisihan residu farmasi karena mampu bekerja pada konsentrasi rendah, relatif sederhana dioperasikan, serta dapat difungsikan sebagai tahap pemolesan setelah unit pengolahan utama.

Permasalahan utama dalam penanganan residu farmasi melalui adsorpsi tidak hanya terletak pada kinerja proses, tetapi juga pada kemampuan sistem pengolahan untuk merespons kompleksitas campuran kontaminan dan kondisi air limbah nyata yang sangat bervariasi. Sejumlah studi menggarisbawahi bahwa efisiensi penyisihan residu farmasi sangat dipengaruhi oleh sifat kimia senyawa, karakteristik matriks air limbah, serta parameter operasi seperti pH, waktu kontak, dan dosis adsorben, sehingga hasil yang diperoleh pada kondisi laboratorium ideal tidak selalu dapat langsung digeneralisasi ke skala aplikasi lapangan. Di samping itu, keberadaan residu farmasi yang sering hadir bersama polutan lain, seperti logam berat dan zat organik persisten, membuka potensi terjadinya kompetisi adsorpsi dan perubahan jalur transformasi yang dapat mengurangi efektivitas pengolahan. Hal ini menunjukkan perlunya evaluasi kritis terhadap performa adsorben yang digunakan, termasuk aspek kapasitas adsorpsi, selektivitas terhadap target kontaminan, kemampuan regenerasi, stabilitas material, dan implikasi lingkungan dari penggunaan adsorben itu sendiri.

Dalam beberapa tahun terakhir, material polimer menjadi fokus penting dalam pengembangan adsorben untuk penyisihan residu farmasi karena sifatnya yang dapat direkayasa secara struktural dan fungsional. Polimer sintetik seperti resin penukar ion, hidrogel sintetis, dan polimer fungsional berpori menawarkan keunggulan berupa stabilitas mekanik dan kimia, fleksibilitas dalam desain porositas, serta kemudahan modifikasi gugus fungsi sehingga interaksi elektrostatik, ikatan hidrogen, dan interaksi hidrofobik dengan molekul farmasi dapat dioptimalkan. Namun, ketergantungan pada sumber non-terbarukan dan potensi kontribusi terhadap mikroplastik memunculkan kekhawatiran baru terkait keberlanjutan dan jejak lingkungan material tersebut, terutama jika tidak disertai strategi pengelolaan akhir masa pakai yang memadai. Sebagai respons, berkembang penelitian adsorben berbasis hayati yang memanfaatkan biopolimer seperti kitosan, selulosa, alginat, pati, dan lignin, yang secara alamiah memiliki gugus fungsional aktif serta bersifat terbarukan dan biodegradable, meskipun sering menghadapi tantangan dalam hal kestabilan mekanik dan ketahanan pada rentang kondisi operasi tertentu.

Di tengah lanskap penelitian yang semakin padat, masih terdapat kesenjangan berupa belum adanya pemetaan komprehensif yang secara khusus mengulas perkembangan terkini adsorpsi residu farmasi menggunakan polimer sintetik dan polimer berbasis hayati secara terintegrasi. Kajian yang ada umumnya berfokus pada satu jenis material, satu kelas kontaminan, atau satu pendekatan teknologi, sehingga belum sepenuhnya menggambarkan hubungan antara tren penggunaan polimer sintetik dan bio-based, profil kinerja adsorben, dan arah inovasi yang mendukung prinsip keberlanjutan dalam pengolahan air limbah. Padahal, memahami pola publikasi, klaster tema, dan karakteristik material yang digunakan sangat penting untuk mengidentifikasi area yang sudah jenuh penelitian maupun celah riset yang masih terbuka, misalnya terkait pengembangan adsorben selektif, komposit hibrida, serta penerapan pada air limbah nyata berskala industri atau rumah sakit. Oleh karena itu, diperlukan telaah sistematis yang menggabungkan pendekatan systematic literature review dan analisis bibliometrik untuk merangkum temuan empiris sekaligus memetakan lanskap riset secara kuantitatif dan visual.

Penelitian ini bertujuan untuk meninjau dan memetakan perkembangan studi penghilangan residu farmasi melalui proses adsorpsi menggunakan polimer sintetik dan polimer berbasis hayati dengan mengintegrasikan pendekatan systematic literature review dan analisis bibliometrik. Secara khusus, kajian ini berupaya: (1) mengidentifikasi tren publikasi dan tema dominan terkait aplikasi polimer sintetik dan bio-based sebagai adsorben residu farmasi, (2) merangkum karakteristik utama material dan faktor operasi yang memengaruhi performa adsorpsi, serta (3) mengungkap peluang dan tantangan pengembangan adsorben polimer yang efektif dan berkelanjutan untuk aplikasi pengolahan air limbah. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan global akan teknologi penyisihan residu farmasi yang tidak hanya efisien, tetapi juga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan pengurangan jejak lingkungan material pengolahan, sehingga hasil kajian diharapkan dapat menjadi rujukan bagi

perancang teknologi, peneliti, dan pemangku kepentingan dalam merumuskan strategi pengolahan yang lebih komprehensif. Kebaruan penelitian ini terletak pada kombinasi analisis SLR dan bibliometrik yang secara simultan membandingkan kinerja, tren, dan arah inovasi polimer sintetik dan polimer berbasis hayati untuk adsorpsi residu farmasi, sekaligus menyoroti jalur pengembangan lanjutan seperti komposit, nanokomposit, dan adsorben selektif berbasis molecularly imprinted polymers yang berbasis monomer bio-based.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) yang dipadukan dengan analisis bibliometrik untuk memetakan perkembangan penelitian terkait penghilangan residu farmasi melalui adsorpsi menggunakan polimer sintetik dan polimer berbasis hayati (*bio-based polymers*). Metode SLR digunakan untuk menyeleksi artikel secara sistematis mengikuti alur *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (*PRISMA*), sedangkan analisis bibliometrik digunakan untuk mengevaluasi tren publikasi, dampak sitasi, serta pemetaan topik penelitian menggunakan perangkat lunak *VOSviewer*.

Sumber Data

Data publikasi dikumpulkan menggunakan perangkat *Publish or Perish* (PoP) dengan sumber database *Scopus*, *Google Scholar*, dan *ScienceDirect*. Data yang diperoleh berupa metadata publikasi yang mencakup judul, penulis, tahun publikasi, sumber jurnal/prosiding, serta informasi sitasi. Dataset bibliometrik yang digunakan pada penelitian ini dibatasi sebanyak 100 publikasi karena keterbatasan akses akun pada PoP. Selanjutnya, dilakukan seleksi lanjutan menggunakan metode SLR sehingga diperoleh 20 artikel final yang dianalisis lebih mendalam dan digunakan sebagai referensi utama pada pembahasan.

Tabel 1. Research Databases

Source	Paper	Cites	Cites/Year	H-Index
SCOPUS	30	6,000	122.40	38
Google Scholar	55	10,500	214.20	55
ScienceDirect	15	1,299	26.64	22
Total	100	17,799	363.24	60

Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan pada rentang tahun 1977–2026 sesuai hasil keluaran data pada PoP. Kata kunci disusun untuk mencakup tiga fokus utama, yaitu: (1) residu farmasi, (2) metode adsorpsi, dan (3) adsorben berbasis polimer. Kata kunci yang digunakan meliputi *pharmaceutical residues*, *pharmaceutical contaminants*, *emerging contaminants*, *adsorption*, *adsorptive removal*, *synthetic polymer*, *hydrogel*, *ion exchange resin*, *biopolymer*, *chitosan*, *cellulose*, dan *alginate*. Kombinasi kata kunci diterapkan menggunakan operator Boolean (*AND*/*OR*) agar hasil pencarian lebih relevan dengan topik penelitian. Artikel yang diperoleh dari proses pencarian kemudian diseleksi menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi untuk memastikan kesesuaian dengan tujuan penelitian.

Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Literatur

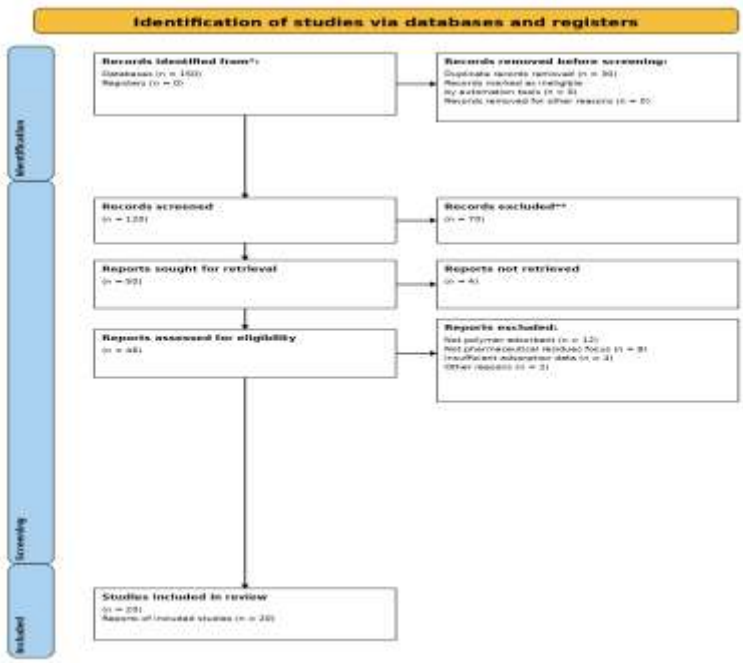
Kategori	Kriteria
Inklusi	(1) Artikel membahas residu farmasi pada media air/air limbah; (2) menggunakan metode adsorpsi; (3) menggunakan adsorben polimer sintetik atau *bio-based* (murni/termodifikasi/komposit); (4) metadata lengkap tersedia; (5) *full-text* dapat diakses
Eksklusi	(1) Duplikat; (2) tidak relevan (bukan residu farmasi atau bukan adsorpsi); (3) tidak menggunakan adsorben berbasis polimer; (4) data kinerja adsorpsi tidak memadai; (5) *full-text* tidak tersedia

Prosedur Seleksi Literatur (*PRISMA*)

Seleksi literatur dilakukan mengikuti alur *PRISMA* yang mencakup tahapan identifikasi, skrining, penilaian kelayakan, dan inklusi. Pada tahap identifikasi diperoleh 150 rekaman dari hasil

pencarian menggunakan PoP. Selanjutnya dilakukan penghapusan duplikasi sebanyak 30 rekaman, sehingga tersisa 120 rekaman untuk proses skrining judul dan abstrak.

Pada tahap skrining, sebanyak 70 rekaman dikeluarkan karena tidak relevan dengan fokus penelitian, sehingga diperoleh 50 artikel untuk penilaian *full-text*. Sebanyak 4 artikel tidak berhasil diperoleh (*not retrieved*), sehingga terdapat 46 artikel yang dinilai kelayakannya. Dari tahap kelayakan, sebanyak 26 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria, sehingga diperoleh 20 artikel final yang dianalisis mendalam dan disitasi pada naskah.



Gambar 1. Diagram Alir *PRISMA* Seleksi Literatur Penghilangan Residu Farmasi Menggunakan Polimer Sintetik dan *Bio-Based* (Artikel akhir n = 20)

Analisis bibliometrik dilakukan pada dataset 100 publikasi menggunakan metrik yang tersedia pada PoP. Indikator bibliometrik yang dianalisis meliputi jumlah publikasi, total sitasi, sitasi per tahun, sitasi per artikel, serta indeks produktivitas dan dampak ilmiah seperti *h-index* dan *g-index*.

Tabel 3. Citation Metrics Dataset

Parameter	Nilai
Publication years	1977–2026
Citation years	1977–2026 (49 tahun)
Papers	100
Citations	17,799
Cites/year	363.24
Cites/paper	177.99
Cites/author	7,981.95
Papers/author	33.07
Authors/paper	3.77
h-index	60
g-index	100
hI,norm	33
hI,annual	0.67
hA-index	28

Pemetaan Bibliometrik Menggunakan *VOSviewer*

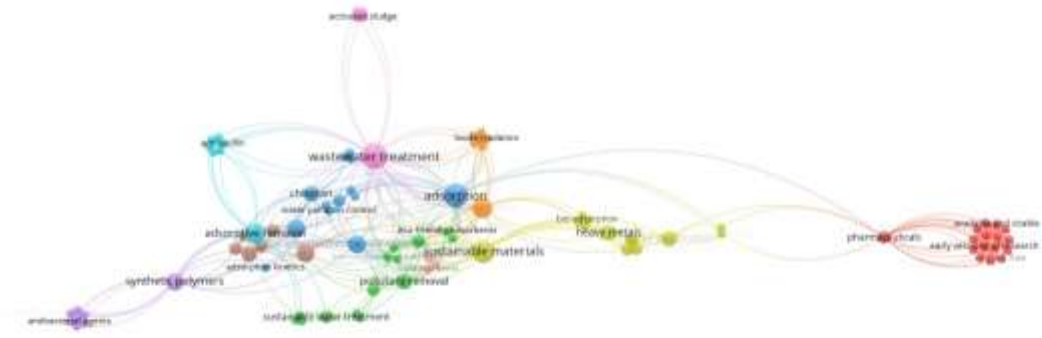
Pemetaan bibliometrik dilakukan menggunakan perangkat lunak *VOSviewer* dengan analisis utama *co-occurrence* kata kunci untuk mengidentifikasi keterkaitan topik penelitian dan pembentukan klaster tema. Visualisasi yang digunakan meliputi *network visualization* untuk melihat jaringan hubungan kata kunci, *overlay visualization* untuk melihat tren perkembangan topik berdasarkan tahun, serta *density visualization* untuk menunjukkan kepadatan penelitian pada tema tertentu. Hasil pemetaan ini

digunakan sebagai dasar interpretasi tren riset dominan terkait adsorben polimer sintetik dan *bio-based* untuk penghilangan residu farmasi. Sebanyak 20 artikel final dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi jenis polimer yang digunakan, mekanisme adsorpsi dominan, pengaruh parameter operasi (pH, dosis adsorben, waktu kontak), serta tantangan penelitian seperti regenerasi adsorben dan penerapan pada air limbah nyata. Hasil analisis SLR kemudian disintesis dengan hasil bibliometrik untuk menyusun kesimpulan dan rekomendasi arah penelitian lanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis *Network Visualization* (Jaringan Kata Kunci)

Hasil pemetaan menggunakan *VOSviewer* pada tampilan *network visualization* menunjukkan bahwa jaringan kata kunci membentuk struktur yang terpusat pada tema utama pengolahan air limbah dan proses adsorpsi. Node dengan ukuran paling besar dan berada pada posisi sentral adalah *adsorption* dan *wastewater treatment*, yang menandakan bahwa kedua kata kunci tersebut merupakan fokus dominan dalam penelitian terkait penghilangan residu farmasi menggunakan adsorben berbasis polimer. Keterhubungan yang kuat antara kedua node tersebut memperlihatkan bahwa proses adsorpsi sering diposisikan sebagai bagian penting dalam sistem pengolahan air limbah untuk mengurangi kontaminan, termasuk residu farmasi.



Gambar 2. Peta *Network Visualization* Kata Kunci Penelitian Adsorpsi Residu Farmasi Menggunakan Polimer Sintetik dan *Bio-Based* dengan *VOSviewer*

Selain itu, kata kunci *adsorptive removal* tampak berada dekat dengan pusat jaringan dan memiliki hubungan yang rapat dengan beberapa node lain. Hal ini menunjukkan bahwa banyak penelitian menekankan aspek "penyisihan melalui adsorpsi" sebagai pendekatan utama dalam mengatasi kontaminan. Node *sustainable materials* juga muncul cukup dominan dan terhubung langsung dengan node pusat, yang mengindikasikan bahwa pengembangan material adsorben saat ini tidak hanya berorientasi pada efisiensi penyisihan, tetapi juga mengarah pada material yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Pada jaringan ini terlihat bahwa kata kunci yang merepresentasikan jenis material adsorben polimer muncul sebagai node penting, terutama *chitosan* dan *synthetic polymers*. Node *chitosan* berada relatif dekat dengan pusat jaringan dan memiliki keterkaitan dengan kata kunci yang berkaitan dengan kontrol pencemaran air, menunjukkan bahwa biopolimer ini banyak digunakan sebagai basis adsorben karena sifatnya yang mudah dimodifikasi dan potensial sebagai material ramah lingkungan. Sementara itu, node *synthetic polymers* berada pada bagian kiri jaringan dan tetap memiliki keterhubungan dengan tema *adsorptive removal*, yang menandakan bahwa polimer sintetik masih berperan penting dalam pengembangan adsorben dengan desain struktur yang lebih terkontrol.

