

EFEKTIVITAS REVERSE OSMOSIS DALAM MENURUNKAN TDS PADA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR INDUSTRI

A. D. Anggraini ⁽¹⁾, H. Mulyanti ⁽²⁾

¹²Ilmu Lingkungan, Universitas Bojonegoro, Bojonegoro

e-mail: adindadhayu08@gmail.com, herimulyanti.unigoro@gmail.com

ABSTRACT

Industrial wastewater plays a fundamental role but poses a significant threat to environmental pollution if not properly managed, primarily due to high concentrations of Total Dissolved Solids (TDS) and other dissolved water quality parameters. To address these challenges and meet strict quality standards, Reverse Osmosis (RO) technology is widely applied for its proven ability to produce high-quality permeate. This study aims to empirically evaluate the operational effectiveness of an RO system in reducing TDS, turbidity, pH, and total hardness in industrial wastewater facilities. The methodology employed a quantitative descriptive case study with primary data collected via grab sampling over three days (February 18–20, 2025) at the RO unit's inlet and outlet. System performance was measured using removal efficiency analysis and compared against relevant quality standards (Indonesian Ministry of Health Regulation No. 492/2010). The results showed superior and stable performance across most parameters: TDS removal efficiency was consistently above 95%, yielding treated water well above drinking water standards. Furthermore, turbidity was successfully reduced by over 90% (0.067–0.122 NTU), indicating successful pre-treatment in controlling particulate fouling, and pH remained stable (6.37–6.73), ensuring membrane chemical integrity. Crucially, a serious operational anomaly was identified: \$total\$ \$hardness\$ removal efficiency plunged sharply from 89,81% to 45% in a short period. This drastic drop is strong evidence of scaling (mineral crystal formation) triggered by concentration polarization at the membrane surface, pointing to suboptimal antiscalant dosing. The study concludes that while RO is highly effective for water reuse, operational stability is significantly threatened by scaling issues, necessitating immediate intervention through antiscalant optimization and scheduled Chemical Cleaning in Place (CIP) implementation to ensure long-term membrane lifespan and sustainable system efficiency.

Keywords: Reverse Osmosis, Total Dissolved Solid (TDS), scaling, Hardness, Removal Efficiency, Industrial Wastewater.

ABSTRAK

Limbah cair industri memegang peran fundamental namun berpotensi besar menyebabkan pencemaran lingkungan jika tidak dikelola dengan baik, terutama akibat tingginya konsentrasi *Total Dissolved Solid* (TDS) dan parameter kualitas air terlarut lainnya. Untuk mengatasi tantangan tersebut dan memenuhi standar baku mutu yang ketat, teknologi Reverse Osmosis (RO) diaplikasikan secara luas karena kemampuannya menghasilkan permeate berkualitas tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara empiris efektivitas operasional sistem RO dalam mereduksi TDS, kekeruhan, pH, dan kesadahan (total hardness) pada limbah cair di fasilitas industri. Metode yang digunakan adalah studi kasus deskriptif kuantitatif dengan pengambilan data primer melalui grab sampling selama tiga hari (18–20 Februari 2025) pada titik inlet dan outlet unit RO. Kinerja sistem diukur melalui analisis

efisiensi penurunan dengan rumus dan dibandingkan dengan standar Permenkes No. 492 Tahun 2010. Hasil analisis menunjukkan kinerja yang superior dan stabil pada sebagian besar parameter. Efisiensi penurunan TDS tercatat konsisten di atas 95%, menghasilkan air olahan yang jauh melampaui standar air minum. Selain itu, kekeruhan berhasil diturunkan lebih dari 90% (0,067–0,122 NTU), yang mengindikasikan keberhasilan prapengolahan dalam mengendalikan fouling partikulat, serta pH air tetap stabil (6,37–6,73), menjamin integritas kimia membran. Namun, temuan kritis mengidentifikasi adanya anomali serius: efisiensi penyisihan total hardness anjlok tajam dari 89,81% menjadi 45% dalam waktu singkat. Penurunan drastis ini merupakan bukti kuat adanya scaling (pembentukan kerak kristal mineral) yang dipicu oleh konsentrasi polarisasi pada permukaan membran dan menunjukkan dosis antiscalant yang sub-optimal. Kesimpulan dari studi ini adalah bahwa meskipun RO sangat efektif untuk reuse air, stabilitas operasional sistem terancam oleh masalah scaling yang memerlukan intervensi segera berupa optimalisasi dosis antiscalant dan implementasi jadwal *pembersihan membran (Chemical Cleaning In Place - CIP) untuk menjamin umur pakai membran yang panjang dan efisiensi sistem yang berkelanjutan.

