

A Comprehensive Review Of Produced Water Processing Technology In The Oil And Gas Industry

Rizza Fadillah Fitri

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Jl. Raya Palembang - Prabumulih No.KM. 32, Indralaya Indah, Kec. Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan 30862.

Info Artikel

Diterima: 02-12-2025

Disetujui: 15-07-2026

Dipublikasikan: 03-08-2026

Keywords:

*Air terproduksi
Adsorpsi
teknologi membran
membran bioreaktor
elektrokoagulasi.*

Abstrak

Air terproduksi (produced water, PW) merupakan limbah utama industri minyak dan gas bumi yang memiliki komposisi kompleks, meliputi senyawa organik dan anorganik, minyak dan lemak, logam berat, serta bahan kimia berbahaya. Kondisi tersebut menjadikan PW sebagai salah satu limbah cair yang sulit diolah sebelum dibuang atau dimanfaatkan kembali. Artikel ini mengkaji enam teknologi utama pengolahan PW, yaitu adsorpsi, membran, elektrodialisis, membran bioreaktor, elektrokoagulasi, dan aktivasi elektrokimia. Adsorpsi efektif menghilangkan kontaminan organik dengan biaya relatif rendah, tetapi dibatasi oleh kapasitas adsorben. Teknologi membran dan elektrodialisis mampu memisahkan senyawa ionik maupun nonionik secara selektif, meskipun menghadapi permasalahan fouling. Membran bioreaktor menawarkan efisiensi tinggi melalui kombinasi proses biologis dan filtrasi membran, tetapi memerlukan biaya operasional yang besar. Elektrokoagulasi efektif menghilangkan minyak, logam, dan padatan tersuspensi dengan penggunaan bahan kimia minimal. Aktivasi elektrokimia berpotensi meningkatkan kualitas dan mendisinfeksi air melalui pembentukan oksidator secara in situ. Tidak ada teknologi tunggal yang mampu mengatasi seluruh karakteristik PW sehingga diperlukan sistem hibrid yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Abstract

Produced water (PW) is the largest wastewater stream generated by the oil and gas industry. It contains a complex mixture of organic and inorganic compounds, oil and grease, heavy metals, suspended solids, and hazardous chemicals. This complex composition makes PW one of the most challenging industrial wastewaters to treat before discharge or reuse. This article reviews six major technologies for PW treatment: adsorption, membrane filtration, electrodialysis, membrane bioreactors, electrocoagulation, and electrochemical activation. Adsorption provides high removal efficiency for organic contaminants at a relatively low cost, although its performance is limited by the adsorption capacity of the material. Membrane filtration and electrodialysis enable selective separation of ionic and non-ionic contaminants, but membrane fouling remains a major challenge. Membrane bioreactors combine biological degradation with membrane separation, offering high treatment efficiency despite considerable operational costs. Electrocoagulation effectively removes oil, metals, and suspended particles with minimal chemical consumption. Electrochemical activation also shows potential for water disinfection and quality improvement through the in situ generation of oxidative agents. No single technology can address all PW contaminants; therefore, hybrid treatment systems are considered a more effective and sustainable solution.

© 2026 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:

Jl. Raya Palembang - Prabumulih No.KM. 32, Indralaya Indah, Kec. Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan 30862.

E-mail: rizzafadillah@ft.unsri.ac.id

p-ISSN 2252-6951

e-ISSN 2502-6844

Pendahuluan

Air terproduksi (*produced water*) adalah limbah cair utama dari operasi eksplorasi dan produksi migas, yang mengandung berbagai bahan pencemar berbahaya seperti salinitas tinggi, minyak dan lemak, hidrokarbon, logam berat, bahan organik terlarut (COD/BOD), serta bahan kimia tambahan seperti inhibitor skala, surfaktan, dan zat radioaktif (Genesis Watertech 2019). Air terproduksi mengandung minyak, garam dengan salinitas tinggi, logam berat, hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs), hingga material radioaktif. Pelepasan ke lingkungan tanpa pengolahan menimbulkan ancaman toksisitas signifikan bagi ekosistem air dan kesehatan manusia (Sund, dkk, 2009). Air terproduksi (*produced water*) merupakan limbah cair terbesar yang dihasilkan dari kegiatan industri minyak dan gas bumi. Pada saat proses eksplorasi dan produksi berlangsung, air formasi yang secara alami terdapat di dalam reservoir ikut terangkat bersama minyak dan gas. Volume air terproduksi dapat mencapai sembilan kali lipat dibandingkan dengan volume minyak yang dihasilkan pada fase lapangan yang sudah matang. Air terproduksi merupakan limbah cair yang muncul bersamaan dengan ekstraksi minyak dan gas. Komposisinya sangat kompleks—mengandung garam, logam berat, hidrokarbon, serta bahan kimia produksi—yang bervariasi tergantung lokasi dan metode ekstraksi (Fatick Nath, 2023).

Air terproduksi (*produced water*) adalah limbah cair dominan—sekitar 80 % dari total limbah cair—yang dihasilkan dalam proses eksplorasi dan produksi industri migas. Limbah ini mengandung berbagai kontaminan berbahaya seperti minyak, COD, TDS, amonia, alkalinitas, dan total hardness, sehingga memerlukan pengolahan pretreatment sebelum dibuang atau digunakan kembali (Said, dkk (2021). Air terproduksi merupakan limbah utama industri migas dengan volume sangat besar. Di Amerika Utara saja, produksi air terproduksi mencapai sekitar 75 juta barel per hari, jumlah ini hampir lima kali lipat dibandingkan produksi minyak (Cillia A, dkk, 2024). Studi terbaru menunjukkan bahwa Lapangan Permian menghasilkan sekitar 20 juta barel air per hari, lebih dari dua kali lipat produksi minyak di wilayah yang sama. Hal ini menegaskan bahwa pengelolaan air terproduksi menjadi tantangan serius dalam industri migas (Stella I, dkk, 2024). Dalam konteks industri migas Indonesia, volume air terproduksi yang besar menjadi salah satu tantangan utama pengelolaan lingkungan. Beberapa lapangan migas di Sumatera dan Kalimantan dilaporkan menghasilkan air terproduksi dalam jumlah signifikan, mencapai jutaan barel per hari (Said, dkk, 2021). Di Amerika Serikat saja, volumenya naik dari sekitar 20 miliar barel per tahun pada 2007 menjadi 25 miliar barel per tahun pada 2021 (Cilia Abdel Hamid, 2024). Di basis produksi Permian (Texas), area ini menghasilkan sekitar 20 juta barel air terproduksi per hari, lebih dari dua kali lipat produksi minyaknya 6,5 juta barel per hari (Amanda Drane, 2024).

Komposisi Air Terproduksi

Komposisi air terproduksi sangat kompleks karena merupakan campuran antara air formasi, air injeksi, serta bahan kimia tambahan dari proses produksi. Beberapa parameter pencemar yang umum terdapat pada air terproduksi adalah minyak dan lemak, padatan tersuspensi (TSS), total padatan terlarut (TDS), logam berat (Fe, Mn, Ba, Pb, dll.), bahan organik terlarut (COD, BOD), serta senyawa berbahaya seperti fenol, sulfat, amonia, dan BTEX (benzena, toluena, etilbenzena, xilen) ([Neff, 2002]; [Iggunu & Chen, 2014]). Kandungan Kimia Kompleks dan Berbahaya: Air terproduksi mengandung minyak, padatan tersuspensi, logam berat, garam tinggi, bahan kimia produksi, serta senyawa seperti PAH, fenol, bahkan material radioaktif. Studi menunjukkan bahwa terdapat sekitar 400 juta ton air terproduksi dari ladang Laut Utara per tahun, dengan pelepasan PAH yang berdampak toksik terhadap ekosistem laut (Sund, dkk, 2009).