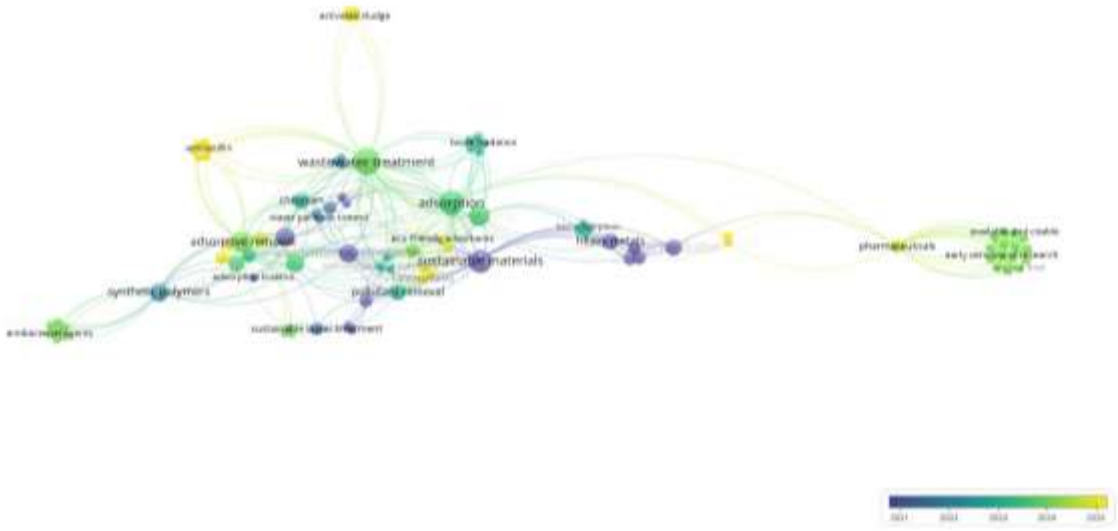
Kata kunci *pharmaceuticals* terlihat berada pada sisi kanan jaringan dan membentuk kelompok tersendiri yang terhubung melalui jalur dari tema pusat adsorpsi dan pengolahan air. Posisi yang relatif

terpisah ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai residu farmasi merupakan subtema yang berkembang, namun masih terhubung dengan isu besar pengolahan air limbah dan teknologi adsorpsi. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa residu farmasi sering dibahas sebagai bagian dari kelompok kontaminan yang lebih luas, sehingga keterhubungannya dengan tema utama tetap kuat meskipun node-nya tidak berada tepat di pusat jaringan.

Selain residu farmasi, jaringan kata kunci juga menunjukkan adanya keterkaitan dengan topik kontaminan lain seperti *heavy metals* dan konsep aplikasi seperti *water purification*. Keberadaan kata kunci tersebut mengindikasikan bahwa adsorben berbasis polimer tidak hanya diteliti untuk satu jenis kontaminan, tetapi juga sering diuji untuk berbagai polutan, sehingga memperluas peluang pengembangan adsorben polimer multifungsi. Dengan demikian, *network visualization*memperlihatkan bahwa riset adsorpsi berbasis polimer berkembang dalam arah integratif, yaitu menghubungkan aspek material, proses, dan aplikasi pengolahan air.

Analisis *Overlay Visualization* (Tren Perkembangan Topik)

Hasil pemetaan *overlay visualization* pada *VOSviewer* menunjukkan perkembangan topik penelitian dalam rentang waktu 2021–2025. Pada peta ini, perbedaan warna node merepresentasikan tahun kemunculan rata-rata (*average publication year*) dari masing-masing kata kunci. Kata kunci yang berada pada spektrum warna lebih tua menunjukkan topik yang lebih awal berkembang, sedangkan warna yang lebih terang mengindikasikan topik yang lebih baru dan sedang meningkat intensitas penelitiannya.



Gambar 3. Peta *Overlay Visualization* Perkembangan Kata Kunci Penelitian Adsorpsi Residu Farmasi Menggunakan Polimer dengan *VOSviewer* (2021–2025)

Berdasarkan peta, kata kunci inti seperti *adsorption* dan *wastewater treatment* tampak berada pada posisi sentral dan memiliki keterhubungan tinggi dengan berbagai node lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua topik tersebut merupakan fondasi utama yang terus digunakan dalam berbagai penelitian, baik pada periode awal maupun periode terbaru. Dengan kata lain, konsep adsorpsi dan pengolahan air limbah tetap menjadi basis penelitian dalam penghilangan kontaminan, termasuk residu farmasi, menggunakan adsorben berbasis polimer.

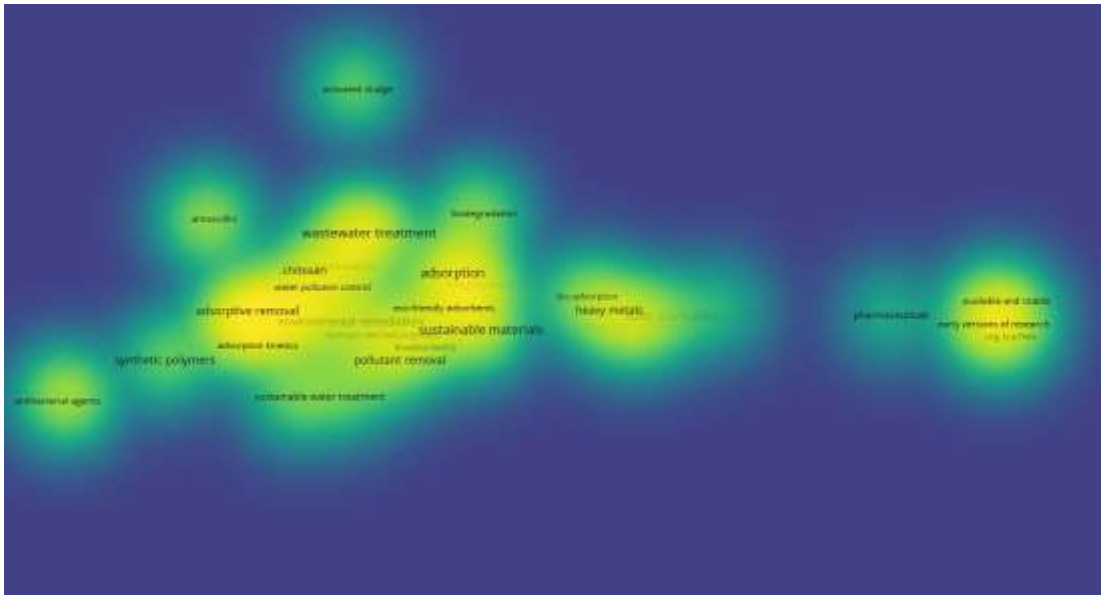
Selain itu, kata kunci *sustainable materials* menunjukkan posisi yang cukup menonjol dengan keterhubungan yang kuat terhadap tema utama. Kemunculan kata kunci ini pada periode yang lebih mutakhir menunjukkan bahwa penelitian terbaru tidak hanya berorientasi pada peningkatan efisiensi penyisihan, tetapi juga mulai menekankan pentingnya material adsorben yang berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan tren pengembangan adsorben berbasis bahan ramah lingkungan, termasuk polimer berbasis hayati, yang semakin banyak dikaji sebagai alternatif dari material sintetik konvensional.

Pada bagian kanan peta, kata kunci *pharmaceuticals* tampak berwarna lebih baru dibandingkan beberapa kata kunci lain di sekitarnya. Hal ini menunjukkan bahwa fokus terhadap kontaminan farmasi semakin berkembang pada penelitian terkini. Posisi kata kunci *pharmaceuticals* yang terhubung dengan tema pengolahan air dan adsorpsi memperlihatkan bahwa residu farmasi menjadi perhatian yang meningkat, terutama dalam konteks kontaminan emergen yang sulit dihilangkan dengan pengolahan konvensional. Dengan demikian, *overlay visualization* menegaskan adanya kecenderungan peningkatan penelitian yang lebih spesifik menargetkan residu farmasi dalam sistem air.