Kata kunci: Reverse Osmosis, Total Dissolved Solid (TDS), scaling, Hardness, Efisiensi Penyisihan, Limbah Cair Industri.

1. Pendahuluan

Air merupakan sumber daya yang memiliki peranan fundamental dan sangat penting dalam berbagai kegiatan industri. Fungsinya mencakup peran sebagai bahan baku utama, media pendingin dalam proses termal, hingga sarana pendukung operasional, yang memastikan kelancaran seluruh proses produksi (Aziz et al., 2024; Deka & Sarma, 2020). Namun, seiring meningkatnya aktivitas dan kompleksitas industri, jumlah limbah cair yang dihasilkan juga bertambah secara proporsional. Limbah cair ini berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan yang serius apabila tidak dikelola dengan baik dan mencapai standar baku mutu yang berlaku (Rahman et al., 2020).

Salah satu parameter kualitas air yang paling krusial dalam pengolahan limbah cair adalah *Total Dissolved Solid* (TDS). TDS yang tinggi mengindikasikan konsentrasi ion-ion terlarut yang besar, yang dapat memengaruhi kualitas air hasil olahan, mengganggu proses industri melalui korosi atau presipitasi, serta berpotensi membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem perairan jika

dibuang tanpa pengolahan memadai (Wang et al., 2019; Zhang et al., 2020).

Untuk mengatasi masalah tingginya TDS dan persyaratan kualitas air yang ketat, teknologi *Reverse Osmosis* (RO) telah diakui dan banyak digunakan secara global dalam pengolahan air maupun limbah cair industri (Lee et al., 2019; Yadav & Mondal, 2021). Prinsip kerja RO didasarkan pada pemberian tekanan hidrostatik yang melebihi tekanan osmotik alami air baku, yang memungkinkan molekul air melewati membran *semi-permeabel*, sementara zat terlarut seperti ion-ion mineral, logam berat, dan senyawa organik tertahan dalam aliran reject atau konsentrat (Baker, 2012). Teknologi ini dikenal efektif menurunkan konsentrasi TDS, kekeruhan, dan beberapa parameter pencemar lainnya, sehingga menghasilkan *permeate* (air hasil olahan) dengan kualitas yang sangat baik. Bahkan, kualitas *permeate* seringkali mendekati kualitas air demineralisasi dan mampu memenuhi standar ketat, seperti Permenkes No. 492 Tahun 2010 untuk air minum (Departemen Kesehatan Republik Indonesia, 2010).

Meskipun RO memiliki efektivitas yang tinggi, kinerja operasionalnya sangat

sensitif dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kualitas air baku, efektivitas sistem prapengolahan, kondisi membran, serta dosis bahan kimia antiscalant (Rahman et al., 2022). Permasalahan utama yang paling sering dihadapi dan menjadi ancaman serius bagi keberlanjutan operasional RO adalah terjadinya *fouling* (penumpukan partikel tersuspensi, koloid, atau material organik) dan *scaling* (pembentukan kerak kristal garam mineral, terutama kalsium dan magnesium) pada permukaan membran (Al-Amoudi & Lovitt, 2007; Ladewig & Al-Sawaftah, 2017). Kondisi *fouling* dan *scaling* secara langsung dapat menurunkan efisiensi penyisihan TDS maupun kesadahan, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan umur pakai membran dan peningkatan signifikan dalam biaya

