



Pemisahan, Pengelolaan, Purifikasi Air dan Air Limbah dengan Strategi Nanoteknologi (Nanomaterial): Studi Literatur Kimia

Nur Anis Faudah, Darul Fallah, Nabila Luthfiani Rizqina, Bernadine Ardelia Zimran

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta, 55281
Email: afuadah98@gmail.com, nabilaluthfianirizqina25@gmail.com

Abstrak. Dewasa ini, ketersediaan air bersih terus terancam oleh pencemaran limbah domestik, industri, dan pertanian, sementara sistem konvensional belum mampu mengatasi kompleksitas kontaminan mikro secara efektif. Tantangan ini mendorong pencarian pendekatan baru dalam sistem pemurnian air, termasuk eksplorasi teknologi berbasis material berskala nano. Nanoteknologi menawarkan pendekatan inovatif dan efisien dalam pemisahan serta pemurnian air, melalui penerapan fotokatalisis (TiO_2 , ZnO), adsorpsi nanosorben logam-karbon, dan membran nanokomposit. Teknologi ini terbukti efektif menurunkan polutan seperti BOD, COD, logam berat, dan mikroorganisme, bahkan pada air limbah kompleks. Studi seperti di Sungai Cauvery menunjukkan bahwa penggunaan TiO_2 menghasilkan penurunan signifikan pada BOD (60%), COD (55%), dan TDS, serta peningkatan DO, didukung oleh struktur anatase dan luas permukaan tinggi. Inovasi lain, seperti penggunaan AgNP pada filter keramik dan nanopartikel magnetik termodifikasi polimer, meningkatkan efisiensi dengan kestabilan jangka panjang. Efektivitas pemurnian dipengaruhi oleh ukuran partikel, porositas, dan sifat permukaan material. Kajian ini memperkuat posisi nanoteknologi sebagai solusi adaptif untuk pengelolaan air berkelanjutan, terutama di tengah meningkatnya kompleksitas kontaminan dan kebutuhan akan standar kualitas air yang lebih ketat.

Kata kunci: nanomaterial, pengelolaan, air, nanoteknologi, membran

Abstrak. Dewasa ini, ketersediaan air bersih terus terancam oleh pencemaran limbah domestik, industri, dan pertanian, sementara sistem konvensional belum mampu mengatasi kompleksitas kontaminan mikro secara efektif. Tantangan ini mendorong pencarian pendekatan baru dalam sistem pemurnian air, termasuk eksplorasi teknologi berbasis material berskala nano. Nanoteknologi menawarkan pendekatan inovatif dan efisien dalam pemisahan serta pemurnian air, melalui penerapan fotokatalisis (TiO_2 , ZnO), adsorpsi nanosorben logam-karbon, dan membran nanokomposit. Teknologi ini terbukti efektif menurunkan polutan seperti BOD, COD, logam berat, dan mikroorganisme, bahkan pada air limbah kompleks. Studi seperti di Sungai Cauvery menunjukkan bahwa penggunaan TiO_2 menghasilkan penurunan signifikan pada BOD (60%), COD (55%), dan TDS, serta peningkatan DO, didukung oleh struktur anatase dan luas permukaan tinggi. Inovasi lain, seperti penggunaan AgNP pada filter keramik dan nanopartikel magnetik termodifikasi polimer, meningkatkan efisiensi dengan kestabilan jangka panjang. Efektivitas pemurnian dipengaruhi oleh ukuran partikel, porositas, dan sifat permukaan material. Kajian ini memperkuat posisi nanoteknologi sebagai solusi adaptif untuk pengelolaan air berkelanjutan, terutama di tengah meningkatnya kompleksitas kontaminan dan kebutuhan akan standar kualitas air yang lebih ketat.

Keywords: nanomaterial, management, water, nanotechnology, membrane

This publication is licensed under a



Pendahuluan

Dewasa ini, masalah pencemaran air menjadi topik yang semakin krusial seiring meningkatnya aktivitas domestik, industri, dan pertanian. Dengan aktivitas yang semakin meningkat, beban cemaran polutan terhadap air ikut meningkat yang menyebabkan ketersediaan air bersih dan air layak minum menurun, berkebalikan dengan kebutuhan dari populasi penduduk yang naik tiap tahunnya. Terlebih menurut Sutanto (2017), pasokan air yang aman dikonsumsi manusia secara global hanya sebesar 1%, dengan data dari World Health Organization (WHO) yang menyatakan bahwa pada tahun 2011 terdapat lebih dari 760 juta manusia mengonsumsi air tak layak minum. Selain itu, WHO menyatakan air tercemar bertanggung jawab atas sekitar 80% secara global penyakit yang ditularkan melalui air (Arulnagai et al., 2025), memberikan alasan kuat untuk serius dalam penanganan air tercemar polutan.

Menurut Faradila et al. (2023), polusi limbah adalah perubahan fisik air langsung atau tak langsung yang beracun (berba-

haya), berpotensi menular, atau merusak kemampuan makhluk hidup untuk bertahan hidup. Pencemar air ini dapat mencakup logam berat, mikroorganisme patogen, dan senyawa organik beracun (Kurniadie, 2011; Wulandari et al., 2018). Metode pengelolaan konvensional seperti koagulasi-flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi seringkali belum cukup efektif untuk menyisihkan kontaminan mikro dan polutan persisten dengan efisiensi tinggi (Sholikhah et al., 2014). Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas teknologi pengolahan air berbasis membran, seperti nanofiltrasi dan reverse osmosis, yang menawarkan efisiensi pemisahan tinggi (Sari et al., 2022). Namun, keterbatasan seperti fouling membran, biaya operasional, dan kebutuhan energi tinggi masih menjadi tantangan utama.

Artikel ini bertujuan untuk mengulas secara komprehensif strategi pemisahan, pengelolaan, dan purifikasi air serta air limbah dengan pendekatan nanoteknologi, khususnya penggunaan nanomaterial seperti oksida logam (TiO_2 , ZnO),

karbon nano, dan membran berbasis material nano. Fokus diberikan pada mekanisme kerja, efisiensi pemisahan, serta potensi aplikatifnya dalam sistem pengolahan air yang berkelanjutan.

Penggunaan nanoteknologi dalam pengolahan air dan air limbah terus mengalami perkembangan pesat seiring meningkatnya kebutuhan akan metode yang lebih selektif, efisien, dan ramah lingkungan. Di tengah keterbatasan sistem konvensional dalam menyisihkan polutan berskala mikro dan kompleksitas senyawa kontaminan, pendekatan berbasis nanomaterial mulai memberikan arah baru dalam desain sistem pemisahan. Inovasi seperti pemanfaatan logam oksida berukuran nano, struktur berpori tinggi, hingga integrasi dengan teknik fotokatalitik bukan hanya memperluas cakupan pemurnian, tetapi juga memperbaiki performa proses secara berkelanjutan. Dengan semakin banyaknya temuan eksperimental yang mendukung efektivitas teknologi ini, terbuka ruang untuk memetakan peluang dan hambatan implementasinya secara lebih menyeluruh dalam skema pengelolaan air modern.

Metode Penelitian

Kajian ini dilakukan dengan pendekatan tinjauan literatur sistematis terhadap publikasi akademik yang mengupas tentang penggunaan nanomaterial dalam pengolahan air serta air limbah. Prosedur pencarian referensi dilakukan dengan mengeksplorasi berbagai database ilmiah seperti ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, PubMed, dan Google Scholar menggunakan istilah pencarian: "nanomaterial untuk pengolahan air", "pemurnian air fotokatalitik", "partikel TiO₂/ZnO untuk pengelolaan air limbah", dan "teknik pemisahan berbasis nano".