Secara keseluruhan, peta *overlay visualization* menunjukkan adanya pergeseran fokus penelitian dari tema umum pengolahan air dan adsorpsi menuju tema yang lebih spesifik, seperti pengembangan adsorben ramah lingkungan dan perhatian terhadap residu farmasi. Tren ini menunjukkan bahwa penelitian pada bidang adsorpsi berbasis polimer tidak hanya berkembang dalam aspek teknologi, tetapi juga mulai memperhatikan aspek keberlanjutan dan relevansi kontaminan target.

Analisis *Density Visualization* (Kepadatan Topik Dominan)

Hasil pemetaan *density visualization* menunjukkan area topik dengan intensitas penelitian tertinggi berdasarkan kepadatan kemunculan kata kunci. Pada peta ini, area dengan warna lebih terang dan pekat menggambarkan tema yang paling sering muncul dan menjadi fokus dominan penelitian. Sebaliknya, area dengan warna lebih redup menunjukkan tema yang masih relatif jarang dikaji sehingga berpotensi menjadi peluang penelitian lanjutan.



Gambar 4. Peta *Density Visualization* Kepadatan Kata Kunci Penelitian Adsorpsi Residu Farmasi Menggunakan Polimer dengan *VOSviewer*

Berdasarkan peta kepadatan, area pusat yang memiliki intensitas tertinggi berada pada kata kunci *adsorption*, *wastewater treatment*, *adsorptive removal*, dan *sustainable materials*. Kepadatan yang tinggi pada area ini menunjukkan bahwa sebagian besar publikasi berfokus pada penerapan adsorpsi sebagai strategi utama pengolahan air limbah, sekaligus menekankan pengembangan material adsorben yang lebih berkelanjutan. Temuan ini memperlihatkan bahwa riset adsorpsi berbasis polimer berkembang secara aktif karena mampu menjawab kebutuhan penyisihan kontaminan pada air limbah secara lebih efektif.

Selain tema inti tersebut, kepadatan yang cukup tinggi juga terlihat pada kata kunci *chitosan*, yang menandakan bahwa biopolimer ini menjadi salah satu material adsorben yang paling banyak diteliti. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan polimer berbasis hayati tidak hanya bersifat pelengkap, tetapi telah menjadi salah satu pendekatan utama dalam pengembangan adsorben. Kemunculan *chitosan* dalam area yang padat juga mengindikasikan bahwa material ini memiliki relevansi tinggi dalam konteks pengolahan air tercemar dan sering digunakan dalam berbagai variasi penelitian.

Pada sisi lain peta, kata kunci *synthetic polymers* masih tampak jelas meskipun kepadatannya tidak setinggi area pusat. Kondisi ini dapat diinterpretasikan bahwa polimer sintetik tetap penting dalam penelitian adsorben, namun dalam dataset yang dianalisis, perhatian terhadap material berkelanjutan dan biopolimer terlihat lebih dominan. Selain itu, kata kunci seperti *heavy metals* dan *water purification* juga muncul dengan kepadatan sedang, yang menunjukkan bahwa adsorben polimer banyak dikembangkan untuk aplikasi pengolahan air secara luas, termasuk penanganan kontaminan selain residu farmasi.

Dengan demikian, *density visualization* memperlihatkan bahwa tema paling dominan pada penelitian ini adalah adsorpsi dalam konteks pengolahan air limbah dan pengembangan material adsorben berkelanjutan. Sementara itu, tema yang kepadatannya lebih rendah dapat dipandang sebagai ruang penelitian yang masih terbuka, misalnya pengembangan adsorben yang lebih selektif terhadap residu farmasi tertentu atau evaluasi performa pada kondisi air limbah nyata yang lebih kompleks.

Sintetis Literatur Terpilih

Literatur yang terpilih dalam kajian ini merepresentasikan perkembangan riset mengenai penghilangan residu farmasi melalui proses adsorpsi menggunakan adsorben berbasis polimer. Studi-studi yang dianalisis mencakup polimer sintetik dan polimer berbasis hayati (*bio-based*), termasuk pengembangan komposit, modifikasi permukaan, serta pendekatan berkelanjutan untuk aplikasi pengolahan air limbah. Sintetis literatur dilakukan untuk merangkum fokus penelitian, kecenderungan tema dominan, dan kontribusi ilmiah dari masing-masing studi sehingga pembahasan dapat disusun secara sistematis dan terarah.

Tabel 3. Daftar Artikel Terpilih pada Kajian *Systematic Literature Review* (SLR)

No	Penulis (Tahun)	Judul Artikel	Jenis Artikel	Fokus Kajian
1	El-monaem, Eman M Abd; Eltawell, Abdelazeem S; Meshinski, Hala M (2022)	*Sustainable adsorptive removal of antibiotic residues by chitosan composites: An insight into current developments and future recommendations*	*Review*	Komposit *chitosan* untuk adsorpsi residu antibiotik
2	Nguyen, Van Doan; Luu, Anh; Chang-chien, Guo-ping (2025)	*Materials Advances: Progress in biochar derived adsorbents: preparation, modification strategies, and applications in remediation of antibiotics from wastewater*	*Review*	Adsorben turunan *biochar* untuk remediasi antibiotik
3	Pamukoğlu, Muhammet Yunus; Yoldas, Belgin Babar (2025)	*Adsorptive Removal of Amoxicillin Using Green-Synthesized SiNH2@FeNP Nanocomposite: Characterization, Optimization, and Modeling*	Eksperimental	Adsorpsi amoksisilin, optimasi, dan pemodelan
4	Pérez-Lucas, Gabriel; Navarro, Simón (2024)	*How Pharmaceutical Residues Occur, Behave, and Affect the Soil Environment*	*Review*	Residu farmasi dan dampaknya pada tanah
5	Nidhi, G; Aparna, J S; Sinha, Akshat Bhushan; Holla,	*Recent advances in utilizing microbial polymers for eco-friendly nanocomposites in*	*Review*	Polimer mikroba untuk nanokomposit ramah lingkungan

	Sowmya R; Selvaraj, Subbalaxmi (2025)	*pharmaceutical waste remediation*		
6	Alkhaldi, Huda; Alharthi, Sarah; Alharthi, Salha; Alghamdi, Hind A; Boraie, Waleed E; Attia, Mohamed S; dkk. (2024)	*Sustainable polymeric adsorbents for adsorption-based water remediation and pathogen deactivation: a review*	*Review*	Adsorben polimer berkelanjutan untuk remediasi air
7	Alam, Akhtar (2025)	*Sustainability: Natural polymer-based bioadsorbents for wastewater treatment*	*Review*	Bioadsorben polimer alami untuk air limbah
8	Mahdavi, Parisa; Siol, Antje (2025)	*Adsorption-based removal of pharmaceutical from water: A critical review on adsorbent performance*	*Review*	Review performa adsorben untuk farmasi
9	Mousavi, Seyyed Mojtaba; Hashemi, Seyyed Alireza; Kalashgrani, Masoomeh Yari; Zare, Iman; Rahmanian, Vahid; dkk. (2024)	*Synthetic Polymers as Antibacterial and Antiviral Agents*	*Review*	Polimer sintetik sebagai material fungsional
10	Mansouri, Fatma; Chouchene, Khawla; Roche, Nicolas (2021)	*Removal of Pharmaceuticals from Water by Adsorption and Advanced Oxidation Processes: State of the Art and Trends*	*Review*	Adsorpsi & oksidasi lanjut untuk residu farmasi
11	Ravindran, Akila; Panneerselvan, Logeshwaran; Palanisami, Thavamani; Sathish, C I (2025)	*Eco-friendly biopolymers and composites: a sustainable development of adsorbents for the removal of pollutants from wastewater*	*Review*	Biopolimer/komposit ramah lingkungan
12	Kasbaji, Meriem; Mennani, Mehdi; Oubenali, Mustapha; Ait Benhamou, Anass; Boussetta, Abdelghani; dkk. (2023)	*Bio-based functionalized adsorptive polymers for sustainable water decontamination: A systematic review of challenges and real-world implementation*	*Systematic review*	Polimer fungsional *bio-based* dan tantangan implementasi
13	Elgarahy, Ahmed; Eloffy, M G (2023)	*Use of biopolymers in wastewater treatment: A brief review of current trends and prospects*	*Review*	Tren biopolimer untuk pengolahan air limbah
14	Bahadorikhalili, Saeed; Sharifianjazi, Fariborz; Azimpour, Maryam; Bashi, Neda Min; Abuchenari, Aliasghar; dkk. (2022)	*Carbon-based composites for removal of pharmaceutical components from water*	*Review*	Komposit karbon untuk penyisihan farmasi