2. Metode

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai studi kasus deskriptif dengan pendekatan kuantitatif, berfokus pada evaluasi kinerja operasional unit pengolahan air limbah. Data yang digunakan merupakan data primer yang diperoleh langsung di lapangan selama kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL). Pelaksanaan PKL dilakukan selama periode Februari–Maret 2025 di fasilitas pengolahan limbah cair industri yang mengaplikasikan sistem *Reverse Osmosis* (RO) sebagai unit pengolahan tersier utama. Lokasi spesifik penelitian dipilih karena representasinya dalam mengoperasikan unit RO untuk polishing air limbah tingkat tinggi. Untuk mendapatkan data kinerja sistem pada kondisi operasional sebenarnya, pengambilan sampel air dilakukan secara grab sampling selama tiga hari berturut-turut pada tanggal 18–20 Februari 2025 (Rahman et al., 2022). Pengambilan *sampel* yang berulang ini bertujuan untuk mencerminkan variabilitas harian yang mungkin terjadi dalam kualitas air baku industri.

operasional karena frekuensi pencucian kimia (*Cleaning in Place*) yang lebih sering dan konsumsi energi yang lebih tinggi (Antony et al., 2012; Goh et al., 2018; Kumar et al., 2021; DuPont Water Solutions, 2022).

Berdasarkan urgensi kebutuhan air bersih dan tantangan operasional membran tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi secara empiris efektivitas sistem RO dalam menurunkan TDS, kekeruhan, pH, dan kesadahan pada limbah cair industri. Hasil penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran kinerja sistem RO pada kondisi nyata di lapangan, serta menjadi bahan pertimbangan mendalam dalam upaya optimalisasi pengolahan limbah cair industri agar lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Sumber data utama penelitian berasal dari hasil pengujian laboratorium internal fasilitas pengolahan. Pengujian dilakukan terhadap parameter kualitas air yang esensial untuk mengevaluasi kinerja membran, yaitu: pH, kekeruhan, *Total Dissolved Solid* (TDS), dan *total hardness* (sebagai proksi konsentrasi ion Ca^{2+} dan Mg^{2+}). Sampel diambil pada dua titik kritis dalam alur proses:

1. Titik *Inlet*: Air baku sebelum memasuki unit membran RO (setelah seluruh tahapan prapengolahan selesai). Data ini mewakili kualitas air umpan yang masuk ke membran.
2. Titik *Outlet*: Air hasil olahan (*permeate*) setelah melewati membran RO.

Pengambilan sampel yang *paired* (*inlet* dan *outlet*) sangat penting karena memungkinkan perhitungan efisiensi penyisihan sistem secara akurat, suatu prosedur standar dalam evaluasi teknologi membran (Kumar et al., 2021). Hasil pengujian laboratorium divalidasi dengan

membandingkannya terhadap baku mutu air yang relevan, terutama Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, mengingat tujuan RO adalah menghasilkan air dengan kualitas tinggi (Departemen Kesehatan Republik Indonesia, 2010). Sistem pengolahan yang diamati terdiri dari dua tahapan utama yang dirancang untuk bekerja secara sinergis:

1. Tahap prapengolahan (*Pretreatment*)

Tahap ini merupakan mekanisme pertahanan yang krusial, dirancang untuk melindungi membran RO dari kerusakan dan penurunan kinerja yang disebabkan oleh fouling dan scaling (Al-Amoudi & Lovitt, 2007). Urutan unit prapengolahan meliputi:

- a) *Multimedia Filter* (MMF) dan *Activated Carbon Filter* (ACF): Berfungsi untuk filtrasi partikel tersuspensi, sedimen, koloid, serta menghilangkan sisa klorin bebas, senyawa organik, warna, dan bau. Penghilangan klorin bebas sangat penting untuk mencegah kerusakan kimia (oksidasi) pada membran poliamida RO (DuPont Water Solutions, 2022).
- b) *Cartridge Filter*: Berperan sebagai *safety filter* tahap akhir (umumnya berukuran 5 atau 1 mikron) untuk menjamin partikel yang masuk ke pompa bertekanan tidak merusak membran.
- c) *Injeksi Bahan Kimia*: Dilakukan injeksi antiscalant (untuk mencegah presipitasi garam mineral penyebab kerak), sodium metabisulfite (untuk mendetoksifikasi sisa klorin), dan bahan kimia untuk pengaturan pH seperti NaOH atau asam sulfat, yang merupakan praktik standar dalam operasi RO (Antony et al., 2012).