Kandungan air terproduksi menurut Studi Internasional – Basin Permian & Lainnya (MDPI, 2022) Merangkum data komposisi air terproduksi dari berbagai ladang minyak, termasuk Permian Basin. Beberapa karakteristiknya:

- Density: 1.014–1.140 kg/m³
- Conductivity: 4.200–58.600 µS/cm
- COD: ±1.220 mg/L
- TSS: 1,2–1.000 mg/L
- pH: 4,3–10
- Total oil: 2–565 mg/L
- BTEX: 0,39–35 mg/L
- Chloride: 80–200.000 mg/L
- Ammonia nitrogen: 10–300 mg/L
- Heavy metals (berbagai konsentrasi):
 - Calcium: 13–25.800 mg/L
 - Sodium: 132–97.000 mg/L

- Barium: 1,3–650 mg/L
- Arsenic: <0,005–0,3 mg/L
- Mercury: <0,001–0,002 mg/L

Tabel 1. Ringkasan Perbandingan Komposisi Air Terproduksi

Sumber / Lokasi	TDS (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	pH / Kondisi Lain
Permian & ladang lain	80–200.000	±1.220	1,2–1.000	pH 4,3–10; BTEX, logam berat
Wonocolo (Indonesia)	1.714	77,9	90	Turbiditas 105 NTU
Minas, Riau (Indonesia)	±5.420	not specified	not specified	pH netral; salinitas 0,7%

Tabel 2. Baku Mutu Air Terproduksi (On-Shore) berdasarkan Permen LH No. 19/2010

Parameter	Baku Mutu Maks.
Sulfida terlarut (H ₂ S)	1 mg/L
Amonia (NH ₃ -N)	10 mg/L
Merkuri (Hg) total	0,005 mg/L
Arsen (As) total	0,5 mg/L
Temperatur	≤ 45 °C
pH	6–9
COD	200 mg/L
Minyak & Lemak	(sekitar 15 mg/L untuk drainase)
TDS	4.0 /L

Dampak Lingkungan Air Terproduksi

Setiap tahun, diperkirakan ratusan juta ton produced water dibuang ke lingkungan global, misalnya sekitar 400 juta ton per tahun dari lapangan di Laut Utara saja. Limbah ini dapat mencemari air permukaan dan tanah, berdampak negatif terhadap ekosistem serta kesehatan manusia, sehingga menuntut pengelolaan yang aman dan berkelanjutan. Pembuangan air terproduksi tanpa pengolahan yang memadai dapat menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan, terutama pencemaran air permukaan, tanah, dan biota perairan. Kandungan minyak dan lemak yang tinggi akan membentuk lapisan film di permukaan air sehingga mengurangi kadar oksigen terlarut, sementara kandungan logam berat dapat bersifat toksik dan terakumulasi dalam rantai makanan. Oleh karena itu, air terproduksi termasuk dalam kategori limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) menurut PP RI No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Proyeksi Reuse di Permian: Studi memperkirakan bahwa volume air terproduksi yang bisa digunakan kembali (misalnya untuk industri atau irigasi) berada antara 8–16 juta barel per hari dalam beberapa tahun ke depan—idealnya antara 2023–2027 (Stella I. Eyitayo, 2023). Potensi pemanfaatan ulang air terproduksi diproyeksikan dapat mencapai 8–16 juta barel per hari antara 2023–2027, khususnya di wilayah dengan produksi migas intensif seperti Permian Basin (Royal Society of Chemistry, 2023). Injeksi air terproduksi ke dalam sumur pembuangan telah dikaitkan dengan peningkatan kejadian gempa bumi. Di Permian Basin, jumlah gempa meningkat dari 42 kejadian pada 2017 menjadi 671 kejadian pada 2022 akibat metode pembuangan ini (Wall Street Journal, 2023). Pada 2021, diperkirakan 4,2 triliun liter air terproduksi dihasilkan dari aktivitas migas di daratan Amerika Serikat. Sebagian besar (98%) dibuang melalui sumur pembuangan, menimbulkan risiko besar terhadap air tanah serta kesehatan masyarakat (Clark et al., 2025).

Risiko Lingkungan & Kesehatan: Dipublikasikan tahun 2025, studi menyebutkan bahwa sekitar 4,2 triliun liter air terproduksi berasal dari pengembangan migas di daratan AS pada 2021. Pemborosannya (injeksi ke dalam sumur pembuangan) menyumbang sekitar 98 % dari total pengelolaan, dan paparan lingkungan melalui tumpahan atau penggunaan yang tidak benar menimbulkan risiko kesehatan serius (ayusha Ariana, 2025). Dampak Injeksi ke Sumur: Metode ini telah dikaitkan dengan peningkatan gempa berkekuatan tinggi dan penurunan kualitas air tanah. Di Permian Basin, sejak 2017, jumlah gempa naik drastis dari 42 menjadi 671 kejadian pada 2022 (benoit morenne, 2024). Inovasi Teknologi Reuse & Reuse Penal Usaha: Pada konferensi 2025 di Houston, diskusi fokus pada pengolahan, daur ulang, dan monetisasi air terproduksi—dengan salah satu ide adalah penggunaannya sebagai air pendingin untuk data center atau pemakaian lain yang mengurangi ketergantungan terhadap air tawar (Mella McEwen, 2025). Regulasi dan

Legislasi untuk Reuse: Texas telah mengesahkan kebijakan yang memungkinkan perusahaan minyak menjual air hasil fracking untuk irigasi ataupun mengisi kembali aliran sungai, meskipun ada kekhawatiran terkait potensi risiko kesehatan dan tingginya konsumsi energi untuk pemurnian (Brammhi Balarajan, 2025)

Teknologi Pengolahan Air Terproduksi

Terdapat berbagai teknologi pengolahan air terproduksi yang dapat digunakan di industri minyak dan gas, masing-masing dengan karakteristik biaya modal, biaya operasional, serta aliran limbah yang berbeda. Dalam menentukan solusi pengolahan, operator harus mempertimbangkan berbagai aspek teknis dan ekonomis dari teknologi yang tersedia. Beberapa teknologi membutuhkan ruang yang luas sehingga tidak selalu layak diterapkan pada lokasi tertentu, sementara teknologi lain hadir dalam bentuk sistem yang lebih ringkas, terpasang di atas skid, dan mampu beradaptasi dengan kondisi produksi yang beragam. Namun demikian, penggunaan peralatan khusus untuk mengelola air terproduksi sering kali memerlukan biaya yang sangat tinggi. Pada tahap awal pengembangan lapangan minyak dan gas, beban biaya listrik maupun bahan kimia yang besar mungkin sulit diterima. Selain itu, limbah hasil pengolahan air terproduksi dapat kehilangan statusnya sebagai limbah minyak dan gas, sehingga pengelolaannya menjadi lebih kompleks dan mahal. Oleh karena itu, pemilihan teknologi yang tepat menjadi krusial. Bagian berikut akan membahas berbagai teknologi yang digunakan dalam pengolahan air terproduksi, lengkap dengan contoh penerapannya di lapangan.

A. Adsorpsi

Metode adsorpsi merupakan salah satu teknik yang sangat efektif untuk menyingkirkan sebagian besar kontaminan organik dari air terproduksi. Proses ini bekerja melalui mekanisme perpindahan massa, di mana senyawa atau zat terlarut dipindahkan dari fase cair menuju permukaan fase padat, lalu berinteraksi dan menempel melalui ikatan fisik maupun kimia. Efisiensi adsorpsi dalam menghilangkan polutan dilaporkan dapat mencapai hingga 99,9% [Rashid R, dkk, 2021]. Salah satu metode mengelola limbah cair industri ialah metode adsorpsi. Adsorpsi membagi fase cair-cair, gas-cair, cair-padat, atau cair-padat. Dalam proses adsorpsi, istilah 'adsorbat' dan 'adsorben' mengacu pada kedua zat yang diserap dan penyerap [Faisal, dkk. 2025]. Secara umum, tahapan proses adsorpsi terdiri atas tiga langkah utama yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik adsorbat, adsorben, serta matriksnya. Langkah pertama adalah perpindahan adsorbat menuju permukaan luar adsorben. Selanjutnya, molekul terlarut berdifusi ke dalam pori-pori partikel adsorben. Tahap terakhir melibatkan proses penempelan dan pelepasan zat terlarut pada situs aktif adsorben. Oleh karena itu, idealnya suatu adsorben harus memiliki jumlah situs pengikatan yang memadai agar dapat menyerap polutan maupun zat pewarna dengan efektif [Rashid R, dkk, 2021].

Pada pengolahan produced water, proses adsorpsi berlangsung ketika senyawa organik, minyak terdispersi, fenol, BTEX (benzena, toluena, etilbenzena, dan xilena), maupun logam berat berpindah dari fase cair menuju permukaan adsorben. Kontaminan tersebut kemudian terikat melalui interaksi fisik (van der Waals), ikatan hidrogen, gaya elektrostatik, maupun pembentukan ikatan kimia pada gugus aktif adsorben. Karbon aktif merupakan adsorben yang paling banyak digunakan karena memiliki luas permukaan tinggi dan struktur pori yang mampu mengadsorpsi molekul organik secara efektif. Selain karbon aktif, zeolit, biochar, silika termodifikasi, graphene oxide, serta material berbasis nanokomposit juga banyak dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap polutan kompleks dalam produced water.

Dalam praktiknya, beragam jenis adsorben telah digunakan untuk pengolahan air limbah, di antaranya karbon aktif, alumina, bio-adsorben, lempung, oksida logam, silika, dan titania [Azam, K, dkk, 2020]. Di antara material tersebut, karbon aktif dikenal sebagai salah satu adsorben paling unggul karena struktur berpori dan luas permukaannya yang besar, sehingga mampu menyerap berbagai macam polutan dengan efisiensi tinggi. Selain efektif, karbon aktif juga bersifat ekonomis, tidak beracun, dan ramah lingkungan [Rashid R, dkk, 2021].