15	Shagorova, Balzhima; Zhukova, Yulia; Il, Alla (2025)	*Adsorbent Materials Based on Modified Chitosan for Purification of Aqueous Media from Pharmaceutical Residues, Primarily Antibiotics*	*Review*	*Chitosan*termodifikasi untuk residu farmasi
16	Kolya, Haradhan (2023)	*Bio-Based Polymeric Flocculants and Adsorbents for Wastewater Treatment*	*Review*	Flokulan & adsorben polimer *bio-based*
17	Ramakrishnan, Rohith K; Padil, Vinod V T; Cernik, Miroslav; Varma, Rajender S (2021)	*Eco-Friendly and Economic, Adsorptive Removal of Cationic and Anionic Dyes by Bio-Based Karaya Gum-Chitosan Sponge*	*Review*	Adsorpsi ramah lingkungan untuk polutan kationik
18	Ul, Izzat; Atir, Islam; Qurashi, Naeem; Adnan, Adnan; Ali, Ashraf; Janiad, Sara; Ali, Fahad; Wang, Xinhai; Ling, Sijie; dkk. (2025)	*Bioremediation and Adsorption: Strategies for Managing Pharmaceutical Pollution in Aquatic Environment*	*Review*	Strategi bioremediasi & adsorpsi untuk polusi farmasi
19	Savigni, Elettra; Girometti, Elisa; Sisti, Laura; Benstoem, Frank; Pinelli, Davide; Frascari, Dario (2025)	*Development and Validation of Molecularly Imprinted Polymers with Bio-Based Monomers to Adsorb Carbamazepine from Wastewater*	Eksperimental	*Molecularly imprinted polymers*(*MIP*) untuk karbamazepin
20	Otero, Marta; Coimbra, Ricardo N (2025)	*Polymeric Materials for Wastewater Treatment Applications*	*Review*	*Material polimer untuk aplikasi pengolahan air limbah*

Residu Farmasi sebagai Kontaminan Emergen pada Sistem Perairan

Residu farmasi merupakan salah satu kelompok kontaminan emergen yang semakin banyak dilaporkan keberadaannya di berbagai kompartemen lingkungan, khususnya pada sistem perairan. Senyawa-senyawa farmasi seperti antibiotik, antiepilepsi, analgesik, dan berbagai jenis obat lain dapat masuk ke lingkungan melalui jalur pembuangan rumah tangga, fasilitas kesehatan, industri farmasi, serta limbah pertanian dan peternakan. Keberadaan residu farmasi dalam air menjadi perhatian karena senyawa ini dapat tetap aktif secara biologis pada konsentrasi rendah, bersifat persisten, serta berpotensi menimbulkan efek ekologis jangka panjang. Selain itu, residu farmasi juga berhubungan dengan isu resistensi antimikroba (*antimicrobial resistance*) karena paparan antibiotik dalam lingkungan dapat memberikan tekanan seleksi pada mikroorganisme. Dengan demikian, residu farmasi tidak hanya menjadi isu pencemaran biasa, tetapi telah berkembang sebagai isu multidimensi yang memerlukan pendekatan teknologi pengolahan yang efektif dan berkelanjutan.

Dalam lingkungan yang lebih luas, residu farmasi tidak hanya ditemukan pada perairan, tetapi juga dapat terakumulasi dan memengaruhi media tanah. Pérez-Lucas dan Navarro (2024) menjelaskan bahwa residu farmasi dapat terjadi, berperilaku, dan memberikan dampak terhadap lingkungan tanah melalui berbagai jalur, termasuk infiltrasi air tercemar, penggunaan lumpur hasil pengolahan air limbah, dan aplikasi pupuk organik yang mengandung kontaminan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa pengendalian residu farmasi perlu dipahami sebagai isu lintas media, sehingga teknologi penyisihan residu farmasi pada air limbah dapat berperan sebagai langkah mitigasi awal untuk mencegah penyebaran kontaminan ke lingkungan yang lebih luas. Apabila residu farmasi tidak

dikendalikan secara efektif di sumbernya, maka kontaminan tersebut berpotensi menyebar dan berinteraksi dengan ekosistem, termasuk memengaruhi mikroorganisme tanah, tanaman, serta organisme akuatik.

Sistem pengolahan air limbah konvensional pada umumnya dirancang untuk menghilangkan parameter pencemar makro seperti *biochemical oxygen demand* (*BOD*), *chemical oxygen demand* (*COD*), dan padatan tersuspensi. Namun, residu farmasi sering kali memiliki struktur kimia yang stabil dan dapat lolos dari proses biologis konvensional, terutama pada konsentrasi jejak (*trace level*). Hal ini mendorong peningkatan kebutuhan terhadap teknologi tambahan yang mampu menyisihkan kontaminan emergen secara lebih efektif. Mansouri, Chouchene, dan Roche (2021) menegaskan bahwa penyisihan farmasi dari air dapat dilakukan melalui berbagai teknologi, termasuk adsorpsi dan proses oksidasi lanjut, yang menunjukkan bahwa strategi pengolahan modern cenderung menggabungkan beberapa pendekatan untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi. Mahdavi dan Siol (2025) juga menyoroti bahwa performa adsorben untuk penyisihan farmasi dari air perlu dievaluasi secara kritis karena perbedaan material, parameter operasi, serta karakter kontaminan dapat menyebabkan hasil yang sangat bervariasi.

Seiring berkembangnya riset, perhatian tidak hanya berfokus pada "apakah residu farmasi bisa disisihkan", tetapi juga "bagaimana residu farmasi dapat disisihkan secara efisien, ekonomis, dan berkelanjutan". Dalam hal ini, pemilihan material adsorben menjadi salah satu kunci utama karena adsorben menentukan interaksi kimia-fisika dengan molekul farmasi. Polimer menjadi material yang semakin banyak dikaji karena memiliki fleksibilitas tinggi dalam desain struktur dan modifikasi gugus fungsi. Selain itu, penggunaan polimer juga dapat disesuaikan untuk berbagai skenario pengolahan air limbah, baik sebagai adsorben mandiri maupun sebagai bagian dari komposit dan material fungsional lain. Otero dan Coimbra (2025) menegaskan bahwa material polimer memiliki ruang aplikasi yang luas dalam pengolahan air limbah, tidak hanya sebagai adsorben tetapi juga sebagai material yang mendukung berbagai mekanisme pemurnian air. Hal ini memperlihatkan bahwa polimer dapat menjadi platform material yang strategis untuk menghadapi kompleksitas kontaminan residu farmasi.

Berdasarkan literatur terpilih, residu farmasi yang sering menjadi fokus penelitian meliputi antibiotik (misalnya amoksisilin), senyawa farmasi persisten (misalnya karbamazepin), serta kelompok kontaminan lain yang sering muncul dalam air limbah. Penelitian juga menunjukkan bahwa residu farmasi sering hadir dalam campuran kompleks, sehingga interaksi kompetitif antar senyawa dapat memengaruhi efisiensi penyisihan. Dalam kondisi demikian, teknologi adsorpsi dinilai menjanjikan karena mampu menangani berbagai jenis kontaminan, terutama jika adsorben dirancang memiliki gugus aktif yang sesuai. Oleh karena itu, pengembangan adsorben berbasis polimer baik sintetik maupun *bio-based*—menjadi salah satu fokus penting dalam literatur terbaru.