Kriteria inklusi yang diterapkan mencakup (1) publikasi yang dirilis antara tahun 2015 sampai 2025, (2) artikel penelitian atau tinjauan yang ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia, (3) kajian mengenai teknologi pemisahan dan pemurnian air yang berbasis nanomaterial, serta (4) menyampaikan data atau diskusi mengenai efisiensi, cara kerja, serta tantangan aplikasinya. Artikel yang berfokus pada pengolahan air limbah dari sektor medis, pertanian, atau industri tekstil juga turut diperhitungkan untuk menambah konteks aplikasi.

Setelah mengadakan penyaringan awal, sejumlah ±40 artikel yang sesuai dengan kriteria dianalisis secara mendalam untuk dikelompokkan berdasarkan jenis nanomaterial yang digunakan (contohnya TiO₂, ZnO, nano-silika, karbon nano), metode pemisahan yang digunakan (fotokatalisis, adsorpsi, membran), serta konteks penggunaannya (skala laboratorium vs. aplikasi dunia nyata). Analisis dilakukan dengan pendekatan naratif-komparatif untuk menonjolkan pola temuan, kekurangan penelitian, dan peluang perkembangan teknologi di masa mendatang.

Bagaimana Nanomaterial Berperan dalam Proses Pengolahan Limbah

Choerudin (2016) dalam penelitiannya menyebutkan beberapa metode nanomaterial dalam proses pengolahan limbah.

1. Adsorpsi dan Pemisahan

Proses penyerap dan pemisahan menggunakan membran adalah teknologi yang paling umum diterapkan. Kelemahan dari adsorben tradisional adalah kapasitas dan selektivitas adsorpsi yang rendah. Di sisi lain, adsorben yang terbuat dari nanomaterial memiliki kelebihan, seperti luas permukaan spesifik yang besar, reaktivitas tinggi, serta kinetika dan afinitas yang kuat terhadap berbagai jenis kontaminan. Efektivitas penyerapan nanomaterial kadang-kadang jauh lebih tinggi daripada adsorben tradisional.

2. Filtrasi Berbasis Membran

Membran adalah lapisan semipermeabel yang memisahkan dua fase, dengan pemisahan berdasarkan tekanan, konsentrasi, potensial listrik, atau suhu. Teknologi membran dapat berdiri sendiri atau dikombinasikan dengan proses lain, dan kini banyak digunakan di berbagai industri sebagai alternatif metode konvensional. Meski mampu menghasilkan produk berkualitas tinggi, kinerja membran sangat bergantung pada pra-perawatan dan menghadapi tantangan seperti kompromi antara selektivitas dan permeabilitas serta fouling yang meningkatkan biaya dan menurunkan umur pakai. Untuk mengatasinya, nanomaterial ditambahkan ke membran, sehingga meningkatkan sifat fisikokimia seperti ketahanan panas dan mekanik, porositas, hidrofilisitas, serta memberikan keunggulan tambahan seperti permeabilitas tinggi, antimikroba, adsorpsi, dan fotokatalisis.

3. Oksidasi Katalis

Oksidasi dengan bantuan katalis atau fotokatalisis merupakan metode canggih dalam membersihkan pencemar. Metode ini dapat dimanfaatkan sebagai langkah awal untuk meningkatkan kemampuan biodegradabilitas atau pada fase akhir untuk mengatasi pencemar yang sulit terurai. Nanokatalis yang memiliki rasio luas permukaan dan volume yang tinggi menunjukkan peningkatan efisiensi dalam proses oksidasi. Karakteristik seperti band gap, struktur kristal, potensi redoks, dan distribusi muatan berubah-ubah tergantung pada perbedaan ukuran.

4. Desinfeksi

Desinfeksi adalah langkah terakhir dalam proses pengolahan air. Meskipun begitu, langkah ini sangat penting karena berhubungan dengan kualitas air. Desinfektan yang ideal seharusnya memiliki: jangkauan antimikroba yang luas serta waktu yang cepat; tidak menghasilkan produk sampingan yang berbahaya; tingkat toksisitas yang rendah terhadap kesehatan dan lingkungan; kebutuhan energi yang sedikit dan mudah dalam penggunaannya; dapat disimpan dengan baik dan tidak bersifat korosif; serta dapat dibuang dengan aman. Nanomaterial telah terbukti memiliki sifat antimikroba. Nanomaterial ini membunuh mikroba dengan cara melepaskan ion logam yang beracun, merusak membran sel melalui kontak langsung, atau menghasilkan radikal oksigen yang reaktif. Desinfektan berbasis nanomaterial mengurangi pembentukan produk sampingan dari desinfeksi (DBP). Selain itu, desinfektan nanomaterial dapat dioperasikan secara berkelanjutan.

5. Penginderaan

Saat ini, teknik penginderaan dan pemantauan tidak dapat mengenali konsentrasi rendah dari polutan mikro dalam suatu badan air. Deteksi yang cepat dan langsung terhadap bakteri patogen serta polutan berbahaya merupakan kemajuan penting dalam situasi darurat. Nanomaterial dengan karakter elektrokimia, optik, atau magnetik yang khas dapat digunakan sebagai elektroda atau sensor untuk mendeteksi secara selektif konsentrasi polutan dalam jumlah sangat kecil. Beberapa nanomaterial dapat memperkuat respons spektroskopi hingga berkali-kali lipat.

Hasil dan Pembahasan

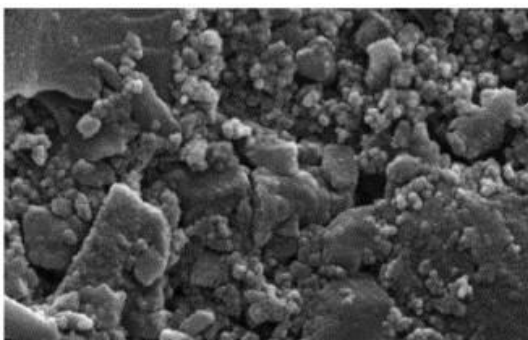
Nanofiltrasi Membran

Penelitian oleh Setiawan et al. (2025) ini meneliti secara komprehensif fungsi nanoteknologi, khususnya dalam hal nanofiltrasi membran, dalam pengelolaan serta pemisahan air bersih untuk kebutuhan rumah tangga. Dalam konteks masalah krisis air bersih yang terjadi di seluruh dunia, nanofiltrasi diusulkan sebagai solusi berkelanjutan yang dapat menyaring partikel-partikel mikroskopis dan kontaminan berbahaya dengan tingkat efisiensi yang tinggi serta penggunaan energi yang relatif rendah jika dibandingkan dengan metode tradisional seperti reverse osmosis.

