

STUDI LITERATUR: APLIKASI TEKNOLOGI MEMBRAN DALAM PENGOLAHAN LIMBAH CAIR UNTUK KEBERLANJUTAN LINGKUNGAN

Lidya Tesalonika¹, Tety Wahyuningsih Manurung^{1*}

¹Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya

*Penulis korespondensi: tety.manurung@mipa.upr.ac.id

ABSTRAK

Air merupakan elemen penting dalam kehidupan manusia dan sangat dibutuhkan untuk berbagai keperluan, mulai dari konsumsi sehari-hari hingga kegiatan industri. Namun, krisis air akibat pencemaran limbah semakin meningkat yakni salah satunya yaitu limbah cair. Oleh karena itu perlunya adanya metode pengolahan limbah cair yang efektif serta ramah lingkungan. Kemajuan teknologi membran saat ini telah menjadi solusi yang berpotensi dalam aplikasi pengolahan limbah cair. Studi ini bertujuan untuk mengkaji potensi membran serta efisiensi dan efektivitasnya dalam proses pengolahan air dari limbah cair. Studi dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis data dari berbagai sumber jurnal dan buku yang relevan dengan tujuan dan objek kajian. Berbagai jenis membran seperti mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan reverse osmosis dievaluasi aplikasinya dalam pengolahan air dari limbah cair. Analisis selektivitas limbah serapan, biaya operasi, dan energi konsumsi dilakukan untuk menentukan efektivitas masing-masing membran dan metode sintesis membran. Hasil studi menunjukkan bahwa teknologi membran memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas air hasil pengolahan dan lebih efisien serta efektif dalam pengolahan limbah cair. Selain itu, modifikasi membran penting untuk meningkatkan efektivitas penanganan limbah cair serta memungkinkan kinerja membran lebih baik dan dampak lingkungan lebih rendah. Kajian ini akan memberikan informasi dan pandangan masa depan dibidang penanganan limbah cair dengan harapan memacu lebih banyak kemajuan penelitian di masa mendatang.

Kata kunci: Limbah Cair, Lingkungan, Pencemaran, Pengolahan, Teknologi Membran

1 PENDAHULUAN

Air adalah elemen vital bagi kehidupan dan lingkungan. Pencemaran air memiliki peranan besar yang berdampak dalam berbagai macam penyebab masalah kesehatan. Dalam beberapa tahun terakhir, tingkat kualitas air mengalami penurunan yang signifikan karena perkembangan sosial dan ekonomi yang cepat. Selain itu sering kali air digunakan sebagai media "membuang" berbagai jenis polutan dan limbah berbahaya (Hidalgo & Murcia, 2021). Krisis air bersih saat ini tengah melanda kehidupan manusia, berdasarkan laporan dari *World Commission on Water* memprediksi bahwa penggunaan air akan meningkat sebesar 40% dalam 20 tahun ke depan seiring dengan peningkatan permintaan dari sektor pertanian, industri, dan perkotaan. Dengan perubahan iklim, situasi akan semakin memburuk karena musim panas yang lebih panas dan kering akan mengurangi ketersediaan pasokan air dan meningkatkan konsumsi air. Dampak dari situasi ini terlihat di berbagai belahan dunia, terutama di daerah Timur Tengah, Afrika, Asia, dan Amerika Latin. Saat ini, terdapat 2,1 miliar orang yang tidak memiliki akses air bersih yang layak dan 2,6 miliar orang hidup tanpa akses ke sanitasi dasar. Kekurangan air untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari memiliki konsekuensi kesehatan yang serius (Ezugbe & Rathilal, 2020;

Tarrass & Benjelloun, 2012). Selain itu, permasalahan kekurangan air bersih juga terjadi di Indonesia. Meskipun Indonesia memiliki cadangan sumber air berupa air sungai, namun dengan adanya iklim tropis berpengaruh pada musim hujan dan kemarau, berdasarkan data pada Desember 2018, sebanyak 550 sungai yang berada di Indonesia, 82% di antaranya berada dalam kondisi rusak atau tercemar (Pratiwi et al., 2020).

Pencemaran di luar sumber air terus menjadi ancaman serius bagi perairan penerima, serta pelepasan limbah dan limbah industri yang terus berlangsung di seluruh dunia. Seperti yang telah terbukti dengan adanya kontaminasi limbah domestik dan industri mengandung berbagai polutan seperti pewarna, logam berat, minyak dan senyawa lemak (Bhattacharjee et al., 2020). Perindustrian seperti kilang minyak, farmasi, kosmetik, tekstil dan cat dapat menjadi sumber pencemar air yang bersifat karsinogenik dan tidak dapat terurai secara alami (Afroze & Sen, 2018; Chakraborty et al., 2022; Pavithra et al., 2019). Dampak pencemaran ini dapat membahayakan kehidupan air, merusak ekosistem akuatik dan bahkan mengancam kesehatan manusia yang sangat bergantung pada sumber daya air tersebut. Oleh karena itu, upaya perlindungan lingkungan yang lebih besar dan tindakan pencegahan yang efektif diperlukan untuk mengurangi dampak negatif dari pelepasan limbah industri dan pencemaran lingkungan secara keseluruhan (Bashir et al., 2020). Pemulihan dan pengolahan air akan menjadi langkah besar untuk meningkatkan keberlanjutan sumber pasokan air (Gelete et al., 2020; Martini & Yuliwati, 2021).