Belakangan ini, pemanfaatan nanomaterial sebagai adsorben mulai banyak diteliti karena menawarkan berbagai keunggulan, seperti luas permukaan yang lebih besar, kemampuan mencegah pembentukan flok, serta menyediakan lebih banyak situs aktif untuk mengikat kontaminan. Keunggulan lainnya adalah sifatnya yang dapat digunakan kembali berulang kali tanpa kehilangan efektivitas, sehingga menjadikannya alternatif yang lebih hemat biaya untuk jangka panjang.

B. Membran

Membran merupakan material semipermeabel berukuran mikroskopis yang berfungsi memisahkan komponen dengan perbedaan ukuran melalui penerapan gaya dorong tertentu [Tamunokuro, K, 2022].

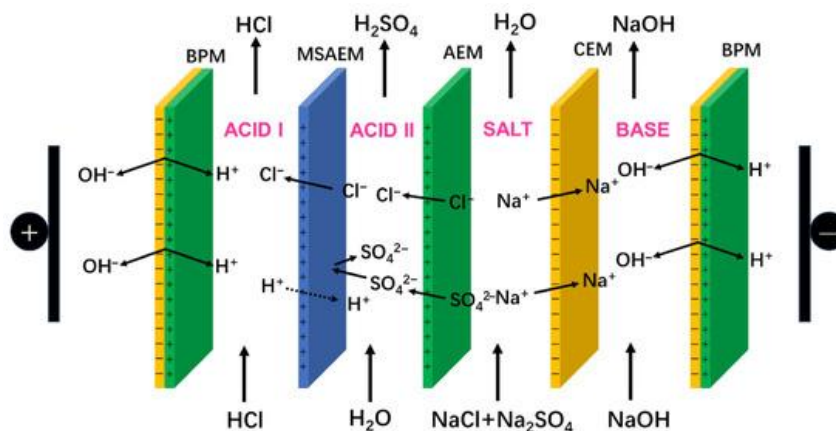
Umumnya, membran dibuat dari polimer, keramik, atau logam, di mana jenis bahan ini sangat memengaruhi sifat, kinerja, serta efektivitas membran dalam proses pemurnian air [Shahid, M.K. 2020]. Berdasarkan ukuran pori serta kemampuan penolakannya terhadap partikel, membran dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori utama, yaitu mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), dan reverse osmosis (RO) [Bolto, B. 2020]. Secara lebih rinci, membran MF memiliki ukuran pori antara beberapa mikrometer hingga $0,1\ \mu\text{m}$, membran UF berada pada kisaran $0,1\text{--}0,01\ \mu\text{m}$, membran NF berkisar $0,01\text{--}0,001\ \mu\text{m}$, sedangkan membran RO memiliki ukuran pori yang sangat kecil yaitu sekitar $0,001\text{--}0,0001\ \mu\text{m}$ [Olajire, A.A.]. Untuk meningkatkan kinerja sistem ini, para peneliti telah melakukan berbagai pendekatan, mulai dari modifikasi material hingga optimasi struktur pori membran [Fakhraee, M. 2019 & Tetteh, E.K. 2021]. Hingga kini, banyak penelitian telah diselesaikan dan riset lanjutan terus dilakukan guna menemukan inovasi baru dalam meningkatkan efisiensi membran [Rahighi, R. 2022].

Dalam aplikasinya, teknologi mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi sering dimanfaatkan untuk memisahkan minyak dari air. Sementara itu, pemanfaatan membran pada pengolahan air terproduksi mencakup berbagai tujuan, mulai dari pemrosesan awal, pemisahan padatan tersuspensi, penghilangan minyak, hingga desalinasi. Selain sistem berbasis tekanan seperti MF, UF, NF, dan RO, tersedia pula bioreaktor membran (MBR) yang mengintegrasikan proses biologis dengan filtrasi membran, sehingga menjadi opsi yang menjanjikan untuk pengolahan air terproduksi. Selain itu, teknologi distilasi membran juga menunjukkan potensi besar untuk mendukung pemanfaatan kembali air terproduksi [Siagian, U.W.R. 2018]. Elektrodialisis (ED) menjadi metode desalinasi berbasis membran lainnya yang relevan untuk diaplikasikan [Shahid, M.K. 2023]. Secara keseluruhan, setiap jenis teknologi membran dalam pengolahan air terproduksi memiliki karakteristik dan tingkat efektivitas yang berbeda, sehingga pemilihan metode yang tepat perlu disesuaikan dengan tujuan pengolahan.

Pemisahan menggunakan membran didasarkan pada perbedaan ukuran molekul, muatan ion, dan tekanan transmembran. Ketika tekanan diberikan, molekul air dapat melewati pori membran sehingga membentuk aliran permeat, sedangkan minyak, padatan tersuspensi, bakteri, maupun ion tertentu tertahan sebagai retentat. Semakin kecil ukuran pori membran, semakin tinggi kemampuan penyisihan kontaminan, tetapi tekanan operasi yang diperlukan juga meningkat.

C. Elektrodialisis

Proses pemisahan elektrokimia bekerja dengan cara memindahkan ion melalui membran penukar ion menggunakan arus listrik searah. Teknologi ini umumnya diaplikasikan untuk desalinasi air limbah. Ketika gaya dorong diterapkan, ion-ion dari air umpan akan bergerak menuju elektroda dengan muatan berlawanan, yaitu katoda dan anoda, sehingga terbentuk aliran konsentrat dan aliran yang lebih encer [Salas, B.V. 2012]. Padatan terlarut dalam air biasanya berupa kation dan anion, yang masing-masing tertarik ke elektroda sesuai polaritasnya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Membran yang ditempatkan di antara pasangan elektroda memiliki fungsi selektif: membran bermuatan positif hanya melewatkan anion, sementara membran bermuatan negatif memungkinkan pergerakan kation [Drewes, J. 2009]. Untuk menjaga aliran air umpan di sepanjang permukaan membran, digunakan lembaran spacer di antara pasangan membran [[Arthur, J.D. 2005]].

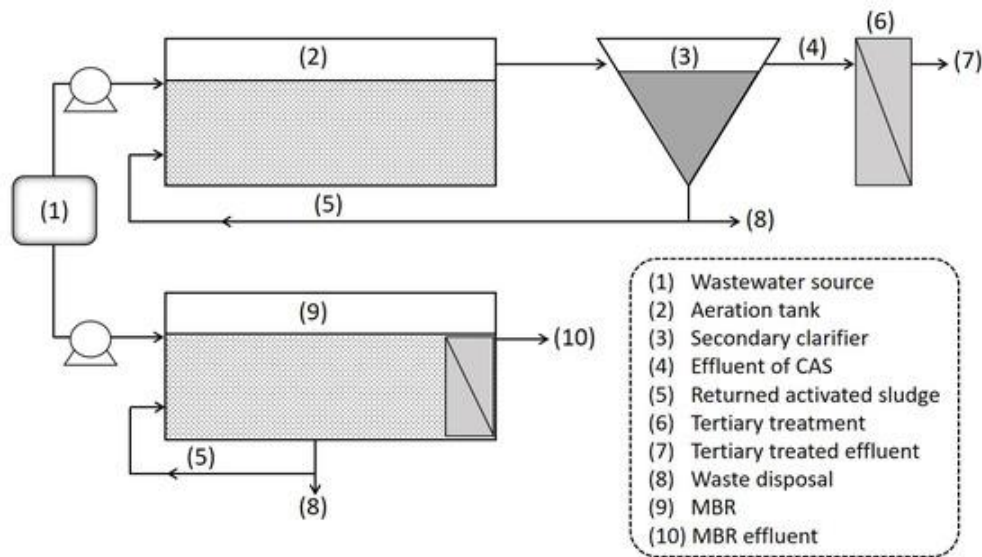


Gambar 1. Ilustrasi skema tumpukan ED inovatif (SBMED) [109].