Setelah melalui prapengolahan yang ketat, air dialirkan menggunakan pompa bertekanan tinggi menuju unit membran RO

dua tahap. Konfigurasi dua tahap ini dipilih untuk mengoptimalkan tingkat pemulihan air (*recovery*) dan kualitas *permeate*. Proses RO bekerja dengan prinsip tekanan, memisahkan molekul air dari zat terlarut. Hasil proses dibagi menjadi dua aliran: air *permeate* (air hasil olahan berkualitas tinggi yang ditampung untuk *reuse*) dan aliran *reject* atau *konsentrat* (limbah dengan konsentrasi pencemar tinggi yang dialirkan ke saluran pembuangan) (Baker, 2012).

Metode analisis yang digunakan adalah analisis deskriptif kuantitatif. Kinerja sistem RO dinilai berdasarkan kemampuan penyisihannya, diukur melalui perhitungan efisiensi penurunan untuk setiap parameter kualitas air. Efisiensi dihitung dengan membandingkan konsentrasi awal (C_{awal}) di *inlet* dengan konsentrasi akhir (C_{akhir}) di *outlet* menggunakan persamaan (1):

$$\text{Efisiensi Penurunan (\%)} = \left(\frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Analisis difokuskan pada interpretasi kinerja membran dalam menurunkan TDS, mengendalikan kekeruhan, menjaga stabilitas pH, dan yang terpenting, mengevaluasi fluktuasi yang terjadi pada efisiensi penyisihan kesadahan, yang merupakan indikator dini terjadinya scaling (Wang et al., 2019). Perbandingan hasil *outlet* dengan baku mutu Permenkes No. 492 Tahun 2010 menjadi landasan untuk menilai kesiapan air hasil olahan untuk *reuse* atau pembuangan yang aman.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian kualitas air limbah cair industri pada unit Reverse Osmosis (RO) disajikan secara rinci pada Tabel 1. Data ini meliputi perbandingan konsentrasi TDS, pH, kekeruhan, dan *total hardness* pada *inlet* dan *outlet* sistem, yang menjadi dasar untuk menganalisis efisiensi penyisihan dan mengidentifikasi anomali operasional. Pembahasan ini membandingkan hasil yang diperoleh dengan standar baku mutu yang berlaku,

yaitu Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010, dan didukung oleh prinsip-prinsip teknik membran dari literatur ilmiah.

Kinerja Penyisihan *Total Dissolved Solid* (TDS) yang Sangat Konsisten

Kinerja sistem *Reverse Osmosis* dalam menyisihkan *Total Dissolved Solid* (TDS) menunjukkan hasil yang superior dan konsisten, yang merupakan indikasi utama integritas dan selektivitas membran poliamida yang tinggi. Efisiensi penurunan TDS tercatat stabil di atas 95% sepanjang periode pengujian, dengan kisaran antara 95,29% hingga 97,36% (Lihat Tabel 1). Tingkat efisiensi yang sangat tinggi ini mengonfirmasi *salt rejection rate* yang optimal, yang merupakan tolok ukur fundamental keberhasilan sistem RO (Ali et al., 2011).

Nilai TDS pada air permeate (hasil olahan) berada pada rentang yang sangat rendah, yaitu 9,07 mg/L hingga 17,06 mg/L. Angka ini menunjukkan kualitas air yang jauh melampaui persyaratan baku mutu air minum yang ditetapkan oleh Permenkes No. 492 Tahun 2010 (maksimum 500 mg/L) (Departemen Kesehatan Republik Indonesia, 2010). Secara teknis, TDS di bawah 20 mg/L menempatkan air *permeate* mendekati kualitas air demineralisasi, menjadikannya ideal dan aman untuk dialokasikan sebagai air *make-up boiler feed water* atau proses industri lain yang menuntut kemurnian tinggi. Kestabilan efisiensi penyisihan TDS mengindikasikan bahwa sistem RO beroperasi dengan tekanan hidrostatik yang memadai, mampu mengatasi tekanan osmotik air umpan secara efektif, dan membran belum mengalami kerusakan fisik signifikan yang dapat menyebabkan leakage (Baker, 2012; Lee et al., 2019).