Sistem pengolahan air konvensional selama ini mengandalkan metode seperti koagulasi/flokulasi, filtrasi, dan desinfeksi, namun metode-metode tersebut memiliki beberapa kelemahan, seperti efisiensi yang terbatas dalam menghilangkan polutan tertentu, kebutuhan akan bahan kimia tambahan serta potensi menghasilkan limbah sekunder (Duggireddy & Pisharody, 2024). Beberapa jenis membran yang digunakan dalam pengolahan air meliputi membran mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan reverse osmosis. Pemanfaatan membran dalam pengolahan air menjadi opsi yang potensial karena keunggulannya, seperti tidak menghasilkan emisi karbon, memiliki selektivitas yang tinggi, dan tingkat kegagalan yang lebih rendah. Saat ini, perkembangan membran cukup beragam sehingga masalah biaya pemasangan dan perawatannya yang mahal dapat diatasi. Manfaat-manfaat tersebut telah mendorong peningkatan minat dalam menerapkan teknologi ini di berbagai instalasi pengolahan air (Asif et al., 2019; Martini & Ang, 2019; Yadav et al., 2021).

Oleh karena itu, studi tentang teknologi membran dalam aplikasi *water treatment* dilakukan untuk mengeksplorasi potensi serta untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses pengolahan air. Studi ini bertujuan untuk menemukan solusi inovatif dalam meminimalkan biaya pemasangan dan perawatan, mengurangi potensi *fouling*, dan mengoptimalkan kinerja membran untuk menghasilkan air berkualitas tinggi secara berkelanjutan.

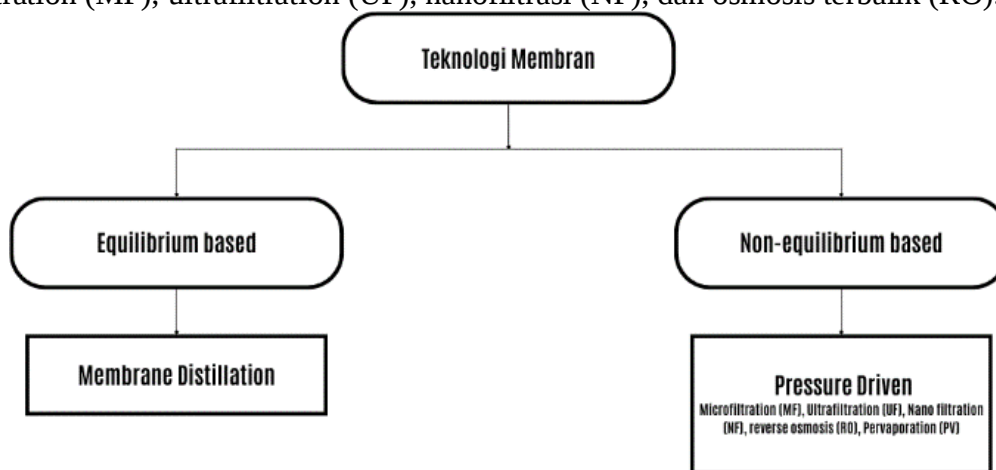
2 METODE

Untuk melakukan studi literatur ini, dilakukan pencarian artikel ilmiah terkait dengan aplikasi teknologi membran dalam pengolahan limbah cair. Pencarian dilakukan melalui basis data akademik seperti Google Scholar dan ResearchGate. Artikel-artikel yang relevan dengan topik ini kemudian dianalisis secara kritis untuk mendapatkan informasi yang akurat dan terpercaya.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Teknologi Membran

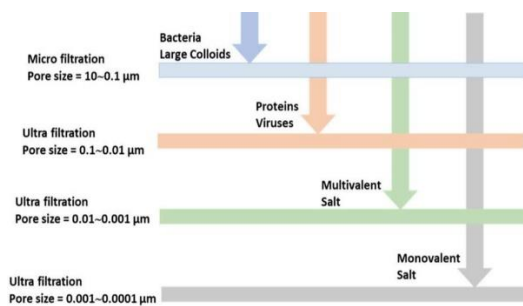
Membran adalah lapisan tipis yang memisahkan dua fase, baik itu cair atau gas. Salah satu aspek penting dari membran adalah kemampuannya mengatur permeabilitas spesies kimia. Membran bekerja hanya dengan meloloskan satu komponen dari campuran untuk melewati dan menghalangi perembesan komponen lainnya. Saat ini, telah banyak tipe membran yang digunakan dalam pengolahan air, salah satunya ditinjau dari segi *pressure driven membrane processes* dimana proses pemisahan ini yang paling banyak digunakan dalam pengolahan limbah, mulai dari pra- pemrosesan hingga pascapemrosesan limbah. Proses ini bergantung pada tekanan hidrolik agar dapat memisahkan. Ada empat tipe utama membran dari proses ini, yaitu microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltrasi (NF), dan osmosis terbalik (RO).



Gambar 1. Klasifikasi Proses Teknologi Membran (Jhaveri & Murthy, 2016)

Perbedaan utama yang ditunjukkan oleh proses-proses ini adalah ukuran pori membran dan tekanan yang diperlukan untuk pengoperasiannya. RO adalah salah satu jenis proses memakai membran yang paling efisien dalam memisahkan partikel-partikel kecil termasuk bakteri dan ion-ion monovalen seperti ion sodium dan klorida hingga 99,5% (Muro et al., 2012). Selain itu, terdapat juga proses *nonpressure driven processes* seperti *forward osmosis* (FO) dan *liquid membrane* (Chollom, 2015).