Berdasarkan prinsip kerja pada Gambar 7, ion bermuatan positif seperti natrium (Na^+) bergerak menuju katoda, sedangkan ion bermuatan negatif seperti klorida (Cl^-) menuju anoda. Ion-ion yang memiliki muatan sejenis dengan membran pertukaran ion akan tertolak, sehingga menyebabkan terjadinya pemisahan konsentrat dengan air hasil desalinasi di kompartemen unit ED. Kedua jenis aliran, baik air hasil desalinasi maupun konsentrat, kemudian dikeluarkan secara kontinu dari unit. Sistem ED umumnya terdiri dari tumpukan membran yang berisi ratusan pasang sel, dengan elektroda diletakkan di sisi luar tumpukan. Sebelum air diproses melalui ED, dilakukan pra-perlakuan untuk melindungi membran dari kontaminan yang dapat menyumbat saluran sempit. Sementara itu, penyearah digunakan untuk mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Setelah proses ED selesai, pasca-perlakuan dilakukan untuk menstabilkan kualitas air, misalnya dengan menghilangkan gas terlarut seperti hidrogen sulfida serta menyesuaikan pH [Arthur, J.D. 2005]. Metode ED dinilai cocok untuk pengolahan air dengan kadar TDS rendah, namun dianggap kurang ekonomis ketika diterapkan pada air terproduksi dengan salinitas tinggi [Dallbauman, L. 2005]. Walaupun secara teknis ED menunjukkan potensi yang baik dalam pengolahan air terproduksi, penerapannya masih terbatas pada skala laboratorium [Sirivedhin, T. 2004]. Umur pakai membran ED biasanya berkisar antara empat hingga lima tahun. Tantangan terbesar dari teknologi ini adalah tingginya biaya operasional serta masalah fouling membran yang kerap terjadi.

D. Membran Bioreaktor

Bioreaktor membran (MBR) dikenal sebagai salah satu teknologi paling efektif dalam pengolahan air terproduksi berkat karakteristiknya yang khas [Asante-Sackey, D.2022]. Tidak seperti sistem lumpur aktif konvensional (CAS) yang memerlukan unit penjernih sekunder, MBR mampu menggantikan fungsi tersebut karena membran yang digunakan sudah berperan langsung sebagai pemisah padatan [Eddy, M. 2014 & Mutamim, N.S.A. 2012]. Perbandingan visual antara sistem MBR dan CAS dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi skema proses lumpur aktif konvensional (CAS) dan MBR.

MBR merupakan sistem tunggal yang menggabungkan proses biologis dan fisik secara bersamaan, sehingga menjadikannya teknologi yang sangat berhasil digunakan dalam pengolahan air limbah. Beberapa keuntungan utama MBR meliputi kesederhanaan dalam sistem kontrol, kemampuan untuk mengatur waktu retensi padatan (SRT), kebutuhan lahan yang lebih kecil, serta fleksibilitas dalam mengendalikan waktu retensi hidrolik (HRT) [Melin, T. 2006]. Efisiensi pemisahan dan kualitas effluent sangat dipengaruhi oleh ukuran pori membran. Namun, semakin kecil ukuran pori, semakin besar hambatan aliran cairan yang ditimbulkan, sehingga sistem membutuhkan tekanan operasi yang lebih tinggi [Olajire, A.A. 2020].

Penelitian yang dilakukan oleh Frank dkk. menunjukkan bahwa penggunaan sistem hibrida sequencing batch-reactor-MBR (SBR-MBR) untuk mengolah air terproduksi maupun air limbah domestik dapat menurunkan kebutuhan oksigen kimia (COD) lebih dari 90% [Frank, V.B. 2017]. Hasil serupa dilaporkan oleh Fakhru'l-Razi dkk. [Fakhru'l-Razi, A. 2010] dan Pendashteh dkk. [Pendashteh, A.R. 2012] melalui studi skala laboratorium, di mana proses MBR mampu mengurangi total organic carbon (TOC) dan

total dissolved solids (TDS) hingga 92% dan 91% pada konsentrasi masing-masing 16 g/L dan 35 g/L, baik menggunakan air terproduksi asli maupun sintetis.

Dalam penelitian lain, sistem MBR skala laboratorium diaplikasikan untuk mengolah air terproduksi sintetis dengan variasi konsentrasi TDS. Hasilnya menunjukkan penurunan COD sebesar 83% pada TDS 64,4 g/L dan mencapai 95% pada TDS 144 g/L [Sharghi, E.A. 2014 & 2013]. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa teknologi MBR, baik secara tunggal maupun dalam bentuk sistem hibrida, sangat efektif dalam menurunkan berbagai parameter pencemar seperti COD, TOC, dan TDS dari air terproduksi.

Sebuah penelitian dilakukan untuk menilai kinerja pengolahan air terproduksi dari ladang minyak (OPW) menggunakan dua sistem membran bioreaktor terendam, yaitu MBR-A dan MBR-B [Fulazzaky, M. 2020]. Kedua sistem dijalankan pada kondisi operasi yang sama, yakni pH netral (7) dan suhu 25 °C. Fokus utama penelitian adalah menurunkan kadar kontaminan seperti kebutuhan oksigen kimia (COD), minyak dan lemak (O&G), serta amonia (NH_3). Untuk menjaga konsentrasi oksigen terlarut (DO) pada sekitar 3 mg/L, aliran udara dikendalikan dengan rotameter yang disetel pada 8 L/menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa baik MBR-A maupun MBR-B mampu mencapai efisiensi penyisihan lebih dari 90% terhadap COD, O&G, dan NH_3 , dengan efisiensi penghilangan minyak dan lemak mencapai 96% [Fulazzaky, M. 2020]. Meskipun teknologi MBR terbukti efektif dalam menangani limbah dengan beban pencemar tinggi [Mutamim, N.S.A. 2012], penerapannya tetap menghadapi kendala, terutama masalah fouling dan foaming [Wu, M 2020]. Penumpukan partikel maupun zat terlarut pada permukaan membran dapat menurunkan permeabilitas, mengurangi efisiensi filtrasi, serta mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan [Dickhout, J.M. 2017 & Aslam, M. 2018]. Jika tidak dikelola dengan baik, hal ini berdampak negatif terhadap kualitas effluen yang dibuang ke lingkungan [Amin, N. 2023].

Fouling pada membran tidak hanya menurunkan efisiensi pengolahan, tetapi juga meningkatkan kebutuhan energi dan biaya operasional [Shahid, M.K 2020]. Dampaknya meliputi berkurangnya kemampuan sistem dalam menghilangkan padatan tersuspensi, senyawa organik, maupun patogen, sehingga kualitas air hasil olahan bisa terganggu. Oleh karena itu, operator perlu menerapkan strategi mitigasi yang tepat, seperti pembersihan membran secara rutin, pengaturan kondisi operasi yang optimal, serta penggunaan teknologi pemantauan dan kontrol yang canggih, agar sistem tetap andal serta menghasilkan effluen berkualitas tinggi yang aman untuk dibuang atau digunakan kembali.

Proses pembersihan MBR dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kondisi operasi, jenis material membran, sumber fouling, dan konfigurasi modul [Shahid, M.K 2020 & Nguyen, L.N 2020]. Metode pembersihan dapat dilakukan secara *in situ*, di mana membran dibersihkan tanpa dikeluarkan dari sistem, maupun *ex situ*, dengan melepas membran untuk dibersihkan di luar unit. Pembersihan *in situ* umumnya mencakup pendekatan fisik, kimia, maupun biologis, sementara metode *ex situ* lebih sering diterapkan pada pengotoran berat yang sulit diatasi. Pemilihan teknik pembersihan sangat bergantung pada karakteristik fouling serta jenis membran yang digunakan. Walaupun berbagai metode fisik, kimia, dan biologis sudah diterapkan, pada operasi jangka panjang sering ditemukan kasus di mana sebagian fouling tetap tidak dapat dihilangkan sepenuhnya. Oleh karena itu, penerapan strategi pembersihan yang menyeluruh, dikombinasikan dengan perawatan rutin serta pemantauan kinerja sistem, menjadi kunci untuk menjaga performa MBR dalam jangka panjang dan meminimalkan dampak fouling terhadap efektivitas pengolahan.

• Elektrokoagulasi

Elektrokoagulasi (EC) merupakan salah satu teknologi lanjutan yang banyak dikembangkan untuk pengolahan air terproduksi (PW). Manilal dkk. [Madhavan, M.A. 2021] melaporkan metode baru berbasis EC dengan sistem polaritas bergeser, yang mampu menghilangkan polutan dari PW melalui mekanisme pasivasi elektroda. Evaluasi kinerja sistem dilakukan berdasarkan efisiensi penyisihan polutan, kebutuhan energi, serta biaya operasional. Hasil percobaan menunjukkan bahwa metode ini efektif menghilangkan 99% COD dan 98% minyak serta lemak, dengan pembentukan lumpur yang lebih sedikit dibandingkan metode elektrokimia lain seperti koagulasi dan flokulasi [Madhavan, M.A. 2021]. Sejumlah penelitian juga menyoroti faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas EC, seperti kondisi pH, durasi elektrolisis, jarak antar elektroda, dan konsentrasi elektrolit [Madhavan, M.A. 2021]. Kendati demikian, masalah utama yang sering dilaporkan adalah terjadinya pasivasi elektroda selama operasi berkelanjutan. Pasivasi ini terjadi akibat terbentuknya lapisan oksida pada permukaan elektroda yang menghambat pelarutan logam dari anoda maupun transfer elektron dari katoda, sehingga meningkatkan resistansi dan konsumsi energi [Madhavan, M.A. 2021].