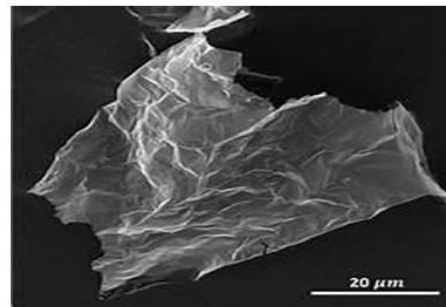
Dalam pendekatan metodologis, penelitian ini disajikan dalam bentuk analisis deskriptif berbasis literatur, yang menggambarkan struktur membran, cara kerja, jenis nanomaterial, serta aplikasi nyata dalam pengolahan air. Proses pemisahan yang terjadi pada nanofiltrasi dijelaskan melalui mekanisme tekanan hidrolik dan pemilihan ukuran pori membran yang berada pada rentang 1–10 nanometer, yang memungkinkan untuk menyaring bakteri, virus, ion divalen, dan molekul organik yang kompleks tanpa mengganggu ion bermanfaat seperti Na⁺ dan K⁺.

Jenis-jenis nanomaterial yang sedang dianalisis meliputi:

1. **Nanopartikel karbon (karbon aktif dan graphene)** yang terkenal karena area permukaan yang luas dan kemampuan dalam adsorpsi molekul organik.

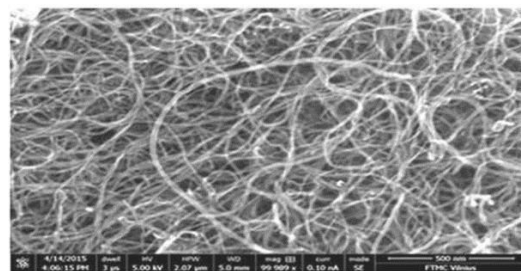


Gambar 1. Grafik Fotodegradasi Variasi pH



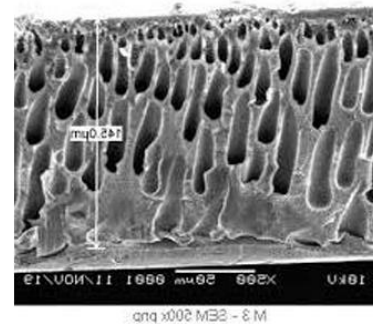
Gambar 2. Grafik Fotodegradasi Variasi pH

2. **Carbon nanotubes (CNTs)** – berperan dalam pembersihan air berkat struktur tubular yang selektif serta konduktivitas yang tinggi.



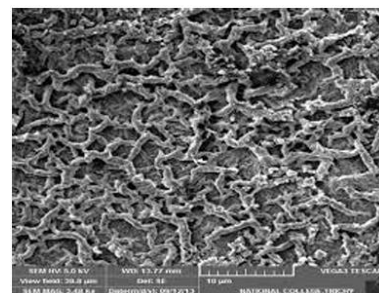
Gambar 3. Grafik Fotodegradasi Variasi pH

3. **Polimer nanokomposit** – sebagai perpaduan antara polimer utama (contohnya poliamida, polipropilen) dengan nanopartikel (misalnya SiO₂, TiO₂) untuk meningkatkan kemampuan selektif, sifat anti-kerak, dan daya tahan mekanik.

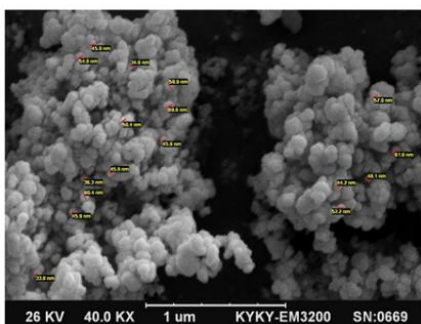


Gambar 4. Grafik Fotodegradasi Variasi pH

4. **Oksida logam seperti ZnO dan TiO₂** – diaplikasikan karena karakter antibakteri dan fotokatalitik yang dimiliki.

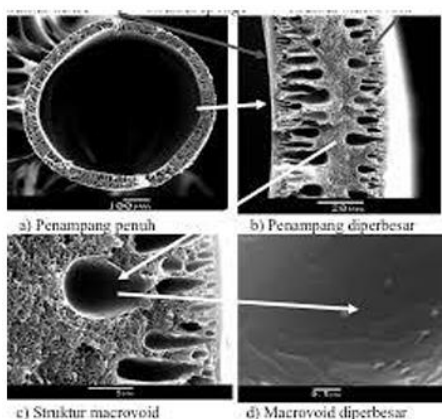


Gambar 5. Hasil SEM ZnO



Gambar 6. Hasil SEM TiO₂

5. Nanomaterial yang berbasis selulosa, silika, keramik, dan polietilen – berfokus pada stabilitas, permeabilitas, dan efisiensi penyaringan dalam beragam kondisi air limbah.



Gambar 7. Hasil SEM membran berbasis selulosa dan derivatifnya

Hasil dari penerapan teknologi ini menunjukkan bahwa proses nanofiltrasi sangat ampuh dalam menghapus logam berat (seperti Pb dan Hg), ion penyebab kekerasan (Ca²⁺ dan Mg²⁺), senyawa organik yang termasuk pestisida dan fenol, serta mikroba patogen. Aplikasi nyata dari teknik ini dapat dilihat dalam studi kasus instalasi air minum di Jawa Timur, di mana sistem nanofiltrasi berhasil mengurangi TDS secara signifikan dengan konsumsi energi yang rendah, serta diaplikasikan untuk proses desalinasi air laut dan pengolahan air permukaan.

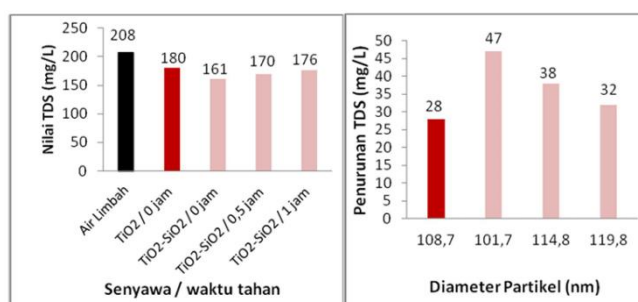
Secara keseluruhan, tulisan ini menekankan bahwa nanofiltrasi membran tidak hanya menawarkan performa teknis yang hebat, tetapi juga mendukung upaya penghematan air dan pelaksanaan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG 6). Meskipun tantangan seperti pengotoran, biaya membran, dan kebutuhan pra-perlakuan masih menjadi perhatian, inovasi dalam material nano menjanjikan prospek yang kuat bagi peningkatan efisiensi dan perluasan penggunaan teknologi ini di tingkat masyarakat luas.

Fotokatalis dari Nanopartikel TiO₂ – SiO₂ Penjernihan Air Limbah

Penelitian oleh Wulandari et al. (2018) ini mengeksplorasi penggunaan nanopartikel berpori TiO₂-SiO₂ sebagai fotokatalis untuk mengatasi masalah limbah rumah tangga, dengan

pendekatan eksperimental yang menekankan keterkaitan antara struktur partikel dan hasil pemisahan.

Proses sintesis dilakukan melalui metode pemanasan sederhana menggunakan larutan polimer PEG 6000, di mana gabungan TiO₂, SiO₂, dan PEG dipanaskan pada suhu 400 °C dengan waktu tahan yang bervariasi 0, 0,5, dan 1 jam. Proses tersebut menghasilkan partikel dengan morfologi berpori dan ukuran yang berbeda, diidentifikasi melalui karakterisasi SEM dan XRD. Ukuran kristalnya tetap stabil sekitar 53 nm, sedangkan diameter partikelnya mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu tahan, dari 101,7 nm hingga 119,8 nm. Data XRD menunjukkan struktur anatase yang terus stabil, sementara penambahan SiO₂ mengakibatkan aglomerasi yang ringan, tetapi tidak mempengaruhi ukuran kristal, dengan SiO₂ berfungsi sebagai penyangga, bukan pencampur.