Teknologi membran telah menjadi salah satu teknologi penting dalam berbagai aplikasi industri dan lingkungan karena kemampuannya untuk memisahkan, memurnikan, dan mengkonsentratkan berbagai jenis zat terlarut secara efektif (Razali et al., 2023). Umumnya air limbah memiliki tingkat total padatan terlarut (TDS) dan kebutuhan oksigen kimia (COD) yang tinggi (Keskin et al., 2021). Dalam industri pengolahan air dan limbah, teknologi membran telah banyak diterapkan karena kemampuannya dalam menghasilkan efluen berkualitas tinggi dengan biaya operasional yang relatif rendah (Brady, 2012). Penggunaan teknologi membran dalam pengolahan limbah cair pada industri seperti industri tekstil dan kimia telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam menghasilkan air daur ulang yang berkualitas (Khan & Ahmad, 2023), salah satu efektivitas membran juga ditentukan oleh diameter pori yang kecil dan jenis bahan yang digunakan.



Gambar 2. Tipe membran berdasarkan ukuran porinya (Khan & Ahmad, 2023)

3.2 Metode Sintesis Membran

Metode dalam proses sintesis membran merupakan aspek penting dalam pengembangan membran karena memengaruhi secara langsung sifat fisik, kimia, dan performa membran yang dihasilkan. Pemilihan metode sintesis yang tepat sangat bergantung pada aplikasi yang diinginkan, sifat bahan baku, dan spesifikasi membran yang dibutuhkan. Beberapa metode sintesis membran dapat dilihat pada **tabel 1** berikut.

Tabel 1. Metode Sintesis Membran

Metode Sintesis	Keuntungan	Kekurangan	Ref.
<i>Grafting To</i>	Ketebalan lapisan polimer untuk sintesis membran dapat diatur dan fungsionalitas membran dengan presisi tinggi.	Kepadatan pengepakan sikat polimer rendah dan memerlukan modifikasi kimia permukaan untuk imobilisasi	(Chimisso et al., 2020)
<i>Langmuir Blodgett and Langmuir Schaefer</i>	Dapat menyintesis membran dengan menggunakan berbagai mode perendaman dan fleksibilitas dan kontrol dalam pengembangan dan sintesis membran	Memerlukan kondisi khusus dan peralatan khusus sehingga biaya relatif mahal dan tingkat kebersihan dan isolasi tinggi karena mudah terkontaminasi	(Chimisso et al., 2020)
<i>Fusion/rupture of vesicles</i>	Mudah disintesis, proses terjadi secara alami memerlukan perlakuan khusus atau penggunaan peralatan khusus, tidak terlalu mahal	Peluang cacat atau rusak cukup besar jika salah kondisi, sulit untuk produksi dengan konsistensi yang tinggi, dan aplikasi hanya dapat diterapkan pada sejumlah kasus sintesis membran	(Michalek et al., 2019)
<i>Grafting from</i>	Lapisan atau struktur material yang dihasilkan sangat padat dan rapat	Keterbatasan dalam mengontrol ketebalan secara seragam pada struktur, menyebabkan variasi ketebalan dalam material sehingga sulit dikarakterisasi	(Hou & Jiang, 2009; Li et al., 2015)
AC Electrospinning	Produktivitas cukup lebih tinggi dan dapat dimodifikasi untuk memenuhi kebutuhan yang diinginkan	Kurang aman dilakukan sehingga keamanan saat bekerja harus diperhatikan	(Havlíček et al., 2020)

3.3 Aplikasi Membran dalam Pengolahan Limbah Cair

Saat ini kemajuan aplikasi membran dalam pengolahan air sangat berkembang. Cukup banyak kegunaan membran dalam pengolahan air karena penggunaan membran dalam pengolahan air memberikan keuntungan seperti pemisahan yang selektif, efisiensi energi, skalabilitas, ramah lingkungan, dan efisiensi pemisahan yang tinggi. Oleh karena itu teknologi membran memungkinkan proses pemurnian air yang efisien dan efektif. Beberapa aplikasi membran dalam pengolahan air dapat dilihat pada **tabel 2** berikut,

Tabel 2. Penelitian Terkini Mengenai Membran Dalam Aplikasi Pengolahan Limbah Cair

Bahan Membran	Jenis Membran	Jenis Limbah	Hasil	Ref.
Polietersulfon (PES)	RO: RO98pHt	Limbah fenolik dari pabrik kertas	Mengurangi 95,5% dari jumlah COD dan 94,9% untuk fenol dalam air limbah.	(Sun et al., 2015)
Polietersulfon (PES)	NF: FM NP010	Limbah pabrikpulp dan kertas.	Menghilangkan COD, 92% hardness, dan 98% kadar sulfat.	(Gönder et al., 2011)
Polyvinillidena Fluorida (PVDF)	UF-MBR	Limbah pabrikpulp dan kertas eukaliptus	Kualitas air permeat yang diolah memenuhi standar limbah industri pulp dan kertas di Thailand. Penghilangan warna pada MLSS >6.940 mg/L mencapai hasil yang memuaskan.	(Poojamnong et al., 2020)
Poliakrilonitril (PAN)	UF: UF-25-PAN	Limbah daritempat pemotongan unggas	Efisiensi penghilangan lemak sebesar 99% dan zat organik terlarut 98%, sementara penghilangan COD dan BOD melebihi 94%.	(Yordanov, 2010)
Polisulfon MWCO30 kd	UF	Limbah daritempat pemotongan unggas	Menghilangkan BOD hingga 93%, COD 94%, TSS 100%, serta lemak dan minyak hingga 100%.	(Malmali et al., 2018)
Polietersulfon (PES) MWCO 10 and 50 kDa	UF	Limbah daritempat pemotongan unggas	Menghilangkan COD mencapai 94.2%, TOC 92.5%, kekeruhan 100%, dan nitrogen total (TN) mencapai 87.1%.	(Marchesi et al., 2021)