Beberapa upaya telah dilakukan untuk mengatasi pasivasi, di antaranya dengan penerapan sakelar pengubah polaritas, penggunaan arus bolak-balik (AC), serta gelombang ultrasonik. Manilal dkk. [Madhavan, M.A. 2021] misalnya, menguji sistem batch EC dengan pengubah polaritas untuk mengolah

air limbah dengan karakteristik serupa PW. Hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi penghilangan polutan meningkat secara signifikan dengan metode ini, meskipun laju penyisihan sangat dipengaruhi oleh kerapatan arus, sehingga masih diperlukan penelitian lanjutan terutama dalam operasi aliran kontinu.

Selain itu, Moeen dkk. [Gholami, M. 2021] meneliti beberapa sistem EC menggunakan elektroda besi dengan metode elektro-aktivasi dan aktivasi termal untuk mengolah PW nyata. Hasil percobaan menunjukkan kemampuan EC dalam menyingkirkan hampir seluruh polutan hidrokarbon dengan biaya operasi jauh lebih rendah dibandingkan teknologi Advanced Oxidation Processes (AOP) [34]. Secara spesifik, percobaan ini mampu menghilangkan 96% H_2S , 99% minyak dan lemak, 84% COD, serta 97% kekeruhan. Namun, sistem tersebut masih belum optimal dalam menurunkan kandungan amonia dan senyawa organik terlarut, sehingga memerlukan penelitian lanjutan untuk peningkatan kinerja [Gholami, M. 2021].

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak peneliti menaruh perhatian pada pengembangan proses elektrokoagulasi (EC). Salah satunya, Ezerie dkk. [Ezechi, E.H. 2020] meneliti penghilangan boron secara kontinu dari air terproduksi (PW) dengan sistem elektroda aluminium dan besi, menggunakan variasi jarak elektroda dan waktu elektrolisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan boron yang dicapai mencapai sekitar 50%. Boron sendiri merupakan senyawa anorganik yang sulit dihilangkan karena bentuk ioniknya sangat bergantung pada pH larutan. Pada pH rendah, boron hadir sebagai asam borat, sedangkan pada pH tinggi ia berbentuk ion borat. Keberadaan boron dalam PW juga berpotensi mengganggu proses lanjutan seperti reverse osmosis (RO), pengolahan biologis, maupun elektrodialisis. Oleh sebab itu, kebutuhan akan teknologi yang efektif untuk penghilangan boron semakin meningkat [Ezechi, E.H. 2020].

Elektrokoagulasi menjadi salah satu teknologi alternatif yang dinilai menjanjikan dibandingkan metode pengolahan konvensional, karena memiliki biaya operasional yang relatif rendah, efisiensi tinggi, serta mekanisme kerja berbasis oksidasi elektroda dalam medan listrik. Oksidasi pada anoda menghasilkan ion logam yang dapat menetralkan polutan dan mengendapkannya ke fase air [Ezechi, E.H. 2020]. Studi yang dilakukan Ezerie dkk. melaporkan bahwa penurunan kadar boron mencapai 60–80% menggunakan elektroda aluminium, serta 50–70% dengan elektroda besi pada waktu retensi 30–45 menit. Efisiensi ini meningkat seiring bertambahnya jarak antar elektroda dari 0,5 cm hingga 1,5 cm. Hasil ini menegaskan potensi EC untuk penghilangan boron, meskipun penelitian lebih lanjut masih diperlukan guna meningkatkan kinerja proses [Ezechi, E.H. 2020].

Elektrokoagulasi merupakan proses pengolahan air yang berlangsung secara elektrolisis. Pada metode elektrokoagulasi terdapat elektroda sebagai katoda maupun anoda. Bagian anoda terjadinya pelepasan koagulan aktif berupa ion logam dalam larutan elektrolit, sedangkan pada bagian katoda reaksi elektrokimia terjadi berupa pelepasan gas hydrogen [Siti, W.S, dkk, 2025]

Material elektroda menjadi faktor krusial dalam mengoptimalkan kinerja EC. Pemilihan material sangat ditentukan oleh komposisi air baku dan sifat oksidasi yang diperlukan. Besi dan aluminium adalah material yang paling banyak diaplikasikan karena ketersediaannya luas, harga murah, serta potensi oksidasinya yang rendah. Namun, evaluasi lebih mendalam masih diperlukan terkait penggunaannya dalam sistem EC kontinu untuk penghilangan boron, sebab penelitian sebelumnya belum banyak membahas pemanfaatan kedua logam ini secara spesifik [Ezechi, E.H. 2020].

Selain itu, Golnoosh dkk. [Khajouei, G. 2021] mengeksplorasi teknologi alternatif berupa pelunakan air terproduksi dengan memanfaatkan katolit pH tinggi yang dihasilkan dari proses elektrolisis air garam. Pendekatan ini tidak hanya membantu menurunkan kandungan ion divalen, tetapi juga menghasilkan soda kaustik dan klorin yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia eksternal serta dampak lingkungannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada pH 11, lebih dari 90% magnesium berhasil dihilangkan, sedangkan kalsium hanya berkurang kurang dari 10% akibat tingginya alkalinitas bikarbonat pada PW. Karena satu teknologi tidak dapat menghilangkan semua komponen PW secara menyeluruh, sebagian besar peneliti menyarankan penggunaan sistem pengolahan gabungan. Namun, kombinasi teknologi membran masih menghadapi kendala serius berupa fouling akibat konsentrasi kation dan senyawa organik yang tinggi dalam PW, sehingga dibutuhkan pra-pengolahan sebelum tahap membran [Khajouei, G. 2021].

Teknologi alkalisasi dengan bahan kimia seperti soda kaustik dinilai sebagai metode yang hemat biaya karena mendorong presipitasi ion divalen melalui reaksi kimia. Oleh karena itu, pemanfaatan air terproduksi untuk proses elektrolisis air garam dipandang berpotensi besar dalam menghasilkan alkali setelah ion multivalen dan bahan organik berhasil dihilangkan. Penelitian ini menekankan perlunya kajian lebih lanjut untuk menguji kelayakan penerapan metode elektrolisis tersebut pada pengolahan PW nyata [Khajouei, G. 2021].

Chia dkk. [Khor, C.M. 2020] melakukan kajian komparatif antara koagulasi kimia (CC) dan koagulasi elektrokimia (EC) dengan mempertimbangkan aspek kinerja, konsumsi energi, serta biaya operasional. Salah satu tahap penting dalam pengolahan air terproduksi adalah penghilangan hidrokarbon yang teremulsi, yang biasanya memerlukan penambahan bahan kimia koagulan untuk mendestabilisasi minyak. Pada proses koagulasi kimia konvensional, koagulan berupa garam logam atau polimer dicampurkan secara cepat ke dalam air guna menetralkan muatan partikel, diikuti oleh proses pengadukan lambat untuk memperbesar agregasi tetesan minyak sebelum tahap pemisahan. Sementara itu, pada proses EC digunakan elektroda pengorbanan (misalnya aluminium atau besi) yang dialiri arus searah (DC) untuk menghasilkan ion logam dari anoda. Ion-ion ini kemudian membentuk endapan hidroksida logam yang berfungsi mendestabilisasi partikel sehingga memicu proses flokulasi [Khor, C.M. 2020].

Dalam laporan tersebut disebutkan bahwa CC dinilai lebih sederhana serta relatif ekonomis, meskipun perbandingan langsung dengan EC cukup sulit dilakukan. Hal ini karena CC mengandalkan penambahan koagulan kimia secara intermiten, sedangkan EC secara berkesinambungan menghasilkan koagulan dari elektroda pengorbanan. Kondisi operasi dengan demikian menjadi faktor kunci dalam menentukan efektivitas kedua metode tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CC lebih unggul dalam menurunkan COD dibandingkan EC dengan elektroda besi, namun kurang efektif dalam menghilangkan minyak dan lemak meskipun dosis koagulan ditingkatkan. Sebaliknya, EC dengan elektroda besi pada konsentrasi tinggi terbukti mampu menurunkan COD sekaligus O&G dengan lebih baik, serta menawarkan proses yang lebih praktis karena tidak memerlukan tahapan tambahan seperti filtrasi atau flotasi sebagaimana pada CC [Khor, C.M. 2020].

Meski begitu, kedua teknologi masih menghadapi keterbatasan yang perlu diatasi. Pada CC, overdosis koagulan justru menurunkan kinerja proses, selain menimbulkan persoalan biaya dan penggunaan bahan kimia yang besar. Di sisi lain, meskipun EC menunjukkan prospek yang menjanjikan, tantangan teknis seperti efisiensi energi dan pengendalian pasivasi elektroda masih menjadi hambatan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan sangat dibutuhkan untuk meningkatkan efektivitas kedua metode ini dalam pengolahan air terproduksi [Khor, C.M. 2020].