Gambar 8. (a) Grafik nilai TDS dan (b) Grafik korelasi diameter partikel dengan penurunan TDS

Pengujian performa fotokatalitik dilakukan pada air limbah rumah tangga di bawah sinar matahari selama 6 jam. Hasil pengujian mengungkapkan bahwa nanopartikel TiO₂-SiO₂ paling efektif dalam menurunkan pH dari 8,8 menjadi 7,5 dan TDS dari 208 mg/L menjadi 161 mg/L pada sampel yang memiliki waktu tahan 0 jam, dengan partikel terkecil. Efektivitas pemurnian dipengaruhi oleh luas permukaan yang lebih besar serta peningkatan aktivitas adsorptif seiring mengecilnya ukuran partikel. Jika dibandingkan dengan TiO₂ murni, komposit TiO₂-SiO₂ menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam menurunkan parameter kualitas air, mencerminkan sinergi positif antara keduanya dalam reaksi fotokatalitik.

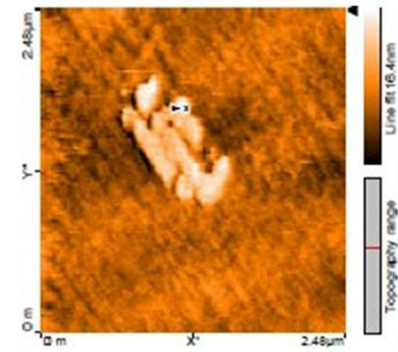
Penelitian ini menguatkan bahwa karakter mikrostruktur dari nanomaterial memiliki peran penting dalam efisiensi proses pemurnian air, dan modifikasi komposit seperti tambahan silika dapat meningkatkan aktivitas permukaan serta menstabilkan kinerja material. Penggunaan pendekatan sintesis yang sederhana dan ramah lingkungan juga menunjukkan potensi aplikatif dalam konteks rumah tangga maupun komunitas.

Nanomaterial TiO₂ sebagai Agen Fotokatalitik

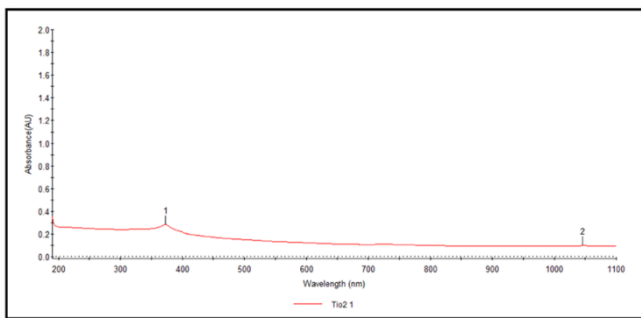
Penelitian oleh Arulnangai et al. (2025) menganalisis tentang keefektifan nanopartikel TiO₂ sebagai agen fotokatalitik dalam meningkatkan kualitas air di Sungai Cauvery, yang terletak di Distrik Tiruchirappalli, India, dengan menggunakan pendekatan yang bersifat eksperimental dan statistik multivariat. Penelitian ini menggambarkan penggabungan antara karakterisasi nanomaterial, proses fotokatalitik, dan evaluasi kualitas air

sebagai pendekatan terpadu untuk pemulihan lingkungan perairan.

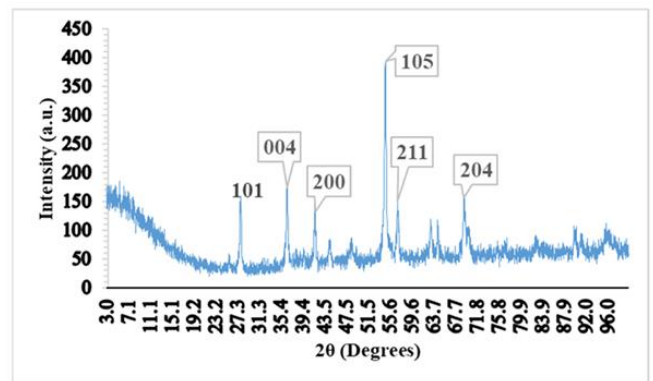
Metodologi yang diterapkan melibatkan pengambilan sampel air dari 20 lokasi pengamatan selama periode kemarau, dilanjutkan dengan analisis terhadap parameter fisikokimia seperti pH, EC, TDS, BOD, COD, dan DO. Karakterisasi TiO₂ dilakukan secara mendalam menggunakan teknik seperti DLS, FTIR, UV-Vis, SEM, AFM, XRD, XPS, dan BET untuk memastikan struktur anatase, dimensi partikel, luas permukaan, serta stabilitas dispersi. Proses fotokatalitik dilaksanakan dalam reaktor kuarsa dengan pencahayaan UV pada 365 nm, menggunakan dosis TiO₂ sebesar 0,5 g/L dan pH netral, sambil melakukan pengambilan sampel secara berkala selama maksimal 120 menit.



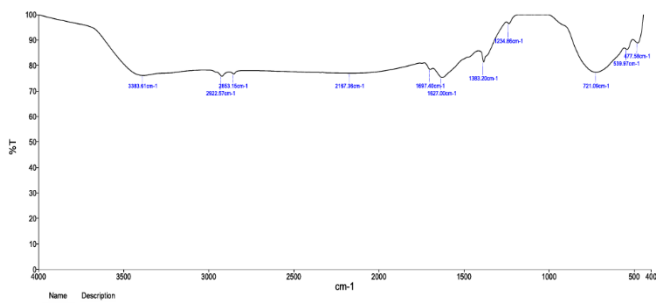
Gambar 12. AFM nanopartikel TiO₂



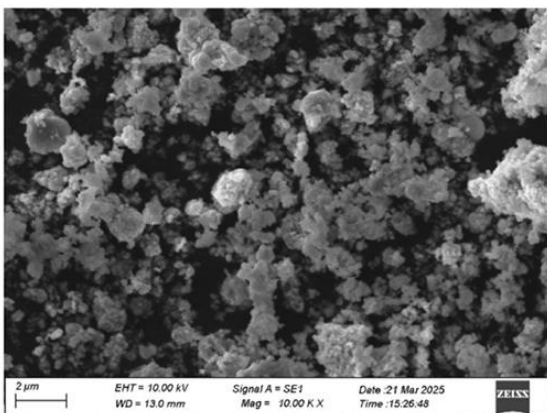
Gambar 9. Spektrum FT-IR nanopartikel TiO₂



Gambar 13. Pola P-XRD nanopartikel TiO₂



Gambar 10. Spektrum UV-Vis nanopartikel TiO₂



Gambar 11. Fe-SEM nanopartikel TiO₂

Temuan menunjukkan bahwa penerapan TiO₂ secara signifikan mengurangi EC (32%), TDS (40%), BOD (60%), dan COD (55%), serta meningkatkan kadar DO sebesar 45%. Efisiensi ini berkaitan dengan luas permukaan spesifik yang tinggi (50–200 m²/g), struktur mesopori (2–10 nm), dan kemampuan untuk membentuk radikal hidroksil dan superoksida yang aktif dalam proses degradasi bahan pencemar organik. Analisis kinetika mengindikasikan bahwa reaksi ini mengikuti model orde satu semu, dengan konstanta kecepatan yang bervariasi sesuai dengan jenis polutan yang ada.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa nanopartikel TiO₂ dalam bentuk anatase memiliki potensi besar sebagai fotokatalis untuk pemurnian air sungai yang tercemar, terutama mengingat tingginya beban organik yang disebabkan oleh limbah dari aktivitas domestik dan industri. Pendekatan ini juga menunjukkan keuntungan tambahan melalui penggabungan teknik statistik (PCA dan FA) untuk mengidentifikasi sumber pencemaran serta mengevaluasi efektivitas proses pemulihan, menjadikannya model yang relevan untuk pengelolaan air dengan teknologi nanoteknologi di daerah tropis.