Polisulfon MWCO30 kd	UF: UFPHT20-6338	Limbah pabrik minyak sayur	Persentase penurunan COD sebesar 91%, TOC & 87%, TSS 100%, untuk fosfat (PO_4^{3-}) 85%, dan 40% untuk ion klorida (Cl^-). (Mohammadi & Esmaelifar, 2004)
Polistiren (PS)/ Poliamida (PA)	RO: SC785277	Limbah pabrik minyak zaitun	Rinjeksi polutan dan limbah organik mencapai 90.5% (Ochando-Pulido et al., 2016)
Polistiren, polietersulfon, dan poliakrilat	UF: Amicon YM, IRIS 3038, CJT 35	Limbah minyak	Rejeksi total organik carbon (TOC) > 96% dan rejeksi minyak > 99.9%, menghasilkan residu minyak kurang dari 20 mg/L. (Lipp et al., 1988)
Polivinilidenafluorida dan Poliamida komposit	UF-RO	Limbah industri pengolahan logam	Menghilangkan 91.3% - 99.8% unsur logam, senyawa organik, senyawa anorganik, padatan tersuspensi, nitrogen amonium, dan nitrogen sulfat. (Petrinic et al., 2015)
Polietersulfon (PES) dan Poliamida komposit	UF	Limbah aliran mengandung logam	Menghilangkan ion logam (Co^{2+} 99.8%, Cr^{3+} 99.7%, Cs^{2+} 83.3%, Cu^{2+} 99.2%, Mn^{2+} 99.8%, Sr^{2+} 99.9%, dan Zn^{2+} mencapai 98%. (Juang et al., 2003)
Polietersulfon (PES): dengan surfaktan cetylpyridinium klorida (CPC)	UF: MEUF	Limbah aliran mengandung logam	Menghilangkan ion logam (Cr^{3+} mencapai 99%, Ni^{2+} 91%, dan As^{5+} 98%. (Beolchini et al., 2007)
Polietersulfon (PES): dengan surfaktan natrium dodesil sulfat (SDS)	UF: MEUF	Limbah aliran mengandung logam	Menghilangkan ionlogam (Cd^{2+} mencapai 99%, Cu^{2+} 99%, Pb^{2+} 99%, dan Zn^{2+} 99%. (Huang et al., 2017)

Berbagai jenis membran telah berhasil diterapkan dalam pengolahan limbah dari industri pulp dan kertas. Salah satunya membran yang berbahan polietersulfon dengan jenis nanofiltrasi tipe FM NP010 terbukti efektif menghilangkan 91% COD, 92% total hardness, dan 98% kadar sulfat dari limbah pabrik pulp dan kertas. Selain itu, membran berbahan polietersulfon dengan jenis reverse osmosis (RO) tipe RO98pHt juga memberikan hasil signifikan dengan mengurangi 95.5% jumlah COD dan 94.9% fenol dalam air limbah pabrik kertas. Sementara itu, membran berbahan polyvinilidena fluorida (PVDF) dalam membran ultrafiltrasi berbasis bioreactor mampu mencapai standar kualitas air permeat yang sesuai dengan regulasi limbah industri pulp dan kertas di Thailand, dengan hasil yang memuaskan dalam penghilangan warna pada MLSS >6.940 mg/L. Dengan demikian, membran nanofiltrasi tipe FM NP010 berbahan polietersulfon dapat dianggap paling efektif dalam pengolahan limbah ini berdasarkan kemampuannya yang tinggi dalam mengatasi masalah COD, total hardness, dan kadar sulfat yang tinggi.

Untuk industri pengolahan limbah dari tempat pemotongan unggas, membran ultrafiltrasi dengan tipe UF-25-PAN mencapai efisiensi penghilangan lemak 99% dan zat organik terlarut 98%, serta mengurangi lebih dari 94% COD dan BOD. Selain itu, membran ultrafiltrasi berbahan Polisulfon dengan Molecular Weight Cut-Off (MWCO) 30 kDa mampu menghilangkan 93% BOD, 94% COD, 100% Total Suspended Solids (TSS), serta lemak dan minyak hingga 100%. Sementara itu, membran ultrafiltrasi MWCO 10 dan 50 kDa mencapai penghilangan COD sebesar 94.2%, TOC 92.5%, kekeruhan 100%, dan nitrogen total (TN) 87.1%. Efektivitas membran ultrafiltrasi MWCO 10 dan 50 kDa berbahan polietersulfon dianggap paling efektif karena menunjukkan efisiensi yang sangat tinggi dalam menghilangkan berbagai kontaminan dari limbah pemotongan unggas.

Pada pengolahan limbah minyak, berbagai jenis membran telah terbukti memberikan hasil yang efektif dalam mengurangi pencemaran. Membran ultrafiltrasi MWCO 30 kDa berbahan polisulfon, digunakan untuk limbah pabrik minyak sayur dapat menurunkan tingkat COD sebesar 91%, TOC 87%, serta menghilangkan sepenuhnya TSS, fosfat (PO_4^{3-}), dan ion klorida (Cl^-). Sementara itu, membran reverse osmosis (RO) berbahan polistiren/poliamida diaplikasikan pada limbah pabrik minyak zaitun, hasilnya tingkat rejeksi terhadap polutan dan limbah organik sebesar 90.5%. Membran ultrafiltrasi berbahan polistiren, polietersulfon, dan poliakrilat jenis menunjukkan kinerja yang sangat baik dengan rejeksi *total organic carbon* (TOC) lebih dari 96% dan rejeksi minyak lebih dari 99.9%, menghasilkan residu minyak yang sangat rendah yang kurang dari 20 mg/L. Sehingga, membran ultrafiltrasi berbahan polistiren, polietersulfon, dan poliakrilat dianggap paling efektif dalam mengatasi limbah minyak berdasarkan kemampuannya yang tinggi dalam mengurangi kadar TOC dan minyak secara signifikan.

Dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat, membran yang sering digunakan adalah membran berbahan polietersulfon dan poliamida komposit yang diterapkan dalam proses ultrafiltrasi, menunjukkan bahwa penggunaan membran ini mampu menghilangkan berbagai ion logam dengan efisiensi yang sangat tinggi, termasuk Co^{2+} sebesar 99.8%, Cr^{3+} sebesar 99.7%, Cs^{2+} sebesar 83.3%, Cu^{2+} sebesar 99.2%, Mn^{2+} sebesar 99.8%, Sr^{2+} sebesar 99.9%, dan Zn^{2+} sebesar 98%. Selain itu, membran berbahan polietersulfon juga dapat dimodifikasi dengan surfaktan untuk meningkatkan efisiensi penghilangan logam berat. Salah satu modifikasi adalah dengan menggunakan surfaktan cetylpyridinium chloride (CPC) dalam proses *micellar-enhanced ultrafiltration* (MEUF). Studi yang dilakukan oleh Beolchini dkk mengungkapkan

bahwa modifikasi ini mampu menghilangkan ion Cr^{3+} hingga mencapai 99%, Ni^{2+} sebesar 91%, dan As^{5+} sebesar 98%. Hal ini menunjukkan bahwa surfaktan CPC dalam membran PES meningkatkan kemampuan penghilangan logam berat, membuatnya sangat efektif untuk pengolahan limbah industry. Modifikasi lain dari PES adalah penggunaan surfaktan natrium dodesil sulfat (SDS) dalam proses MEUF. Hasil penelitian oleh Huang dkk, 2017 menunjukkan bahwa kombinasi ini mampu menghilangkan ion logam Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , dan Zn^{2+} dengan efisiensi masing-masing sebesar 99%. Meskipun semua modifikasi menunjukkan efisiensi yang tinggi, membran PES yang dimodifikasi dengan surfaktan SDS dalam proses MEUF tampak paling efektif menghilangkan berbagai ion logam berat dibandingkan dengan modifikasi dengan natrium dodesil sulfat (SDS).

3.4 Modifikasi Dan Efektivitas Membran Dalam Aplikasi Water Treatment

Modifikasi membran melibatkan berbagai teknik atau pendekatan yang digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat membran seperti efektivitas, selektivitas, kekuatan dan ketahanannya. Teknik modifikasi dapat mencakup penambahan bahan-bahan tertentu, perubahan struktur fisik membran, atau pengembangan metode produksi membran yang inovatif. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kinerja membran dalam memisahkan kontaminan dan memungkinkan proses pengolahan air yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Berikut ini beberapa modifikasi teknologimembran dalam aplikasi *water treatment*.

Tabel 3. Modifikasi Teknologi Membran Dalam Aplikasi Pengolahan Limbah Cair dan *Water Treatment*

Membran	Jenis Limbah	Modifikasi	Hasil	Ref.
Fotobioreaktor Membran Osmotik	Pewarnasintesis	Penggunaan mikroalga atau mikroorganisme fotosintetik dikombinasikan sistem forward osmosis	Mengilangkan nitrogen 86-99% dan fosfor 100%. Sifat rejeksi membran tinggi.	(Praveenet al., 2016)
Membran berbasis mikrofiltrasi	Pewarnasintesis	Penggunaan mikroalga atau mikroorganisme fotosintetik	Efisiensi penghilangan nitrogen sebesar 48-97% dan fosfor 46%.	(Praveenet al., 2016)
Membran berbasis seldesalinasi mikroba	Air tanah yang logam berat	Penggunaan elektrokimia melibatkan mikroorganisme	proses yang Mengurangi kadar arsenik sebesar 89%, tembaga sebesar 97%, merkuri sebesar 99%, dan nikel sebesar 95%.	(Brastad& He, 2013)
Membran elektrospon	Limbah logam berat	Pembuatan dengan metode electrospinning dan nerbasis biopolimer kitosan dan dipekaya amino	Menghilangkan ion Cr^{4+} , Cu^{2+} , dan Co^{2+} dengan kapasitas adsorpsi maksimum masing-masing sebesar 138.96, 69.27, dan 68.31 mg/g.	(Yang et al., 2019)

Membran berbasis seldesalinasi mikroba	Limbah industri	Penggunaan elektrokimia melibatkan mikroorganisme	proses yang	Menghilangkan sebesar 97.8%, TN sebesar 90.6%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ sebesar 98.4%, dan konduktivitas sebesar 31.6%, serta menghasilkan energi listrik sebesar 32.6 Wh per kg COD atau 9.5 Wh/m ³ air yang didesalinasi.	COD (Zuo et al., 2017)
Reaktor membran terintegrasi enzim untuk degradasi senyawa organik	Limbah industri tekstil	Kombinasi dalam sistem membran yang mendegradasi organik seperti pewarna	enzim reaktor tekstil, yang dapat hampir 95% penurunan fluks sebesar 10%, dan pemulihan ABTS aktif sebesar 70%.	Menghilangkan pewarna (Chhabra et al., 2009)	menghasilkan et al., dekolourisasi, 2009) sebesar pemulihan

Dalam pengolahan limbah cair, modifikasi teknologi membran telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitasnya. Salah satu pendekatan yang telah diuji adalah penggunaan membran berbasis mikrofiltrasi untuk limbah pewarna sintesis. Modifikasi ini melibatkan penggunaan mikroalga atau mikroorganisme fotosintetik, yang menunjukkan efisiensi penghilangan nitrogen sebesar 48-97% dan fosfor sebesar 46%. Selain itu, fotobioreaktor membran osmotik juga digunakan untuk limbah pewarna sintesis dengan menggabungkan sistem forward osmosis dan mikroorganisme fotosintetik, menghasilkan penghilangan nitrogen sebesar 86-99% dan fosfor 100%, dengan sifat rejeksi membran yang tinggi. Dari kedua metode tersebut, fotobioreaktor membran osmotik tampak lebih efektif untuk pengolahan limbah yang mengandung zat pewarna. Efisiensi penghilangan nitrogen yang lebih tinggi (86-99%) dan penghilangan fosfor yang mencapai 100% menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan membran berbasis mikrofiltrasi. Selain itu, sifat rejeksi membran yang tinggi pada fotobioreaktor membran osmotik juga menambah nilai lebih dalam memastikan kualitas air hasil olahan yang lebih baik.