Nidheesh dkk. [Nidheesh, P.V. 2021] melaporkan penggunaan teknologi elektrokoagulasi (EC) yang dikombinasikan dengan proses degradasi untuk meningkatkan efektivitas pengolahan air terproduksi (PW). Pemilihan metode degradasi—seperti foto-Fenton atau ozonasi elektro-Fenton—sangat ditentukan oleh karakteristik PW guna mencapai tingkat penghilangan polutan yang maksimal. Berbagai jenis proses oksidasi lanjutan (AOP), termasuk oksidasi anodik dan proses berbasis radikal sulfat, masih dapat dieksplorasi lebih jauh untuk menemukan metode yang benar-benar efisien [Nidheesh, P.V. 2021].

Studi tersebut menunjukkan bahwa gabungan antara AOP dan EC menawarkan kinerja yang sangat baik dan layak dipertimbangkan untuk mengatasi keterbatasan dalam pengolahan PW nyata. Penulis menekankan perlunya pengujian skala pilot dibanding sekadar skala laboratorium, serta pentingnya menggunakan PW asli dalam eksperimen, mengingat sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak memanfaatkan air limbah sintesis. Kombinasi EC dan proses berbasis Fenton dinilai sebagai teknologi menjanjikan, meski sejauh ini jumlah publikasi yang membahasnya masih sangat terbatas [Nidheesh, P.V. 2021].

Penelitian lain oleh Mahdieh dkk. [Mehri, M. 2021] memperlihatkan bahwa EC juga efektif dalam menghilangkan minyak dan logam berat dari PW. Eksperimen dilakukan menggunakan PW sintesis dengan berbagai jenis elektroda, seperti aluminium, besi, seng, dan tembaga. Hasilnya menunjukkan bahwa elektroda besi mampu menurunkan COD sebesar 90% pada konsentrasi garam rendah dan sekitar 80% pada konsentrasi tinggi. Sementara itu, penggunaan elektroda seng dan tembaga menghasilkan efisiensi penghilangan COD rata-rata 87% dan 85%, sedangkan elektroda aluminium menunjukkan kinerja tertinggi dengan tingkat penghilangan mencapai 95%. Namun, penelitian ini belum mengarahkan pada studi lanjutan untuk optimalisasi kinerja [Mehri, M. 2021]. Selain EC, teknologi koalesensi juga dilaporkan sebagai metode pengolahan PW yang potensial. Yiqian dkk. [Liu, Y. 2021] menjelaskan bahwa inovasi baru dapat dikembangkan melalui penggabungan berbagai metode pengolahan yang sudah ada, seperti pemisahan, sedimentasi, flotasi kompak, dan penggunaan hidrosiklon. Koalesensi sendiri merupakan proses penggabungan tetesan minyak dalam kartrid filter untuk pemurnian PW. Akan tetapi, teknik ini dinilai kurang akurat dan kurang efisien, mirip dengan keterbatasan filtrasi membran, akibat adanya celah besar di antara serat filter. Karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan teknologi ini [Liu, Y. 2021].

Beberapa studi skala besar juga telah dilakukan, seperti yang dilaporkan oleh Milinkumar dkk. [Shah, M.T. 2019], yang memperkenalkan teknologi pengolahan PW berbasis tangki pengendapan. Namun, mengingat kompleksitas komposisi PW, tidak ada satu teknologi tunggal yang mampu memberikan

pengolahan menyeluruh. Oleh sebab itu, sebagian besar peneliti sepakat bahwa kombinasi berbagai metode sangat dibutuhkan agar PW dapat dimanfaatkan kembali. Dari sisi ekonomi dan manajemen, Yiqian dkk. [Liu, Y. 2021] menyoroti bahwa sekitar 80% dari total produksi di ladang minyak merupakan air, dan pada beberapa sumur angkanya bahkan meningkat hingga sekitar 98%. Kondisi ini menegaskan urgensi inovasi teknologi pengolahan PW yang lebih efektif dan berkelanjutan.

• Aktivasi Elektrokimia

Penggunaan arus listrik dalam pengolahan air secara elektrokimia telah berkembang sebagai salah satu metode yang menjanjikan untuk proses disinfeksi. Teknik ini menghasilkan larutan air teraktivasi secara elektrokimia dengan sifat fisika-kimia yang khas, karena adanya perubahan karakteristik elektrokimia air, termasuk pH [Khorram, A.G. 2023]. Beberapa proses elektrokimia yang banyak digunakan dalam pengolahan air meliputi elektrolisis, elektroforesis, elektroflotasi, dan elektrokoagulasi, yang semuanya melibatkan perpindahan elektron, ion, serta partikel bermuatan di dalam medan listrik konstan. Ketika air ditempatkan di antara elektroda anoda (+) dan katoda (–) dengan arus searah, proses elektrolisis berlangsung pada kedua kutub dan memecah air menjadi komponen-komponen dasarnya. Pada umumnya, natrium klorida (NaCl) atau garam dapur ditambahkan ke dalam larutan tersebut, menghasilkan hipoklorit sebagai produk utama elektrolisis. Senyawa hipoklorit ini dikenal luas sebagai agen berbasis klorin yang efektif untuk membunuh mikroorganisme serta mendisinfeksi air.

Dibandingkan dengan metode disinfeksi kimia konvensional, pendekatan elektrokimia memiliki sejumlah kelebihan, antara lain desain peralatan yang sederhana, efisiensi tinggi, stabilitas yang baik, kemudahan pengoperasian, serta kemampuan untuk diatur secara otomatis. Sistem pengolahan elektrokimia juga relatif ringkas, andal, mudah dioperasikan maupun dirawat, dan dapat sepenuhnya diotomatisasi [Ibrahim, M.H. 2020]. Meski demikian, kelemahan utama dari metode ini adalah tingginya konsumsi energi yang dapat berdampak pada biaya operasional. Oleh karena itu, penerapannya lebih sesuai untuk sistem dengan kapasitas kecil hingga menengah (sekitar 10–20 m³/jam). Selain itu, teknologi ini dapat dengan mudah digabungkan dengan tahapan pengolahan lainnya untuk meningkatkan kualitas air sekaligus efektivitas sterilisasi [Ignatov, I. 2015].

Teknologi	Kelebihan	Kekurangan
Adsorpsi	Murah, sederhana, efisiensi tinggi untuk organik	Adsorben cepat jenuh
Membran	Efisiensi tinggi, kualitas air sangat baik	Fouling tinggi, biaya mahal
Elektrodialisis	Efektif untuk desalinasi	Kurang ekonomis pada TDS tinggi
Membran	Menghilangkan COD dan TOC tinggi	Fouling dan biaya operasi tinggi
Bioreaktor		
Elektrokoagulasi	Efektif untuk minyak, logam berat, COD	Pasivasi elektroda dan konsumsi energi
Aktivasi	Disinfeksi efektif tanpa banyak bahan	Konsumsi energi relatif tinggi
Elektrokimia	kimia	

Kesimpulan

Air terproduksi (produced water) dari industri minyak dan gas mengandung berbagai kontaminan organik maupun anorganik yang menuntut teknologi pengolahan yang tepat agar memenuhi standar lingkungan dan berpotensi digunakan kembali. Berbagai teknologi telah dikaji untuk tujuan ini, masing-masing dengan keunggulan dan keterbatasannya. Metode adsorpsi terbukti efektif untuk menghilangkan bahan organik dan pewarna dengan efisiensi tinggi, terutama saat menggunakan karbon aktif atau nanomaterial sebagai adsorben. Teknologi membran (MF, UF, NF, RO) memberikan kinerja unggul dalam penyisihan padatan tersuspensi, minyak, dan garam, meskipun masih menghadapi tantangan fouling yang memerlukan pra-perlakuan. Elektrodialisis (ED) menunjukkan potensi dalam desalinasi air dengan kandungan TDS rendah, namun penggunaannya pada PW berkonsentrasi tinggi masih terbatas karena masalah biaya dan fouling membran.

Sementara itu, Membran Bioreaktor (MBR) menawarkan keunggulan dengan mengintegrasikan proses biologis dan pemisahan fisik, yang terbukti mampu menurunkan COD, TOC, dan TDS secara signifikan, meski isu fouling dan biaya operasional tetap menjadi tantangan. Elektrokoagulasi (EC) menonjol sebagai teknologi hemat biaya dengan efisiensi tinggi untuk menghilangkan minyak, lemak, logam berat, serta COD, namun pasivasi elektroda dan konsumsi energi menjadi hambatan utama. Terakhir,

aktivasi elektrokimia memperlihatkan prospek besar dalam disinfeksi air karena kemampuannya menghasilkan senyawa oksidatif in situ, meski boros energi untuk kapasitas besar.