Nanopartikel Logam Bervalensi Nol

1. Nanopartikel Perak

Menurut Kallman et al. (2011), nanopartikel perak (NP Ag) merupakan agen antimikroba yang efektif terhadap berbagai mikroorganisme seperti virus, bakteri, dan jamur, sehingga digunakan untuk desinfeksi air. Meski mekanismenya belum sepenuhnya dipahami, beberapa teori menyebutkan bahwa NP Ag dapat:

- Menempel dan menembus dinding sel bakteri
- Menghasilkan radikal bebas yang merusak membran sel
- Berinteraksi dengan unsur S dan P dalam DNA,
- Melepaskan ion Ag^+ yang menonaktifkan enzim penting.

Sering kemajuan nanoteknologi, NP Ag telah berhasil diterapkan dalam pengolahan air. Beberapa metode penggunaannya meliputi:

- Penggunaan langsung, meski beresiko membentuk endapan yang menurunkan efektivitas jangka panjang.
- Penyematan pada filter, memberikan efisiensi tinggi dengan biaya rendah.
- Deposisi pada serat selulosa atau membran PES, menghasilkan media antibakteri yang memenuhi standar WHO dan EPA.
- Integrasi dalam keramik, di mana kombinasi dengan tanah liat, serbuk kayu, dan bahan lain terbukti mampu menyisihkan *E.Coli* hingga 97–100%, terutama pada filter berpori besar.

2. Nanopartikel Besi

Dalam beberapa tahun terakhir, nanopartikel logam bervalensi nol (nZV) seperti Al, Zn, Fe, dan Ni banyak diteliti untuk pengolahan air. nZV Al sangat reaktif namun tidak stabil di air karena membentuk oksida yang menghambat transfer elektron. Dibandingkan Fe, Ni memiliki kemampuan reduksi lebih rendah. Sementara itu, Fe dan Zn memiliki potensi reduksi sedang dan efektif untuk mengolah kontaminan redoks-sensitif. Fe lebih unggul karena kemampuan adsorpsi, presipitasi, dan oksidasi yang baik serta biaya rendah, menjadikan nZVI (nano zero-valent iron) sebagai yang paling banyak diteliti.

Ukuran nano nZVI memberikan luas permukaan besar, memperkuat adsorpsi dan reaktivitas. Dalam kondisi anaerob, Fe^0 bereaksi menghasilkan Fe^{2+} dan H_2 sebagai agen reduksi, yang selanjutnya membentuk flokulan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ untuk menghilangkan kontaminan seperti Cr(VI). nZVI juga dapat menghasilkan H_2O_2 dan, melalui reaksi Fenton, membentuk radikal hidroksil ($\text{HO}\cdot$) yang sangat efektif dalam mengoksidasi senyawa organik.

Berkat sifat adsorptif, reduktif, presipitatif, dan oksidatifnya, nZVI telah diterapkan untuk menghilangkan berbagai kontaminan seperti senyawa organik terhalogenasi, logam berat, anion anorganik, dan radioaktif, baik pada skala pilot maupun penuh. Namun, nZVI memiliki kendala seperti agregasi, oksidasi, dan sulit dipisahkan dari air olahan. Untuk itu, dilakukan modifikasi, seperti:

- doping logam untuk peningkatan reaktivitas,
- pelapisan permukaan untuk mencegah agregasi,
- konjugasi dengan dukungan untuk meningkatkan dispersi dan pemisahan,
- enkapsulasi dalam matriks, dan
- emulsi untuk pengantaran dalam sistem DNAPL.

3. Nanopartikel Seng

Berdasarkan Bokare et al. (2013), nanopartikel logam dengan keadaan valensi nol Zn (nano zero valent zinc, nZVZ) dianggap sebagai pilihan alternatif. Dengan nilai reduksi standar

yang lebih negatif dibandingkan Fe, Zn berfungsi sebagai reduktor yang lebih efektif daripada Fe. Akibatnya, nZVZ mungkin memiliki kecepatan degradasi kontaminan yang lebih tinggi daripada nZVI. Dalam penggunaan nZVZ, sebagian besar penelitian difokuskan pada reaksi dehalogenasi. Penelitian menunjukkan bahwa ukuran partikel atau morfologi permukaan tidak terlalu memengaruhi tingkat pengurangan CCl_4 oleh nZVZ. Dengan membandingkan reaktivitas berbagai tipe nZVI dan nZVZ, ditemukan bahwa nZVZ dapat mendegradasi CCl_4 dengan lebih cepat di bawah kondisi yang baik. Selain itu, penelitian juga telah dilakukan untuk mengevaluasi degradasi octachlorodibenzo-p-dioxin (OCDD) dalam air dengan menggunakan empat jenis nanopartikel logam valensi nol yang berbeda: zinc valensi nol (nZVZ), besi (nZVI), aluminium (nZVAL), dan nikel (nZVN). Berdasarkan hasil eksperimen tersebut, hanya nZVZ yang menunjukkan kemampuan untuk mereduksi OCDD (ini adalah laporan pertama yang menyatakan bahwa nanopartikel logam valensi nol cocok untuk deklorinasi OCDD pada kondisi ruangan). Namun, meskipun beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa nZVZ dapat berhasil dalam mengurangi kontaminan, penerapannya masih terbatas pada degradasi senyawa organik terhalogenasi, terutama CCl_4 . Pengolahan jenis kontaminan lainnya dengan nZVZ belum banyak dilaporkan hingga saat ini. Dengan demikian, penggunaan nZVZ dalam skala pilot atau skala penuh masih belum tercapai.

Nanomaterial Oksida Logam

1. Nanopartikel TiO_2

Menurut Kangwansupamonkon et al. (2010), dalam beberapa tahun belakangan, teknologi degradasi fotokatalitik telah berhasil digunakan untuk pengolahan air dan limbah. Ketika terdapat cahaya dan katalis, bahan pencemar dapat diubah secara bertahap menjadi produk antara dengan berat molekul rendah dan akhirnya bertransformasi menjadi CO_2 , H_2O , serta anion seperti NO_3^- , PO_4^{3-} , dan Cl^- . Fotokatalis yang sering dipakai adalah oksida logam atau sulfida semikonduktor, termasuk TiO_2 yang telah banyak diteliti dalam dekade terakhir. TiO_2 dianggap yang paling unggul saat ini karena beberapa alasan, seperti aktivitas fotokatalitik yang tinggi, harga terjangkau, fotostabilitas, dan stabilitas kimia serta biologis yang tinggi. TiO_2 akan menghasilkan spesies oksigen reaktif yang dapat menurunkan kontaminan dalam waktu reaksi yang sangat singkat. Selain itu, nanopartikel TiO_2 memiliki selektivitas rendah, sehingga efektif untuk menguraikan berbagai jenis kontaminan, seperti senyawa klor organik, hidrokarbon aromatik polisiklik, pewarna, fenol, pestisida, arsenik, sianida, serta logam berbahaya. Lebih lanjut, radikal hidroksil yang dihasilkan saat terpapar sinar UV. Sebuah tinjauan rinci tentang nanokomposit TiO_2 membran polimer telah disajikan. Baru-baru ini, TiO_2 yang didoping menggunakan nanopartikel magnetik disintesis dalam reaktor piringan berputar (rotary disk reactor, RDR). Dengan perlakuan tersebut nanopartikel dapat diperangkap oleh magnet. Proses produksi tersebut kontinyu dan dengan demikian cocok untuk aplikasi di industri.