Membran berbasis sel desalinasi mikroba memanfaatkan proses elektrokimia yang melibatkan mikroorganisme untuk mengurangi konsentrasi logam berat dalam air tanah. Teknologi ini telah terbukti sangat efektif, dengan pengurangan kadar arsenik sebesar 89%, tembaga sebesar 97%, merkuri sebesar 99%, dan nikel sebesar 95% . Penggunaan proses elektrokimia memungkinkan pengolahan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, menjadikan teknologi ini sangat efektif untuk pengolahan air tanah yang tercemar. Sementara itu, membran elektrospon dibuat dengan metode *electrospinning* dan berbasis biopolimer kitosan yang diperkaya amino. Membran ini menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum yang tinggi untuk ion-ion logam seperti Cr^{4+} , sebesar 138.96 mg/g, Cu^{2+} sebesar 69.27 mg/g, dan Co^{2+} sebesar 68.31 mg/g . Teknologi ini efisien dalam mengadsorpsi ion-ion logam berat, namun lebih cocok untuk skenario di mana adsorpsi maksimum diperlukan dan mungkin memerlukan pemrosesan lebih lanjut atau kombinasi dengan teknologi lain untuk penghilangan logam berat secara menyeluruh.

Selain itu, teknologi membran berbasis sel desalinasi mikroba telah diaplikasikan pada pengolahan limbah industri. Teknologi ini memanfaatkan proses elektrokimia yang melibatkan mikroorganisme untuk mengolah limbah industri. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penghilangan *chemical oxygen demand* (COD) sebesar 97.8%, total nitrogen (TN) 90.6%, NH_4^+ -N sebesar 98.4%, dan mengurangi konduktivitas sebesar 31.6%. Selain itu, teknologi ini juga menghasilkan energi listrik sebesar 32.6 Wh per kg COD atau 9.5 Wh/m³ air yang didesalinasi. Penggunaan teknologi ini tidak hanya efektif dalam pengurangan polutan, tetapi juga menawarkan keuntungan tambahan berupa produksi energi listrik, menjadikannya solusi yang berkelanjutan dan efisien untuk pengolahan limbah industri. Di sisi lain, untuk pengolahan limbah industri tekstil, reaktor membran terintegrasi enzim telah dibuktikan efektif dalam mendegradasi senyawa organik. Teknologi ini menggabungkan enzim dalam sistem reaktor membran yang dapat mendegradasi senyawa organik seperti pewarna tekstil. Penelitian menunjukkan bahwa reaktor ini mampu menghilangkan pewarna tekstil dengan menghasilkan hampir 95% dekolorisasi. Meskipun terdapat penurunan fluks sebesar 10%, teknologi ini tetap menunjukkan efisiensi yang tinggi dengan pemulihan aktivitas ABTS aktif sebesar 70%. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa kombinasi enzim dan sistem membran dapat secara efektif mengatasi tantangan dalam pengolahan limbah industri tekstil, menjadikan air hasil olahan lebih bersih dan ramah lingkungan. Dengan demikian, baik membran berbasis sel desalinasi mikroba maupun reaktor membran terintegrasi enzim berpotensi untuk pengolahan limbah industri. Teknologi pertama unggul dalam pengurangan berbagai polutan dan produksi energi, sedangkan teknologi kedua menunjukkan hasil yang optimal dalam mendegradasi senyawa organik kompleks seperti pewarna tekstil. Pemilihan teknologi yang tepat tergantung pada jenis limbah dan tujuan pengolahan yang spesifik.

4 KESIMPULAN

Dalam pengolahan limbah industri pulp dan kertas, membran yang paling efektif adalah polietersulfon nanofiltrasi tipe FM NP010. Sementara itu, untuk limbah industri pemotongan unggas, membran ultrafiltrasi polietersulfon (PES) dengan MWCO 10 dan 50 kDa paling efektif. Selain itu, dalam pengolahan limbah minyak, membran ultrafiltrasi berbahan polistiren, polietersulfon, dan poliakrilat paling optimal kerjanya. Selanjutnya, untuk limbah yang mengandung logam berat, membran PES yang dimodifikasi dengan surfaktan SDS dalam proses MEUF paling efektif diantar membran lainnya. Pengolahan limbah pewarna sintesis, fotobioreaktor membran osmotik lebih efektif dibandingkan dengan modifikasi membran berbasis mikrofiltrasi dengan mikroalga atau mikroorganisme fotosintetik. Selain itu, teknologi membran berbasis sel desalinasi mikroba menggunakan proses elektrokimia untuk mengurangi konsentrasi logam berat dalam air tanah dengan efisiensi yang tinggi. Sementara membran elektrospun berbasis biopolimer kitosan efektif, kompatibel untuk aplikasi yang memerlukan adsorpsi maksimum dan pemrosesan lanjutan. Secara khusus untuk limbah industri, teknologi membran berbasis sel desalinasi mikroba efektif dalam mengurangi polutan dengan efisiensi yang tinggi serta menghasilkan energi listrik tambahan. Sementara reaktor membran terintegrasi enzim efektif dalam mendegradasi senyawa organik kompleks seperti pewarna tekstil. Modifikasi membran menjadi faktor penting dalam meningkatkan efektivitas penggunaannya dalam penanganan limbah cair, sehingga peningkatan kinerja membran dan pengurangan dampak lingkungan dapat dilakukan. Teknologi membran menawarkan solusi yang efisien, selektif, dan ramah lingkungan dalam pengolahan air. Pengolahan limbah cair menggunakan membran