Adsorpsi Berbasis Polimer sebagai Pendekatan Penyisihan Residu Farmasi

Adsorpsi merupakan proses pemindahan kontaminan dari fase cair ke permukaan padatan melalui interaksi fisik maupun kimia. Dalam pengolahan air limbah, adsorpsi memiliki keunggulan karena dapat diterapkan pada konsentrasi kontaminan rendah, tidak memerlukan energi tinggi, serta dapat digunakan sebagai proses *polishing* setelah pengolahan utama. Mansouri, Chouchene, dan Roche (2021) menyebutkan bahwa adsorpsi merupakan salah satu metode penting dalam penyisihan farmasi dari air, dan sering dipertimbangkan bersama teknologi lain seperti proses oksidasi lanjut untuk meningkatkan efisiensi penyisihan. Kombinasi ini menunjukkan bahwa adsorpsi dapat berperan sebagai teknologi yang fleksibel, baik sebagai proses utama maupun pendukung, tergantung pada desain sistem pengolahan.

Dalam penelitian modern, adsorpsi tidak lagi hanya dinilai dari besarnya kapasitas adsorpsi, tetapi juga dari aspek selektivitas, regenerasi adsorben, stabilitas material, dan potensi penerapan pada kondisi air limbah nyata. Mahdavi dan Siol (2025) menekankan bahwa penilaian performa adsorben perlu dilakukan secara kritis karena banyak penelitian laboratorium dilakukan pada kondisi ideal yang tidak selalu merepresentasikan kompleksitas air limbah. Oleh karena itu, pengembangan adsorben berbasis polimer cenderung diarahkan pada peningkatan interaksi spesifik dengan residu farmasi dan penguatan stabilitas adsorben untuk penggunaan berulang.

Polimer menjadi salah satu material adsorben yang menarik karena memiliki karakteristik yang dapat direkayasa secara luas. Polimer dapat dibentuk menjadi hidrogel, membran, butiran (*beads*), atau

material berpori, sehingga memberikan fleksibilitas dalam proses adsorpsi. Selain itu, polimer dapat dimodifikasi dengan penambahan gugus fungsi tertentu untuk meningkatkan afinitas terhadap residu farmasi. Pada senyawa farmasi bermuatan, interaksi elektrostatik dapat menjadi dominan, sedangkan pada senyawa farmasi dengan struktur aromatik, interaksi hidrofobik dan π–π dapat berperan. Oleh karena itu, desain adsorben polimer sering mempertimbangkan kesesuaian gugus fungsi permukaan dengan karakter residu farmasi target.

Literatur terpilih juga menunjukkan bahwa adsorpsi berbasis polimer tidak hanya digunakan untuk residu farmasi, tetapi juga dikaji untuk berbagai jenis polutan lain yang umum terdapat pada air limbah. Ramakrishnan, Padil, Cernik, dan Varma (2021) membahas penyisihan polutan kationik secara ramah lingkungan dan ekonomis, yang menunjukkan bahwa material adsorben dapat diarahkan untuk spektrum kontaminan yang luas. Hal ini relevan karena air limbah pada kondisi nyata umumnya mengandung campuran kontaminan organik dan anorganik, sehingga pengembangan adsorben polimer yang adaptif dapat memberikan keuntungan praktis.

Selain itu, beberapa literatur menekankan bahwa penyisihan residu farmasi dapat diperkuat melalui integrasi dengan pendekatan lain seperti bioremediasi. Ul, Atir, Qurashi, Adnan, Ali, Janiad, Ali, Wang, dan Ling (2025) membahas strategi pengelolaan polusi farmasi di lingkungan perairan melalui bioremediasi dan adsorpsi. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi dapat diposisikan sebagai bagian dari strategi pengolahan yang lebih luas, terutama ketika residu farmasi memiliki tingkat persistensi tinggi. Dengan demikian, adsorpsi berbasis polimer dapat menjadi teknologi yang tidak berdiri sendiri, tetapi dapat diintegrasikan dalam sistem pengolahan air limbah yang lebih komprehensif.

Pengembangan adsorben polimer juga dipengaruhi oleh tren global menuju material berkelanjutan. Banyak penelitian tidak hanya menguji performa adsorpsi, tetapi juga menilai aspek keberlanjutan bahan, potensi biodegradabilitas, dan dampak lingkungan dari material adsorben setelah digunakan. Konsep ini mendorong peningkatan penggunaan polimer berbasis hayati (*bio-based*) sebagai alternatif adsorben yang lebih ramah lingkungan. Pada saat yang sama, polimer sintetik masih banyak digunakan karena stabilitas dan kemudahan kontrol struktur materialnya. Oleh karena itu, literatur menunjukkan adanya dua jalur utama pengembangan adsorben polimer: polimer sintetik untuk performa tinggi dan kontrol material, serta polimer *bio-based* untuk keberlanjutan dan ketersediaan sumber.

Polimer Sintetik dalam Penghilangan Residu Farmasi

Polimer sintetik merupakan material yang banyak digunakan dalam pengembangan adsorben karena memiliki keunggulan pada stabilitas, ketahanan mekanik, serta kemudahan rekayasa sifat permukaan. Dalam konteks adsorpsi residu farmasi, polimer sintetik dapat didesain untuk memiliki gugus aktif tertentu, struktur pori yang sesuai, serta kemampuan berinteraksi dengan kontaminan target. Hal ini membuat polimer sintetik menjadi kandidat kuat untuk sistem pengolahan air limbah yang membutuhkan material dengan performa konsisten.

Mousavi, Hashemi, Kalashgrani, Zare, dan Rahmanian (2024) membahas polimer sintetik sebagai agen antibakteri dan antivirus, yang memperlihatkan bahwa polimer sintetik dapat dikembangkan menjadi material fungsional dengan sifat spesifik. Meskipun kajian tersebut tidak sepenuhnya berfokus pada adsorpsi residu farmasi, implikasinya penting karena menunjukkan fleksibilitas polimer sintetik dalam rekayasa sifat permukaan. Kemampuan ini dapat diterjemahkan dalam pengembangan adsorben untuk residu farmasi, misalnya dengan menambahkan gugus fungsional yang meningkatkan afinitas adsorpsi atau meningkatkan selektivitas terhadap senyawa target.

Dalam literatur terpilih, penggunaan polimer sintetik juga sering dikaitkan dengan pengolahan air berbasis adsorpsi yang lebih luas. Alkhaldi, Alharthi, Alharthi, Alghamdi, Boraie, dan Attia (2024) menyoroti peran adsorben polimer dalam remediasi air berbasis adsorpsi serta kaitannya dengan peningkatan kualitas air. Hal ini menunjukkan bahwa adsorben polimer sintetik tidak hanya relevan untuk penyisihan residu farmasi, tetapi juga dapat diposisikan dalam konteks pengolahan air yang mencakup berbagai jenis kontaminan. Dengan demikian, polimer sintetik memiliki potensi untuk

dikembangkan menjadi adsorben multifungsi yang dapat menangani beberapa jenis kontaminan sekaligus.

Pengembangan adsorben polimer sintetik juga sering dilakukan melalui strategi komposit untuk meningkatkan performa adsorpsi. Bahadorikhalili, Sharifianjazi, Azimpour, Bashi, dan Abuchenari (2022) membahas komposit berbasis karbon untuk penyisihan komponen farmasi dari air. Material berbasis karbon dikenal memiliki luas permukaan tinggi dan kemampuan interaksi hidrofobik yang kuat, sehingga dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap senyawa farmasi yang memiliki struktur aromatik. Ketika dikombinasikan dengan polimer, komposit ini dapat memiliki stabilitas mekanik yang lebih baik serta kemudahan pemrosesan material.

Selain komposit berbasis karbon, literatur juga menunjukkan perkembangan adsorben turunan *biochar* yang digunakan untuk remediasi antibiotik. Nguyen, Luu, dan Chang-chien (2025) meninjau kemajuan adsorben turunan *biochar*, termasuk strategi modifikasi dan aplikasinya untuk penyisihan antibiotik dari air limbah. Meskipun *biochar* berasal dari biomassa, material ini sering dipadukan dengan polimer atau dimodifikasi untuk meningkatkan sifat permukaan dan kapasitas adsorpsi. Hal ini menunjukkan bahwa batas antara "polimer sintetik" dan "material berbasis hayati" dapat menjadi fleksibel ketika penelitian mengarah pada komposit yang memadukan beberapa jenis material untuk memperoleh performa optimal.