2. Nanopartikel ZnO

Selain TiO₂, nanopartikel ZnO (NP ZnO) juga menjadi fotokatalis yang efektif dalam pengolahan air dan limbah karena memiliki celah pita langsung di spektrum UV, kemampuan oksidasi tinggi, dan karakter fotokatalitik yang baik. NP ZnO ramah lingkungan, memiliki performa setara TiO₂, namun lebih murah dan mampu menyerap spektrum cahaya matahari yang lebih luas.

Namun, seperti TiO₂, NP ZnO hanya aktif di cahaya UV karena celah pita yang besar, dan kinerjanya terhambat oleh fotokorosi yang mempercepat rekombinasi muatan, menurunkan efisiensi. Untuk mengatasinya, strategi umum yang digunakan adalah doping logam (anionik, kationik, unsur langka, atau ko-dopan) dan penggabungan dengan semikonduktor lain seperti CdO, CeO₂, SnO₂, TiO₂, GO, dan RGO untuk meningkatkan efektivitas fotodegradasinya (Behnajady et al., 2006; Tratnyek et al., 2010).

3. Nanopartikel Besi Oksida

Minat terhadap penggunaan nanopartikel oksida besi untuk menghilangkan logam berat semakin meningkat karena kemudahan penggunaan dan ketersediaannya di alam. Magnetit (Fe₃O₄) dan maghemite (γ -Fe₂O₄) bersifat magnetik dan mudah dipisahkan dari air menggunakan medan magnet, sedangkan hematit (α -Fe₂O₃) non-magnetik namun tetap efektif sebagai adsorben.

Untuk meningkatkan efektivitas adsorpsi dan menghindari gangguan ion lain, nanopartikel ini dimodifikasi dengan ligan dan polimer. Ligan fleksibel memungkinkan penambahan gugus fungsional tanpa mengubah sifat dasar Fe₃O₄, sementara polimer mencegah aglomerasi dan meningkatkan kestabilan dispersi serta berfungsi sebagai pengangkut ion logam.

Hematit dianggap stabil dan ekonomis, serta terbukti efektif dalam menyerap logam berat seperti As (V) dan Cr (VI). Bentuk nanohematit tiga dimensi mirip bunga meningkatkan luas permukaan dan menyediakan lebih banyak situs aktif untuk interaksi dengan kontaminan, menjadikannya lebih unggul dibanding nanomaterial lain (Ge et al., 2012; Khaydarov et al., 2010; Lee et al., 2016).

Karbon Nanotub (CNTs)

Karbon nanomaterial (CNM) menarik perhatian luas karena struktur dan sifat listriknya yang unik, terutama dalam aplikasi penyerapan kontaminan air dan limbah. Berdasarkan Daneshvar et al. (2004), keunggulan CNM meliputi kemampuan adsorpsi tinggi, kinetika cepat, luas permukaan besar, dan selektivitas terhadap senyawa aromatik.

Jenis-jenis CNM meliputi karbon nanotube (CNT), butiran karbon, serat karbon, dan karbon nanopori. Di antaranya, CNT adalah yang paling menonjol. CNT merupakan lembaran graphene yang digulung membentuk silinder berdiameter sekitar 1 nm, dengan struktur berpori dan luas permukaan besar yang memberikan efisiensi tinggi dalam menyerap berbagai kontaminan seperti logam berat dan senyawa organik.

CNT terbagi menjadi dua jenis: (1) SWCNT (single-walled) dengan satu lapisan graphene, dan (2) MWCNT (multi-walled) dengan beberapa lapisan silinder konsentris. Keduanya telah

banyak digunakan dalam pengolahan air karena efektivitasnya dalam menghilangkan berbagai polutan.

CNT dapat mengikat elektron yang berasal dari material fotokatalis sehingga bertindak sebagai penangkap elektron yang mencegah rekombinasi pasangan (e⁻/H⁺). Untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi serta sifat mekanik, optik, dan listrik, karbon nanotub sering kali dipadukan dengan logam atau jenis dukungan lainnya. Proses fungsionalisasi ini meningkatkan jumlah oksigen, nitrogen, atau kelompok lainnya pada permukaan CNT, yang berujung pada peningkatan disipasi dan luas permukaan spesifik. Sebagai ilustrasi, telah dilakukan penelitian yang memanfaatkan CNT sebagai dukungan untuk oksida besi magnet. Dengan menggabungkan kemampuan adsorpsi CNT dan sifat magnetik dari oksida besi, sebuah "komposit" adsorben dapat dibuat untuk menghilangkan kromium dari air. Meskipun memiliki kemampuan adsorpsi yang sangat baik, "komposit" adsorben ini bisa dengan mudah dipisahkan dari air dengan menggunakan medan magnet eksternal. Namun, pengembangan dan pemanfaatan CNT masih terhambat oleh rendahnya volume produksi dan tingginya biaya. Di samping itu, CNT tidak dapat digunakan secara mandiri tanpa dukungan media atau matriks untuk membentuk struktur komponen.

Nanokomposit

Setiap nanomaterial memiliki kekurangan, seperti nZVI yang mudah teroksidasi dan sulit dipisahkan, TiO₂ dan ZnO yang hanya aktif di sinar UV, membran nanofiltrasi yang rentan fouling, serta CNT yang mahal dan terbatas produksinya. Untuk mengatasi keterbatasan ini dan meningkatkan efisiensi pengolahan air dan limbah, dikembangkanlah nanokomposit.

Nanokomposit menggabungkan keunggulan masing-masing material. Contohnya, nZVI yang dideposisikan pada CNT menghasilkan adsorben baru yang efektif menyerap nitrat dan mudah dipisahkan secara magnetik. Nanokomposit TiO₂-CNT (TiNT/CNT) juga meningkatkan performa fotokatalis melalui penyimpanan elektron, modifikasi band gap, dan penyerapan sinar tampak.

Fotokatalis titania sendiri memiliki keterbatasan, seperti rekombinasi muatan dan respons rendah terhadap cahaya tampak. Dengan karakteristik unik CNT, pembentukan komposit TiO₂-CNT menjadi solusi efektif. Secara teoritis, nanokomposit ideal untuk aplikasi jangka panjang karena bersifat stabil, tidak beracun, dan ekonomis. Penelitian lanjutan tetap diperlukan untuk mengoptimalkan performa dan komposisinya, di mana komposit dengan 70% TiO₂ dan 30% CNT menunjukkan kinerja tertinggi.