memberikan beberapa keuntungan seperti dapat menekan biaya operasional, rendahnya energi yang digunakan, mengurangi penggunaan lahan atau ruang, serta mendapatkan mutu air hasil pengolahan menjadi lebih baik. Dengan penelitian dan inovasi, teknologi membran diharapkan dapat terus berkembang untuk memberikan kontribusi yang lebih besar dalam menjaga keberlanjutan lingkungan dan ketersediaan sumber daya air bersih di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afroze, S., & Sen, T. K. (2018). A Review on Heavy Metal Ions and Dye Adsorption from Water by Agricultural Solid Waste Adsorbents. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(7), 225. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3869-z>
- Asif, M. B., Ansari, A. J., Chen, S.-S., Nghiem, L. D., Price, W. E., & Hai, F. I. (2019). Understanding the mechanisms of trace organic contaminant removal by high retention membrane bioreactors: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(33), 34085–34100. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3256-8>
- Bashir, I., Lone, F. A., Bhat, R. A., Mir, S. A., Dar, Z. A., & Dar, S. A. (2020). Concerns and Threats of Contamination on Aquatic Ecosystems. In *Bioremediation and Biotechnology* (pp. 1–26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_1
- Beolchini, F., Pagnanelli, F., De Michelis, I., & Vegliò, F. (2007). Treatment of concentrated arsenic(V) solutions by micellar enhanced ultrafiltration with high molecular weight cut-off membrane. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1–2), 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.031>
- Bhattacharjee, C., Dutta, S., & Saxena, V. K. (2020). A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent. *Environmental Advances*, 2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100007>
- Brady, F. (2012). Chemicals: Membranes meet chemical industry requirements. *Filtration + Separation*, 49(3), 26–29. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(12\)70143-X](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(12)70143-X)
- Brastad, K. S., & He, Z. (2013). Water softening using microbial desalination cell technology. *Desalination*, 309, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.09.015>
- Chakraborty, R., Asthana, A., Singh, A. K., Jain, B., & Susan, A. B. H. (2022). Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2), 342–379. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722811>
- Chhabra, M., Mishra, S., & Sreekrishnan, T. R. (2009). Laccase/mediator assisted degradation of triarylmethane dyes in a continuous membrane reactor. *Journal of Biotechnology*, 143(1), 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2009.06.011>
- Chimisso, V., Maffei, V., Hürlimann, D., Palivan, C. G., & Meier, W. (2020). Self-Assembled Polymeric Membranes and Nanoassemblies on Surfaces: Preparation, Characterization, and Current Applications. In *Macromolecular Bioscience* (Vol. 20, Issue 1). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/mabi.201900257>
- Chollom, M. N. (2015). *Treatment and reuse of reactive dye effluent from textile industry using membrane technology* [Durban University of Technology]. <https://doi.org/10.51415/10321/1388>
- Duggireddy, R. P., & Pisharody, L. (2024). Traditional methods of water purification in rural areas. In *Water Resources Management for Rural Development* (pp. 55–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18778-0.00003-9>
- Ezugbe, E. O., & Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A

- review. In *Membranes* (Vol. 10, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
- Gelete, G., Gokcekus, H., Ozsahin, D. U., Uzun, B., & Gichamo, T. (2020). Evaluating disinfection techniques of water treatment. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 177, 408–415. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25070>
- Gönder, B. Z., Arayici, S., & Barlas, H. (2011). Advanced treatment of pulp and paper mill wastewater by nanofiltration process: Effects of operating conditions on membrane fouling. *Separation and Purification Technology*, 76(3), 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.10.018>
- Havlíček, K., Svobodová, L., Bakalova, T., & Lederer, T. (2020). Influence of electrospinning methods on characteristics of polyvinyl butyral and polyurethane nanofibres essential for biological applications. *Materials & Design*, 194, 108898. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108898>
- Hidalgo, A. M., & Murcia, M. D. (2021). Membranes for Water and Wastewater Treatment. *Membranes*, 11(4), 295. <https://doi.org/10.3390/membranes11040295>
- Hou, X., & Jiang, L. (2009). Learning from Nature: Building Bio-Inspired Smart Nanochannels. *ACS Nano*, 3(11), 3339–3342. <https://doi.org/10.1021/nn901402b>
- Huang, J., Yuan, F., Zeng, G., Li, X., Gu, Y., Shi, L., Liu, W., & Shi, Y. (2017). Influence of pH on heavy metal speciation and removal from wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration. *Chemosphere*, 173, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.137>
- Jhaveri, J. H., & Murthy, Z. V. P. (2016). A comprehensive review on anti-fouling nanocomposite membranes for pressure driven membrane separation processes. *Desalination*, 379, 137–154. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.009>
- Juang, R.-S., Xu, Y.-Y., & Chen, C.-L. (2003). Separation and removal of metal ions from dilute solutions using micellar-enhanced ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 218(1–2), 257–267. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00183-2](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00183-2)
- Keskin, B., Ersahin, M. E., Ozgun, H., & Koyuncu, I. (2021). Pilot and full-scale applications of membrane processes for textile wastewater treatment: A critical review. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102172. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102172>
- Khan, I. A., & Ahmad, N. M. (2023). Activated Carbon, CNTs and GO Based Polymeric Nanocomposites Membranes for Textile Wastewater Treatment: Preparation, Performance, and Fouling Control. *ECWS-7 2023*, 77. <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14307>
- Li, Q., Imbrogno, J., Belfort, G., & Wang, X. (2015). Making polymeric membranes antifouling via “grafting from” polymerization of zwitterions. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(21). <https://doi.org/10.1002/app.41781>
- Lipp, P., Lee, C. H., Fane, A. G., & Fell, C. J. D. (1988). A fundamental study of the ultrafiltration of oil-water emulsions. *Journal of Membrane Science*, 36, 161–177. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(88\)80014-0](https://doi.org/10.1016/0376-7388(88)80014-0)
- Malmali, M., Askegaard, J., Sardari, K., Eswaranandam, S., Sengupta, A., & Wickramasinghe, S. (2018). Evaluation of ultrafiltration membranes for treating poultry processing wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.010>
- Marchesi, C. M., Paliga, M., Oro, C. E. D., Dallago, R. M., Zin, G., Di Luccio, M., Oliveira, J. V.,