Secara keseluruhan, tidak ada satu teknologi tunggal yang mampu mengatasi kompleksitas kandungan air terproduksi. Kombinasi atau integrasi beberapa metode, seperti gabungan EC dengan AOP, MBR dengan membran tekanan, atau adsorpsi dengan pra-perlakuan kimia, berpotensi menjadi strategi paling efektif untuk menghasilkan efluen yang aman, ekonomis, dan berkelanjutan. Dengan meningkatnya kebutuhan pengelolaan air di industri migas, pengembangan sistem hybrid, optimasi kondisi operasi, serta pemanfaatan material baru (misalnya nanomaterial dan elektroda canggih) diharapkan mampu meningkatkan efisiensi sekaligus menurunkan biaya pengolahan air terproduksi di masa depan.

Daftar Referensi

- Amanda drane (2024) Wastewater is leaking from Texas oil wells. Here's why it's happening — and the dangers it poses. Houston Crhonicle : Business/Energy
- Amin, N.; Aslam, M.; Yasin, M.; Hossain, S.; Shahid, M.K.; Inayat, A.; Samir, A.; Ahmad, R.; Murshed, M.N.; Khurram, M.S. Municipal Solid Waste Treatment for Bioenergy and Resource Production: Potential Technologies, Techno-Economic-Environmental Aspects and Implications of Membrane-Based Recovery. *Chemosphere* 2023, 323, 138196. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138196
- Arthur, J.D.; Langhus, B.G.; Patel, C. Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies; All Consulting, LLC: Tulsa, OK, USA, 2005.
- Aslam, M.; Ahmad, R.; Yasin, M.; Khan, A.L.; Shahid, M.K.; Hossain, S.; Khan, Z.; Jamil, F.; Rafiq, S.; Bilal, M.R.; et al. Anaerobic Membrane Bioreactors for Biohydrogen Production: Recent Developments, Challenges and Perspectives. *Bioresour. Technol.* 2018, 269, 452–464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.050>
- Asante-Sackey, D.; Rathilal, S.; Tetteh, E.K.; Armah, E.K. Membrane Bioreactors for Produced Water Treatment: A Mini-Review. *Membranes* 2022, 12, 275. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12030275>
- Azam, K.; Raza, R.; Shezad, N.; Shabir, M.; Yang, W.; Ahmad, N.; Shafiq, I.; Akhter, P.; Razzaq, A.; Hussain, M. Development of recoverable magnetic mesoporous carbon adsorbent for removal of methyl blue and methyl orange from wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 104220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104220>
- Bolto, B.; Zhang, J.; Wu, X.; Xie, Z. A Review on Current Development of Membranes for Oil Removal from Wastewaters. *Membranes* 2020, 10, 65. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes10040065>
- Cilia Abdelhamid, Abdeldjalil Latrach, Minou Rabiei * and Kalyan Venugopal. (2025). Produced Water Treatment Technologies: A Review. *MDPI Journal: Energies*, 18, 63. DOI: 10.3390/en18010063
- Clark, C., et al. (2025). *Produced Water Composition and Management Challenges*. *Journal of Environmental Science and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.2172/1007397>
- Clark, C. E., et al. (2025). *Risks of produced water management in U.S. onshore oil and gas*. *Environmental Health Perspectives*, 133(2). PMC11966568
- Dallbauman, L.; Sirivedhin, T. Reclamation of Produced Water for Beneficial Use. *Sep. Sci. Technol.* 2005, 40, 185–200. DOI: <https://doi.org/10.1081/SS-200041910>
- Dickhout, J.M.; Moreno, J.; Biesheuvel, P.M.; Boels, L.; Lammertink, R.G.H.; de Vos, W.M. Produced Water Treatment by Membranes: A Review from a Colloidal Perspective. *J. Colloid Interface Sci.* 2017, 487, 523–534. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.10.013
- Drewes, J.; Cath, T.; Xu, P.; Graydon, J. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water: Technical Assessment of Produced Water Treatment Technologies; Colorado School of Mines: Golden, CO, USA, 2009; pp. 1–157.
- Eddy, M.; Abu-Orf, M.; Bowden, G.; Burton, F.L.; Pfrang, W.; Stensel, H.D.; Tchobanoglous, G.; Tsuchihashi, R.; Firm, A. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*; McGraw Hill Education: New York, NY, USA, 2014; ISBN 1259010791.

- Ezechi, E.H.; Isa, M.H.; Muda, K.; Kutty, S.R.M. A comparative evaluation of two electrode systems on continuous electrocoagulation of boron from produced water and mass transfer resistance. *J. Water Process Eng.* 2020, 34, 101133. DOI:10.1016/j.jwpe.2020.101133
- Faisal, D.P.I.; Muhammad; Rizka, M.; Rizka, N.; Syamsul, B. Adsorben karbon aktif dari kulit tanduk kopi (endocarp) diaplikasikan pada zat warna Methylene blue. 2025. *Chemical Engineering Journal Storage* 5:3 (Juni 2025) 359-371. DOI: <https://doi.org/10.29103/cejs.v5i3.17297>
- Fakhru'l-Razi, A.; Pendashteh, A.; Abidin, Z.Z.; Abdullah, L.C.; Biak, D.R.A.; Madaeni, S.S. Application of Membrane-Coupled Sequencing Batch Reactor for Oilfield Produced Water Recycle and Beneficial Re-Use. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 6942–6949. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.04.005
- Fakhraee, M.; Akhavan, O. Ultrahigh Permeable C2N-Inspired Graphene Nanomesh Membranes versus Highly Strained C2N for Reverse Osmosis Desalination. *J. Phys. Chem. B* 2019, 123, 8740–8752. DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b07015.
- Fatrick Nath, Mohammed Omar Sahed Chowdhury, Md. Masudur Rhaman, Navigating Produced Water Sustainability in the Oil and Gas Sector: A Critical Review of Reuse Challenges, Treatment Technologies, and Prospects Ahead. *MDPI Journal= Water* 2023, 15(23), 4088; DOI: <https://doi.org/10.3390/w15234088>
- Frank, V.B.; Regnery, J.; Chan, K.E.; Ramey, D.F.; Spear, J.R.; Cath, T.Y. Co-Treatment of Residential and Oil and Gas Production Wastewater with a Hybrid Sequencing Batch Reactor-Membrane Bioreactor Process. *J. Water Process Eng.* 2017, 17, 82–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.03.003>
- Fulazzaky, M.; Setiadi, T.; Fulazzaky, M.A. An Evaluation of the Oilfield-Produced Water Treatment by the Membrane Bioreactor. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 104417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104417>
- Genesis Water Tech (2019). Electrocoagulation Provides Economical Solution for Produced Water to Oil & Gas Companies. https://genesishwatertech.com/blog-post/electrocoagulation-provides-an-economical-produced-water-solution-to-oil-gas-companies/?utm_source=chatgpt.com
- Gholami, M.; Abbasi Souraki, B.; Pendashteh, A. Electro-activated persulfate oxidation (EC/PS) for the treatment of real oilfield produced water: Optimization, developed numerical kinetic model, and comparison with thermal/EC/PS and EC systems. *Process Saf. Environ. Prot.* 2021, 153, 384–402. DOI:10.1016/j.psep.2021.07.011
- Houston Chronicle. (2024). *Oil wastewater leaks contamination earthquakes*.
- Ibrahim, M.H.; Moussa, D.T.; El-Naas, M.H.; Nasser, M.S. A perforated electrode design for passivation reduction during the electrochemical treatment of produced water. *J. Water Process Eng.* 2020, 33, 101091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101091>
- Ignatov, I.; Gluhchev, G.; Karadzhov, S.; Miloshev, G.; Ivanov, N.; Mosin, O. Preparation of Electrochemically Activated Water Solutions (Catholyte/Anolyte) and Studying Their Physical-Chemical Properties. *J. Med. Physiol. Biophys.* 2015, 11, 1–21. <https://www.medicalbiophysics.bg/en/20405.html>
- Khorram, A.G.; Fallah, N.; Nasernejad, B.; Afsham, N.; Esmaelzadeh, M.; Vatanpour, V. Electrochemical-based processes for produced water and oily wastewater treatment: A review. *Chemosphere* 2023, 338, 139565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139565>
- Khajouei, G.; Park, H.I.; Finklea, H.O.; Ziemkiewicz, P.F.; Peltier, E.F.; Lin, L.S. Produced water softening using high pH catholyte from brine electrolysis: Reducing chemical transportation and environmental footprints. *J. Water Process Eng.* 2021, 40, 101911. DOI:10.1016/j.jwpe.2020.101911
- Khor, C.M.; Wang, J.; Li, M.; Oettel, B.A.; Kaner, R.B.; Jassby, D.; Hoek, E.M.V. Performance, energy and cost of produced water treatment by chemical and electrochemical coagulation. *Water* 2020, 12, 3426. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12123426>
- Liu, Y.; Lu, H.; Li, Y.; Xu, H.; Pan, Z.; Dai, P.; Wang, H.; Yang, Q. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. *Sci. Total Environ.* 2021, 775, 145485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485>