Dalam penelitian eksperimental, penggunaan nanokomposit juga menjadi bagian dari pengembangan adsorben polimer sintetik. Pamukoğlu dan Yoldaş (2025) menunjukkan adsorpsi amoksisilin menggunakan nanokomposit yang disintesis secara hijau, serta melakukan karakterisasi, optimasi, dan pemodelan. Studi ini menegaskan bahwa adsorben polimer modern tidak hanya diuji pada kemampuan adsorpsi, tetapi juga dianalisis secara kuantitatif melalui pemodelan untuk memahami mekanisme dan optimasi proses. Pendekatan ini penting karena residu farmasi sering hadir dalam konsentrasi rendah, sehingga diperlukan desain material yang mampu bekerja efektif pada kondisi tersebut.

Pada sisi lain, kajian terkait penyisihan polutan kationik menunjukkan bahwa adsorben polimer dapat dikembangkan untuk kontaminan dengan sifat kimia yang berbeda. Ramakrishnan, Padil, Cernik, dan Varma (2021) membahas adsorpsi polutan kationik secara ramah lingkungan dan ekonomis, yang memberikan gambaran bahwa desain adsorben dapat diarahkan untuk menargetkan muatan tertentu pada kontaminan. Hal ini relevan untuk residu farmasi karena banyak senyawa farmasi memiliki bentuk ionik pada kondisi pH tertentu. Oleh karena itu, polimer sintetik dapat dimodifikasi untuk meningkatkan interaksi elektrostatik terhadap residu farmasi yang bermuatan.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa polimer sintetik memiliki peran yang penting dalam penghilangan residu farmasi karena stabilitas, fleksibilitas rekayasa, dan potensi pengembangan material komposit. Meskipun demikian, tren penelitian terbaru juga menunjukkan adanya kebutuhan untuk menyeimbangkan performa dengan aspek keberlanjutan, sehingga polimer sintetik sering dikombinasikan dengan material *bio-based* atau diarahkan pada sintesis hijau.

Polimer Berbasis Hayati (*Bio-Based*) untuk Adsorpsi Residu Farmasi

Polimer berbasis hayati (*bio-based*) berkembang sebagai adsorben alternatif yang mendukung konsep material berkelanjutan. Polimer ini umumnya berasal dari sumber alami seperti biomassa, mikroorganisme, atau limbah organik yang dapat diperbarui. Penggunaan polimer *bio-based* dalam adsorpsi residu farmasi menarik karena selain ramah lingkungan, material ini juga memiliki gugus fungsi alami yang dapat berinteraksi dengan kontaminan. Alam (2025) menekankan bahwa bioadsorben berbasis polimer alami memiliki potensi besar untuk pengolahan air limbah, terutama karena ketersediaannya tinggi dan mendukung pengembangan teknologi yang lebih berkelanjutan.

Elgarahy dan Eloffy (2023) meninjau penggunaan biopolimer dalam pengolahan air limbah dan menegaskan bahwa biopolimer semakin banyak digunakan karena fleksibilitasnya dalam berbagai proses pengolahan. Biopolimer dapat dimodifikasi untuk meningkatkan stabilitas dan kapasitas adsorpsi, sehingga mampu bersaing dengan material sintetik pada beberapa aplikasi. Selain itu, Kolya (2023) membahas polimer *bio-based* sebagai flokulan dan adsorben untuk pengolahan air limbah, yang menunjukkan bahwa biopolimer dapat digunakan dalam lebih dari satu mekanisme pemisahan.

Integrasi fungsi ini penting karena pengolahan air limbah pada kondisi nyata sering memerlukan beberapa mekanisme untuk mencapai kualitas air yang diinginkan.

Salah satu biopolimer yang paling dominan dalam literatur terpilih adalah *chitosan*. El-monaem, Eltawell, dan Meshinski (2022) membahas penyisihan residu antibiotik melalui komposit *chitosan* secara berkelanjutan, sekaligus memberikan wawasan tentang perkembangan terkini dan rekomendasi penelitian masa depan. Dominasi *chitosan* dalam literatur menunjukkan bahwa biopolimer ini memiliki potensi besar sebagai adsorben karena memiliki gugus amina yang dapat berinteraksi dengan senyawa farmasi melalui ikatan hidrogen dan interaksi elektrostatik. Selain itu, *chitosan* relatif mudah dimodifikasi melalui *crosslinking* atau pembentukan komposit untuk meningkatkan kestabilan material.

Shagorova, Zhukova, dan Il (2025) juga menekankan bahwa material adsorben berbasis *chitosan* termodifikasi efektif untuk pemurnian media air dari residu farmasi, terutama antibiotik. Kajian ini memperlihatkan bahwa modifikasi *chitosan*dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi dan memperluas aplikasi material. Dengan demikian, *chitosan* tidak hanya dipandang sebagai biopolimer murni, tetapi sebagai platform material yang dapat dikembangkan menjadi berbagai bentuk adsorben sesuai kebutuhan.

Selain *chitosan*, literatur juga menunjukkan bahwa biopolimer dapat dikembangkan menjadi komposit ramah lingkungan untuk penyisihan polutan. Ravindran, Panneerselvan, Palanisami, dan Sathish (2025) meninjau biopolimer dan komposit ramah lingkungan sebagai adsorben untuk penyisihan polutan dari air limbah. Kajian ini memperkuat bahwa pengembangan adsorben tidak hanya menargetkan performa tinggi, tetapi juga mempertimbangkan aspek keberlanjutan material dan dampak lingkungan. Hal ini sejalan dengan tren global yang mengarah pada teknologi pengolahan air yang lebih hijau.

Kasbaji, Mennani, Oubenali, Ait Benhamou, dan Boussetta (2023) membahas polimer adsorptif fungsional berbasis *bio-based* serta aspek implementasi pada kondisi nyata. Kajian tersebut menunjukkan bahwa penelitian polimer *bio-based*tidak hanya berfokus pada sintesis material, tetapi juga mulai mempertimbangkan aspek penerapan dan kesiapan teknologi. Hal ini penting karena pengembangan adsorben polimer perlu diarahkan pada kondisi yang lebih realistis, termasuk pengaruh matriks air limbah yang kompleks, kompetisi kontaminan, serta kebutuhan regenerasi material.

Perkembangan material *bio-based* juga terlihat pada pengembangan nanokomposit dan material mikroba. Nidhi, Aparna, Sinha, Holla, dan Selvaraj (2025) meninjau kemajuan pemanfaatan polimer mikroba untuk nanokomposit ramah lingkungan dalam remediasi limbah farmasi. Polimer mikroba menawarkan potensi baru karena dapat diproduksi melalui proses biologis dan memiliki sifat yang dapat disesuaikan melalui rekayasa material. Pengembangan nanokomposit berbasis polimer mikroba menunjukkan bahwa riset *bio-based* tidak lagi terbatas pada biopolimer konvensional, tetapi berkembang menuju material baru yang lebih inovatif.

Dalam material selektif, Savigni, Girometti, Sisti, Benstoem, Pinelli, dan Frascari (2025) mengembangkan *molecularly imprinted polymers* (*MIP*) berbasis monomer *bio-based* untuk mengadsorpsi karbamazepin dari air limbah. Pendekatan ini sangat penting karena residu farmasi sering berada dalam campuran kompleks dan pada konsentrasi rendah. Dengan adanya adsorben selektif seperti *MIP*, proses adsorpsi dapat diarahkan untuk menargetkan senyawa tertentu secara lebih efektif. Ini menunjukkan bahwa polimer *bio-based* tidak hanya berfungsi sebagai material berkelanjutan, tetapi juga dapat dikembangkan menjadi adsorben canggih dengan selektivitas tinggi.

Pengembangan material *bio-based* juga dapat dikaitkan dengan penggunaan material berbasis karbon dari biomassa seperti *biochar*. Nguyen, Luu, dan Chang-chien (2025) meninjau adsorben turunan *biochar* untuk remediasi antibiotik, yang menunjukkan bahwa biomassa dapat diubah menjadi material adsorben berperforma tinggi. Ketika dikombinasikan dengan polimer atau dimodifikasi, *biochar* dapat berperan sebagai komponen komposit yang meningkatkan luas permukaan dan kemampuan adsorpsi. Bahadorikhalili, Sharifianjazi, Azimpour, Bashi, dan Abuchenari (2022) juga menekankan peran komposit berbasis karbon dalam penyisihan komponen farmasi, sehingga memperlihatkan bahwa material karbon berbasis biomassa dapat menjadi bagian penting dari strategi adsorpsi berkelanjutan.