- & Tres, M. V. (2021). Use of membranes for the treatment and reuse of water from the pre-cooling system of chicken carcasses. *Environmental Technology*, 42(1), 126–133. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1624834>
- Martini, S., & Ang, H. M. (2019). Hybrid TiO₂/UV/PVDF ultrafiltration membrane for raw canola oil wastewater treatment. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 148, 51–59. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23771>
- Martini, S., & Yuliwati, E. (2021). Membrane Development and Its Hybrid Application for Oily Wastewater Treatment: A Review. *J. Applied Membrane Science & Technology*, 25(1), 57–71. <https://doi.org/10.11113/amst.v25n1.209>
- Michalek, L., Mundsinger, K., Barner-Kowollik, C., & Barner, L. (2019). The long and the short of polymer grafting. *Polymer Chemistry*, 10(1), 54–59. <https://doi.org/10.1039/C8PY01470A>
- Mohammadi, T., & Esmaeilifar, A. (2004). Wastewater treatment using ultrafiltration at a vegetable oil factory. *Desalination*, 166, 329–337. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.087>
- Muro, C., Riera, F., & Carmen Diaz, M. del. (2012). Membrane Separation Process in Wastewater Treatment of Food Industry. In *Food Industrial Processes - Methods and Equipment*. InTech. <https://doi.org/10.5772/31116>
- Ochando-Pulido, J. M., Stoller, M., Víctor-Ortega, M. D., & Martínez-Férez, A. (2016). Analysis of the fouling build-up of a spiral wound reverse osmosis membrane in the treatment of two-phase olive mill wastewater. *Chemical Engineering Transactions*, 47, 403–408. <https://doi.org/10.3303/CET1647068>
- Pavithra, K. G., P., S. K., V., J., & P., S. R. (2019). Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.02.011>
- Petricin, I., Korenak, J., Povodnik, D., & Hélix-Nielsen, C. (2015). A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry. *Journal of Cleaner Production*, 101, 292–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.022>
- Poojamnong, K., Tungsudjawong, K., Khongnakorn, W., & Jutaporn, P. (2020). Characterization of reversible and irreversible foulants in membrane bioreactor (MBR) for eucalyptus pulp and paper mill wastewater treatment using fluorescence regional integration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104231. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104231>
- Pratiwi, D., Sinia, R. O., & Fitri, A. (2020). Peningkatan Pengetahuan Masyarakat Terhadap Drainase Berporus Yang Difungsikan Sebagai Tempat Peresapan Air Hujan. *Journal of Social Sciences and Technology for Community Service (JSSTCS)*, 1(2). <https://doi.org/10.33365/jsstcs.v1i2.844>
- Praveen, P., Heng, J. Y. P., & Loh, K.-C. (2016). Tertiary wastewater treatment in membrane photobioreactor using microalgae: Comparison of forward osmosis & microfiltration. *Bioresource Technology*, 222, 448–457. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.124>
- Razali, M. C., Wahab, N. A., Sunar, N., & Shamsudin, N. H. (2023). Existing Filtration Treatment on Drinking Water Process and Concerns Issues. *Membranes*, 13(3), 285. <https://doi.org/10.3390/membranes13030285>

- Sun, X., Wang, C., Li, Y., Wang, W., & Wei, J. (2015). Treatment of phenolic wastewater by combined UF and NF/RO processes. *Desalination*, 355, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.018>
- Tarrass, F., & Benjelloun, M. (2012). The effects of water shortages on health and human development. In *Perspectives in Public Health* (Vol. 132, Issue 5, pp. 240–244). <https://doi.org/10.1177/1757913910391040>
- Yadav, P., Ismail, N., Essalhi, M., Tysklind, M., Athanassiadis, D., & Tavajohi, N. (2021). Assessment of the environmental impact of polymeric membrane production. *Journal of Membrane Science*, 622, 118987. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118987>
- Yang, D., Li, L., Chen, B., Shi, S., Nie, J., & Ma, G. (2019). Functionalized chitosan electrospun nanofiber membranes for heavy-metal removal. *Polymer*, 163, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.12.046>
- Yordanov, D. (2010). Preliminary study of the efficiency of ultrafiltration treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16(6), 700–704. <https://www.researchgate.net/publication/264853093>
- Zuo, K., Chang, J., Liu, F., Zhang, X., Liang, P., & Huang, X. (2017). Enhanced organics removal and partial desalination of high strength industrial wastewater with a multi-stage microbial desalination cell. *Desalination*, 423, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.018>