- Liu, Y.; Li, Y.; Lu, H.; Pan, Z.; Dai, P.; Sun, G.; Yang, Q. A full-scale process for produced water treatment on offshore oilfield: Reduction of organic pollutants dominated by hydrocarbons. *J. Clean. Prod.* 2021, 296, 126511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126511>
- Madhavan, M.A.; Antony, S.P. Effect of polarity shift on the performance of electrocoagulation process for the treatment of produced water. *Chemosphere* 2021, 263, 128052. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128052
- M.said, David B, Rizza Fadillah Fitri (2021). Treatment of Produce Water with a Combination of Electrocoagulation with Iron (Fe) Electrodes and Adsorption Using Silica and Activated Carbon. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. Vol. 11 No 1. DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.1.12490>
- Mehri, M. Fallah, N. Nasernejad, B. Mechanisms of heavy metal and oil removal from synthetic saline oilfield produced water by electrocoagulation. *npj Clean Water* 2021, 4, 45. DOI:10.1038/s41545-021-00135-0
- Melin, T.; Jefferson, B.; Bixio, D.; Thoeve, C.; De Wilde, W.; De Koning, J.; van der Graaf, J.; Wintgens, T. Membrane Bioreactor Technology for Wastewater Treatment and Reuse. *Desalination* 2006, 187, 271–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.086>
- Mutamim, N.S.A.; Noor, Z.Z.; Hassan, M.A.A.; Olsson, G. Application of Membrane Bioreactor Technology in Treating High Strength Industrial Wastewater: A Performance Review. *Desalination* 2012, 305, 1–11. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.033>
- Neff, J., Lee, K., & DeBlois, E. (2021). *Produced Water: Overview of International Discharge Standards*. *Marine Pollution Bulletin*.
- Nidheesh, P.V.; Scaria, J.; Babu, D.S.; Kumar, M.S. An overview on combined electrocoagulation-degradation processes for the effective treatment of water and wastewater. *Chemosphere* 2021, 263, 127907. □ DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127907
- Nguyen, L.N.; Truong, M.V.; Nguyen, A.Q.; Johir, M.A.H.; Commault, A.S.; Ralph, P.J.; Semblante, G.U.; Nghiem, L.D. A Sequential Membrane Bioreactor Followed by a Membrane Microalgal Reactor for Nutrient Removal and Algal Biomass Production. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 2020, 6, 189–196. DOI: 10.1039/C9EW00851A
- Olajire, A.A. Recent Advances on the Treatment Technology of Oil and Gas Produced Water for Sustainable Energy Industry-Mechanistic Aspects and Process Chemistry Perspectives. *Chem. Eng. J. Adv.* 2020, 4, 100049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100049>
- Pendashteh, A.R.; Abdullah, L.C.; Fakhru'l-Razi, A.; Madaeni, S.S.; Abidin, Z.Z.; Biak, D.R.A. Evaluation of Membrane Bioreactor for Hypersaline Oily Wastewater Treatment. *Process Saf. Environ. Prot.* 2012, 90, 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.07.006>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 19 Tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Minyak dan Gas.
- Rahighi, R.; Hosseini-Hosseinabad, S.M.; Zeraati, A.S.; Suwaileh, W.; Norouzi, A.; Panahi, M.; Gholipour, S.; Karaman, C.; Akhavan, O.; Kholari, M.A.R.; et al. Two-Dimensional Materials in Enhancement of Membrane-Based Lithium Recovery from Metallic-Ions-Rich Wastewaters: A Review. *Desalination* 2022, 543, 116096. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116096>
- Rahman, M., et al. (2022). *Electrocoagulation Treatment of Produced Water: A Review*. *Journal of Water Process Engineering*.
- RSC. (2023). *Environmental Impact of Produced Water Discharges*. Royal Society of Chemistry Review.
- Royal Society of Chemistry (RSC). (2023). *Opportunities for reuse of produced water in Permian Basin*.
- Salas, B.V.; Wiener, M.S. Desalination, Trends and Technologies. *Desalin. Water Treat.* 2012, 42, 347–348.
- S&P Global Commodity Insights. (2024). *Water handling and emissions in shale maturity*.
- S&P Global. (2024). *Produced Water Treatment Market Outlook*.

- Shah, M.T.; Parmar, H.B.; Rhyne, L.D.; Kalli, C.; Utikar, R.P.; Pareek, V.K. A novel settling tank for produced water treatment: CFD simulations and PIV experiments. *J. Pet. Sci. Eng.* 2019, 182, 106352. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106352
- Shahid, M.K.; Kashif, A.; Rout, P.R.; Aslam, M.; Fuwad, A.; Choi, Y.; Park, J.H.; Kumar, G. A Brief Review of Anaerobic Membrane Bioreactors Emphasizing Recent Advancements, Fouling Issues and Future Perspectives. *J. Environ. Manag.* 2020, 270, 110909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110909>
- Shahid, M.K.; Mainali, B.; Rout, P.R.; Lim, J.W.; Aslam, M.; Al-Rawajfeh, A.E.; Choi, Y. A Review of Membrane-Based Desalination Systems Powered by Renewable Energy Sources. *Water* 2023, 15, 534. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15030534>
- Siagian, U.W.R.; Widodo, S.; Wardani, A.K.; Wenten, I.G. Oilfield Produced Water Reuse and Reinjection with Membrane. In *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*, Semarang, Indonesia, 15–16 November 2017; EDP Sciences: Les Ulis, France, 2018; Volume 156, p. 8005. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815608005>
- Siti, W.S.; Lukman, H.; Meriatna; Wiza, U.F.; Azhari. Pengolahan air payau (brackish water) menjadi air Bersih dengan metode elektrokoagulasi menggunakan Panel surya (photooltaic). 2025. *Chemical Engineering Journal Storage* 5:3 (Juni 2025) 346-358. DOI: <https://doi.org/10.29103/cejs.v5i3.15349>.
- Sharghi, E.A.; Bonakdarpour, B.; Pakzadeh, M. Treatment of Hypersaline Produced Water Employing a Moderately Halophilic Bacterial Consortium in a Membrane Bioreactor: Effect of Salt Concentration on Organic Removal Performance, Mixed Liquor Characteristics and Membrane Fouling. *Bioresour. Technol.* 2014, 164, 203–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.099>
- Sharghi, E.A.; Bonakdarpour, B.; Roustazade, P.; Amoozegar, M.A.; Rabbani, A.R. The Biological Treatment of High Salinity Synthetic Oilfield Produced Water in a Submerged Membrane Bioreactor Using a Halophilic Bacterial Consortium. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2013, 88, 2016–2026. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.4061>
- Sirivedhin, T.; McCue, J.; Dallbauman, L. Reclaiming Produced Water for Beneficial Use: Salt Removal by Electrodialysis. *J. Membr. Sci.* 2004, 243, 335–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.06.038>
- Stella I. Eytayo, Marshall C. Watson, Oladoyin Kolawole, Pei Xu, Kazeem A. Lawal, Marshal E. Wigwe and Alberto Giussani. (2023). Novel systematic approach for produced water volume quantification applicable for beneficial reuse. *Royal Society of Chemistry Journal*. DOI: 10.1039/D2VA00282E (Paper) *Environ. Sci.: Adv.*, 2023, 2, 508-528
- Sundt, Rolf C.; Baussant, Thierry; Beyer, Jonny (2009-01-01). "Uptake and tissue distribution of C4–C7 alkylphenols in Atlantic cod (*Gadus morhua*): Relevance for biomonitoring of produced water discharges from oil production". *Marine Pollution Bulletin*. 58 (1): 72–79. Bibcode:2009MarPB.58...72S. doi:10.1016/j.marpolbul.2008.09.012. ISSN 0025-326X. PMID 18945454.
- Tamunokuro, K.; Ramirez, A.; Molinari, M. Review of Oilfield Produced Water Treatment Technologies. *Chemosphere* 2022, 298, 134064.
- Tetteh, E.K.; Rathilal, S.; Asante-Sackey, D.; Chollom, M.N. Prospects of Synthesized Magnetic TiO₂-Based Membranes for Wastewater Treatment: A Review. *Materials* 2021, 14, 3524. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133524>
- Veil, J. (2020). *International Standards for Produced Water Management*. SPE Journal.
- Wall Street Journal. (2023). *In America's biggest oil field, the ground is swelling and buckling*.
- Wikipedia. (2025). *Health and environmental impact of the petroleum industry*.
- Wu, M.; Chen, Y.; Lin, H.; Zhao, L.; Shen, L.; Li, R.; Xu, Y.; Hong, H.; He, Y. Membrane Fouling Caused by Biological Foams in a Submerged Membrane Bioreactor: Mechanism Insights. *Water Res.* 2020, 181, 115932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115932>