Membran Berbasis Nanomaterial dengan Efisiensi Ditingkatkan melalui *Quantum Confinement* dan *Surface Plasmon Resonance (SPR)*

Penelitian oleh Hussain et al. (2025) ini menyelidiki kemajuan membran PSU yang menggunakan nanomaterial seperti TiO₂, ZnO, Au, dan Ag, yang memiliki kemampuan untuk pemurnian air yang berkelanjutan dan efisiensi pengolahan air. Membran ini memiliki banyak keuntungan, termasuk kemampuan antibakteri dan antifouling yang luar biasa yang

mampu mengurangi bakteri hingga lebih dari 95%, sekaligus memastikan stabilitas jangka panjang yang luar biasa, lebih dari 30 hari.

Metode yang digunakan adalah integrasi nanomaterial ke dalam membran PSU dan pengujian performa jangka panjang, termasuk stabilitas dan efektivitas dalam menghilangkan polutan serta resistensi terhadap fouling dan bakteri. Efek pengurangan kuantum dan resonansi plasma permukaan (SPR) meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan efisiensi penerangan, sehingga meningkatkan kapasitas membran untuk mengelola polutan dan pengotoran. Membran yang diubah menunjukkan kapasitas untuk mempertahankan kinerja tinggi selama durasi yang lama, menegaskan kelangsungan hidupnya untuk aplikasi skala besar. Publikasi ini secara kolektif menegaskan bahwa nanomaterial berbasis membran menawarkan solusi baru dan berkelanjutan untuk masalah pengolahan air kontemporer.

Nanoteknologi untuk Pengolahan dan Pemurnian Air Membran Berbasis Nanomaterial

Metode yang digunakan dalam penelitian Bhattacharya et al. (2013) ini berbasis nanomaterial untuk pemurnian air dan ekstraksi polutan. Teknik utama adalah adsorpsi dengan menggunakan nanomaterial, termasuk graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (RGO), dan komposit logam atau oksida logam yang didukung oleh graphene, seperti magnetite-reduced graphene oxide dan ferric hidroksidagraphene oxide. Strategi ini mengeksplorasi kemampuan pengikatan substansial nanopartikel untuk menyerap polutan, termasuk arsenat dan logam berat, dari air. Selain itu, penelitian tertentu menggunakan sintesis kimia nanomaterial melalui teknik seperti pengendapan kimiawi, sol-gel, pengendapan uap, solvotermal, dan reaksi padat.

Setelah sintesis, nanomaterial dianalisis dengan menggunakan alat canggih termasuk SEM (*Scanning Electron Microscopy*), TEM (*Transmission Electron Microscopy*), FT-IR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), dan AFM (*Atomic Force Microscopy*) untuk menuntukan struktur dan sifat-sifatnya. Selain adsorpsi, teknologi nanofiltrasi (NF) dan nanomembran digunakan untuk memisahkan kontaminan dari air, dengan menggunakan metode penyaringan dan pemisahan yang efektif.

Metode-metode ini menggunakan karakteristik permeabilitas dan selektivitas membran berbasis bahan nano untuk menghilangkan ion, zat organik, dan polutan biologis. Sintesis, karakterisasi, dan aplikasi nanomaterial dalam proses adsorpsi dan filtrasi adalah metode utama yang digunakan dalam penelitian ini untuk meningkatkan efisiensi pengolahan air.

Nanomaterial dapat meningkatkan pengolahan air dan menghilangkan polusi, menurut artikel ini. Dalam adsorpsi dan filtrasi, graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (RGO), dan komposit berbasis logam memiliki daya ikat yang kuat dan karakteristik antibakteri. Teknologi nanofiltrasi dan nanomembran menghilangkan ion, bahan organik, dan polutan biologis dari air. Struktur dan sifat bahan nano dievaluasi menggunakan instrumen modern seperti SEM, TEM, FT-IR, dan AFM setelah disintesis menggunakan proses kimiawi seperti pengendapan, sol-gel, pengendapan uap, dan solvotermal.

Nanopartikel ini meningkatkan efisiensi pengolahan air dan lebih ramah lingkungan daripada pendekatan saat ini.

Mengingat toksisitas nanopartikel dan masalah pengelolaan limbah nanomaterial, artikel ini menyerukan lebih banyak penelitian tentang keamanan dan dampak lingkungannya. Diskusi ini menunjukkan bahwa nanoteknologi dapat meningkatkan kualitas air dan polusi, tetapi studi keamanan tetap diperlukan.

Membran Berbasis Nanomaterial

Metode yang digunakan pada penelitian Putra (2017) ini adalah produksi dan modifikasi membran berbasis nanomaterial melalui beberapa pendekatan. Teknik utama melibatkan fabrikasi membran nanokomposit dengan memasukkan nanopartikel, seperti zeolit, ke dalam matriks membran polimer atau keramik melalui metode termasuk sol-gel, kondensasi gas inert, aplikasi laser, pembangkitan muatan ion, pirolisis, sintesis fototermal, perawatan plasma, proses nyala, penggilingan reaktif, mekanokimia, dan elektrodeposisi. Metode-metode ini berusaha untuk meningkatkan kinerja permeabilitas, selektivitas, stabilitas mekanis, dan ketahanan pengotoran membran.

Selain itu, sintesis membran biologis menggunakan protein aquaporin dan membran hibrida dilakukan untuk mencapai atribut permeabilitas dan selektivitas yang lebih baik. Fabrikasi nanopartikel untuk aplikasi membran sering dilakukan melalui teknik sol-gel, yang memungkinkan kontrol yang tepat atas ukuran, komposisi, dan sifat kimianya. Metode alternatif mencakup teknik kondensasi yang menggunakan gas inert, laser, dan sintesis lain yang mendorong pembentukan membran yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi tertentu.

Tabel 1. Data perbandingan nanoteknologi berdasarkan performansi dan kesiapan komersial

Konsep Membran Nanoteknologi	Potensi Performansi			Potensi Komersialisasi		
	Produktivitas	Selektivitas	Kekuatan	Efektivitas Biaya	Skalabilitas	Waktu Komersialisasi
Nanostructured Ceramic Membranes	Reactive-Catalytic Surfaces	0	+	+	0	0
	Zeolite Coatings	-	0	+	-	0
Inorganic-Organic Membranes	Mixed Matrix	+	0	+	-	0
	Nanoparticle TFNs	+	-	+	-	+
	Zeolite TFNs	+	0	+	0	+
Biologically-Inspired Membranes	Aquaporins	+++	++	0	-	0
	Aligned Nanotubes	++	++	0	-	0
	Block Copolymers	++	++	-	0	+

Penelitian tersebut menyoroti kelebihan dan kekurangan pada masing-masing bahan, termasuk stabilitas, biaya, dan kesiapan pasar. Membran nanokomposit dan biologis menunjukkan kinerja yang patut dipuji dan dapat diakses secara luas di pasar, sedangkan membran katalitik dan zeolit masih belum dikomersialkan dan memberikan kinerja di bawah standar. Nanoteknologi dapat secara nyata meningkatkan kemanjuran membran pengolahan air, memanfaatkan beragam bahan yang disesuaikan dengan kebutuhan individu; meskipun demikian, kendala utama adalah biaya dan skalabilitas untuk implementasi komersial.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa nanoteknologi memegang peran strategis dalam mengatasi tantangan pengelolaan dan pemisahan air yang semakin kompleks di era kontaminasi multi-polar. Pendekatan berbasis nanomaterial seperti TiO₂, ZnO, karbon nano, hingga komposit polimer termodifikasi telah menunjukkan performa unggul dalam menurunkan parameter pencemar utama seperti BOD, COD, TDS, serta logam berat, baik dalam skala laboratorium maupun aplikasi lapangan.