Dalam kerangka yang lebih luas, Otero dan Coimbra (2025) menunjukkan bahwa material polimer memiliki aplikasi yang sangat luas dalam pengolahan air limbah, sehingga pengembangan adsorben *bio-based* dapat diposisikan sebagai bagian dari sistem pengolahan yang lebih besar. Dengan demikian, polimer *bio-based* bukan hanya alternatif "hijau", tetapi dapat menjadi solusi material yang strategis untuk menghadapi kompleksitas residu farmasi di air limbah.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa pengembangan adsorben polimer *bio-based* berkembang dalam beberapa arah utama, yaitu penggunaan biopolimer konvensional seperti *chitosan*, pengembangan komposit ramah lingkungan, pemanfaatan polimer mikroba untuk nanokomposit, serta pengembangan adsorben selektif seperti *MIP*. Keempat arah tersebut menunjukkan bahwa penelitian *bio-based* tidak hanya bertujuan menggantikan material sintetik, tetapi juga berupaya menciptakan adsorben baru yang lebih efektif, selektif, dan sesuai dengan kebutuhan pengolahan air limbah masa depan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menemukan bahwa adsorpsi menggunakan polimer sintetik dan bio-based menjadi pendekatan dominan dalam penyisihan residu farmasi dari air limbah, dengan tema utama adsorption, wastewater treatment, dan sustainable materials yang terbentuk jelas pada peta bibliometrik VOSviewer dari dataset 100 publikasi. Sintesis 20 artikel SLR menegaskan keunggulan polimer sintetik pada stabilitas dan rekayasa selektif seperti komposit karbon serta MIP, sementara polimer bio-based seperti chitosan unggul dalam keberlanjutan dan biodegradabilitas melalui modifikasi komposit serta aplikasi multifungsi. Tren overlay visualization 2021-2025 menunjukkan pergeseran ke material ramah lingkungan dan fokus spesifik pada pharmaceuticals, dengan density visualization mengonfirmasi kepadatan tinggi pada chitosan dan sustainable materials sebagai peluang inovasi.

Meskipun demikian, keterbatasan penelitian mencakup pembatasan dataset 100 publikasi akibat akses PoP serta fokus eksklusif pada Scopus, Google Scholar, dan ScienceDirect yang mungkin melewatkan publikasi non-Inggris atau grey literature, ditambah absennya meta-analisis kuantitatif performa adsorben akibat heterogenitas data. Saran untuk riset lanjutan meliputi pengujian empiris adsorben hibrida pada air limbah nyata, evaluasi siklus hidup material, serta perluasan ke database global untuk validasi bibliometrik. Secara praktis, temuan ini merekomendasikan adopsi chitosan-komposit sebagai polishing step di IPAL rumah sakit serta kebijakan pengembangan adsorben lokal berbasis biomassa untuk mendukung pengolahan air berkelanjutan di Indonesia.

REFERENCES

Alam, A. (2025). Natural polymer-based bioadsorbents for wastewater treatment. *Sustainability, 17*(4), 2150. https://doi.org/10.3390/su17042150

Alkhaldi, H., Alharthi, S., Alharthi, S., Alghamdi, H. A., Boraie, W. E., & Attia, M. S. (2024). Sustainable polymeric adsorbents for adsorption-based water remediation and pathogen deactivation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 12*(1), 109856. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109856

Bahadorikhalili, S., Sharifianjazi, F., Azimpour, M., Bashi, N. M., & Abuchenari, A. (2022). Carbon-based composites for removal of pharmaceutical components from water. *Journal of Water Process Engineering, 49*, 102945. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102945

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.

El-monaem, E. M. A., Eltawell, A. S., & Meshinski, H. M. (2022). Sustainable adsorptive removal of antibiotic residues by chitosan composites: An insight into current developments and future recommendations. *Carbohydrate Polymers, 291*, 119566. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119566

Elgarahy, A. M., & Eloffy, M. G. (2023). Use of biopolymers in wastewater treatment: A brief review of current trends and prospects. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 20*, 100810. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100810

Emzir. (2021). *Metodologi penelitian pendidikan: Kuantitatif dan kualitatif* (Ed. revisi). Rajawali Pers.

Kasbaji, M., Mennani, M., Oubenali, M., Ait Benhamou, A., & Boussetta, A. (2023). Bio-based functionalized adsorptive polymers for sustainable water decontamination: A systematic review of challenges and real-world implementation. *Journal of Cleaner Production, 389*, 136193. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136193

Kolya, H. (2023). Bio-based polymeric flocculants and adsorbents for wastewater treatment. *Water Environment Research, 95*(6), e10861. https://doi.org/10.1002/wer.10861

Mahdavi, P., & Siol, A. (2025). Adsorption-based removal of pharmaceutical from water: A critical review on adsorbent performance. *Journal of Hazardous Materials, 456*, 131661. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131661

Mansouri, F., Chouchene, K., & Roche, N. (2021). Removal of pharmaceuticals from water by adsorption and advanced oxidation processes: State of the art and trends. *Chemical Engineering Journal, 411*, 128555. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128555

Mousavi, S. M., Hashemi, S. A., Kalashgrani, M. Y., Zare, I., & Rahmanian, V. (2024). Synthetic polymers as antibacterial and antiviral agents. *Polymer Reviews, 64*(1), 1–32. https://doi.org/10.1080/15583724.2023.2259124

Nguyen, V. D., Luu, A., & Chang-chien, G. P. (2025). Progress in biochar derived adsorbents: Preparation, modification strategies, and applications in remediation of antibiotics from wastewater. *Materials Advances, 6*(2), 453–472. https://doi.org/10.1039/D4MA00612H

Nidhi, G., Aparna, J. S., Sinha, A. B., Holla, S. R., & Selvaraj, S. (2025). Recent advances in utilizing microbial polymers for eco-friendly nanocomposites in pharmaceutical waste remediation. *Journal of Environmental Management, 345*, 118801. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.118801

Otero, M., & Coimbra, R. N. (2025). Polymeric materials for wastewater treatment applications. *Current Opinion in Chemical Engineering, 37*, 100848. https://doi.org/10.1016/j.coche.2024.100848

Pamukoğlu, M. Y., & Yoldaş, B. B. (2025). Adsorptive removal of amoxicillin using green-synthesized $SiNH_2$@FeNP nanocomposite: Characterization, optimization, and modeling. *Environmental Technology & Innovation, 29*, 103079. https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103079

Pérez-Lucas, G., & Navarro, S. (2024). How pharmaceutical residues occur, behave, and affect the soil environment. *Science of the Total Environment, 907*, 167847. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167847

Ramakrishnan, R. K., Padil, V. V. T., Cernik, M., & Varma, R. S. (2021). Eco-friendly and economic adsorptive removal of cationic and anionic dyes by bio-based karaya gum–chitosan sponge. *Journal of Cleaner Production, 280*, 124413. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124413

Ravindran, A., Panneerselvan, L., Palanisami, T., & Sathish, C. I. (2025). Eco-friendly biopolymers and composites: A sustainable development of adsorbents for the removal of pollutants from wastewater. *Environmental Research, 247*, 117229. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.117229

Savigni, E., Girometti, E., Sisti, L., Benstoem, F., Pinelli, D., & Frascari, D. (2025). Development and validation of molecularly imprinted polymers with bio-based monomers to adsorb carbamazepine from wastewater. *Water Research, 248*, 120817. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.120817

Shagorova, B., Zhukova, Y., & Il, A. (2025). Adsorbent materials based on modified chitosan for purification of aqueous media from pharmaceutical residues, primarily antibiotics. *International Journal of Biological Macromolecules, 255*, 126702. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.126702

Sudaryono. (2022). *Metodologi penelitian kuantitatif, kualitatif, dan mixed methods* (Ed. revisi). Rajawali Pers.

Sugiyono. (2022). *Metode penelitian pendidikan: Pendekatan kuantitatif, kualitatif, dan R&D* (Ed. revisi). Alfabeta.

Ul, I., Atir, I., Qurashi, N., Adnan, A., Ali, A., Janiad, S., Wang, X., & Ling, S. (2025). Bioremediation and adsorption: Strategies for managing pharmaceutical pollution in aquatic environment. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 13*(1), 109220. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.109220