Melalui teknik fotokatalisis (Arulnangai et al., 2025; Daneshvar et al., 2004), adsorpsi (Ge et al., 2012; Khaydarov et al., 2010), maupun filtrasi membran (Lee et al., 2016), nanomaterial tidak hanya meningkatkan efisiensi pemisahan, tetapi juga memungkinkan proses berlangsung pada kondisi operasional yang lebih ringan dan berkelanjutan. Beberapa studi seperti oleh (Bhattacharya et al., 2013; Wulandari et al., 2018) menegaskan bahwa karakteristik fisik-kimia seperti ukuran partikel, porositas, dan modifikasi permukaan secara langsung memengaruhi efektivitas pemurnian.

Di sisi lain, teknologi nano juga dinilai adaptif terhadap kebutuhan konteks lokal, seperti pengolahan air rumah tangga atau sungai tercemar berat akibat limbah domestik dan industri, seperti yang ditunjukkan pada studi Sungai Cauvery (Arulnangai et al., 2025). Kombinasi dengan pendekatan statistik multivariat dalam evaluasi kualitas air juga menjadi praktik inovatif dalam mengidentifikasi sumber dan dampak pencemar secara lebih presisi.

Dengan demikian, integrasi nanoteknologi dalam sistem pemisahan dan pengelolaan air bukan hanya berkontribusi pada peningkatan performa teknis, namun juga membuka jalan bagi terwujudnya sistem pengolahan air yang lebih cerdas, berdaya adaptasi tinggi, dan mendukung prinsip keberlanjutan jangka panjang.

Daftar Pustaka

- Arulnangai, R., Thirugnanasambandham, K., Ganesamoorthy, R., Gomathi, R., & Parameswari, R. (2025). Role of TiO₂ nanomaterial in the treatment of polluted Cauvery River water in Tiruchirappalli district, Tamil Nadu, India. *Desalination and Water Treatment*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101216>
- Behnajady, M. A., Modirshahla, N., & Hamzavi, R. (2006). Kinetic study on photocatalytic degradation of C.I. Acid Yellow 23 by ZnO photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1–3), 226–232.
- Bhattacharya, S., Saha, I., Mukhopadhyay, A., Chattopadhyay, D., Ghosh, U. C., & Chatterjee, D. (2013). Role of nanotechnology in water treatment and purification: Potential applications and implications. *International Journal of Chemical Science and Technology*, 3(3), 59–64.
- Bokare, V., Jung, J., Chang, Y. Y., & Chang, Y. S. (2013). Reductive dechlorination of octachlorodibenzo-p-dioxin by nanosized zero-valent zinc: Modeling of rate kinetics and congener profile. *Journal of Hazardous Materials*, 250, 397–402.
- Choerudin. (2016). Peran Nanomaterial dalam Pengolahan Air dan Air Limbah. <https://www.researchgate.net/publication/312173583>
- Daneshvar, N., Salari, D., & Khataee, A. R. (2004). Photocatalytic degradation of azo dye Acid Red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO₂. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 162(2–3), 317–322.
- Faradila, R., Huboyo, H. S., & Syakur, A. (2023). Rekayasa Pengolahan Air Limbah Domestik Dengan Metode Kombinasi Filtrasi Untuk Menurunkan Tingkat Polutan Air. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(3), 342–350. <https://doi.org/10.14710/jkli.22.3.342-350>
- Ge, F., Li, M. M., Ye, H., & Zhao, B. X. (2012). Effective removal of heavy metal ions Cd²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ from aqueous solution by polymer-modified magnetic nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 211–212, 366–372.
- Hussain, S., Abbas, Z., Satta, A., & Ullah, Z. (2025). INVESTIGATING THE ROLE OF QUANTUM CONFINEMENT AND SURFACE PLASMON RESONANCE IN ENHANCING WATER PURIFICATION EFFICIENCY OF MEMBRANES NANOMATERIAL-BASED. *Kashf Journal of Multidisciplinary Research*, 2(2), 233–250.
- Kallman, E. N., Oyanedel-Craver, V. A., & Smith, J. A. (2011). Ceramic filters impregnated with silver nanoparticles for point-of-use water treatment in rural Guatemala. *Journal of Environmental Engineering*, 137(6), 407–415.
- Kangwansupamonkon, W., Jitbunpot, W., & Kiatkamjornwong, S. (2010). Photocatalytic efficiency of TiO₂/poly[acrylamide-co-(acrylic acid)] composite for textile dye degradation. *Polym. Degrad. Stab.*, 95(9), 1894–1902.
- Khaydarov, R. A., Khaydarov, R. R., & Gapurova, O. (2010). Water purification from metal ions using carbon nanoparticle-conjugated polymer nanocomposites. *Water Research*, 44(6), 1927–1933.
- Kurniadie, D. (2011). Wastewater Treatment Using Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland in Indonesia. *American Journal of Environmental Sciences*, 7, 15–19.
- Lee, K. M., Lai, C. W., Ngai, K. S., & Juan, J. C. (2016). Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: A review. *Water Research*, 88, 428–448.
- Putra, I. A. (2017). MEMBRAN BERBASIS NANOMATERIAL UNTUK PENGOLAHAN AIR. *Zenodo*, 1, 1–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1134212>
- Sari, S. A. P., Lesta, L., Syarmila, S., Hanum, Y., Mawaddah, Z., Jurian, J., & Nurhadini, N. (2022). Extra A Review of Nanofiltration Membrane Technology To Treat Water

- Problems. *Stannum : Jurnal Sains Dan Terapan Kimia*, 4(2), 74–80. <https://doi.org/10.33019/jstk.v4i2.2936>
- Setiawan, D. D., Hannindyah, M., Wulandari, S., Yolandha, R., & Parapat. (2025). PEMANFAATAN NANOTEKNOLOGI (NANOFILTRASI MEMBRAN) SEBAGAI SOLUSI KRISIS AIR BERSIH UNTUK KEBUTUHAN DOMESTIK. *Scientica Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*, 3(3), 148–169. <https://jurnal.researchideas.org/index.php/scientica/article/download/113/101>
- Sholikhah, atus, Dhuha Afrianisa, du, & Teknik Lingkungan Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, J. (2014). Regulation of the Minister of Health of the Republic of Indonesia Number 2 of 2023 concerning Implementing Regulations of Government Regulation Number 66 of.
- Sutanto, K. (2017). Teknologi Berbasis Nanomaterial untuk Remediasi dan Pengolahan Air. <https://core.ac.uk/download/pdf/144731167.pdf>
- Tratnyek, P. G., Salter, A. J., Nurmi, J. T., & Sarathy, V. (2010). Environmental applications of zerovalent metals: Iron vs. Zinc. In American Chemical Society (Ed.), *Nanoscale Materials in Chemistry: Environmental Applications*. American Chemical Society, 1045, 165–178.
- Wulandari, M., Astuti, & Muldarisnur. (2018). Sintesis Nanopartikel TiO₂-SiO₂ Berpori Sebagai Fotokatalis untuk Penjernihan Air Limbah Rumah Tangga. *Jurnal Fisika Unand*, 7(1). <https://jurnal.fisika.unand.ac.id/index.php/jfu/article/view/123>