Evaluasi Prapengolahan melalui Analisis Kekeruhan dan Kestabilan pH

Penurunan Kekeruhan dan Proteksi Membran

Aspek keberhasilan operasional sistem *Reverse Osmosis* (RO) dapat diukur secara langsung melalui kinerja sistem prapengolahan dalam menangani kekeruhan. Penurunan kekeruhan yang dicapai dalam studi ini tercatat sangat signifikan, dengan efisiensi penyisihan yang tinggi dan stabil, berkisar antara 93,50% hingga 97,01%. Angka ini merupakan bukti nyata dari keandalan tahap prapengolahan. Nilai kekeruhan *inlet* yang bervariasi antara 1,03–3,01 NTU berhasil diturunkan menjadi nilai yang sangat rendah dan mendekati nol, yakni 0,067–0,122 NTU pada *outlet* prapengolahan sebelum air masuk ke membran RO (Rahman et al., 2022).

Tingkat efisiensi yang luar biasa tinggi ini mengonfirmasi keberhasilan dan keefektifan sistem prapengolahan yang dirancang secara berlapis, meliputi *Multimedia Filter* (MMF), *Activated Carbon Filter* (ACF), dan yang paling krusial, *cartridge filter* (biasanya berukuran 5 atau 1 mikron). Unit prapengolahan ini bertindak sebagai benteng pertahanan utama untuk melindungi membran RO dari kerusakan.

Dalam operasi RO, kekeruhan adalah proksi penting untuk *Silt Density Index* (SDI), yang merupakan parameter paling kritis untuk memprediksi potensi *fouling* partikulat pada membran. SDI mengukur laju penyumbatan filter. Kekeruhan *outlet* yang sangat rendah (di bawah 0,2 NTU) menunjukkan bahwa SDI air umpan yang masuk ke membran RO kemungkinan besar berada dalam batas aman yang direkomendasikan pabrikan (biasanya $SDI \leq 5$, idealnya ≤ 3), yang berarti air telah dimurnikan dari partikel tersuspensi, koloid, dan material organik hingga batas yang dapat ditoleransi membran.

Prapengolahan yang berhasil ini adalah investasi operasional yang esensial karena penumpukan partikel pada

membran, yang disebut *fouling* fisik, dapat menyebabkan serangkaian masalah serius:

- a) Penurunan *Fluks* Air: Partikel menutupi pori-pori membran, mengurangi luas permukaan aktif, yang secara langsung menurunkan laju produksi air (*water productivity*) (Ladewig & Al-Sawaftah, 2017).
- b) Peningkatan Kebutuhan Energi: Penumpukan lapisan *fouling* meningkatkan hambatan hidrolis, memaksa pompa bertekanan tinggi bekerja lebih keras untuk mempertahankan *fluks*, yang mengakibatkan peningkatan kebutuhan energi spesifik (Al-Amoudi & Lovitt, 2007).
- c) Memperpendek Umur Membran: *Fouling* yang parah dan terus-menerus memerlukan frekuensi pencucian kimia (*Chemical Cleaning in Place – CIP*) yang lebih sering. Proses CIP ini mahal dan secara progresif dapat memperpendek umur pakai membran.

Oleh karena itu, data kekeruhan yang dicapai ini mengonfirmasi bahwa risiko *fouling* partikulat telah dikelola secara efektif di fase awal proses, suatu kondisi yang sangat membantu dalam menjaga integritas, *fluks* stabil, dan menekan frekuensi pencucian kimia (Kumar et al., 2021). Kinerja yang solid pada parameter kekeruhan ini menjadi pembeda penting dari masalah *scaling* (kimia) yang teridentifikasi pada parameter *total hardness*.

Kestabilan pH dan Integritas Kimia Membran

Parameter pH dalam sistem RO menunjukkan kestabilan yang memadai, suatu indikasi penting dari lingkungan operasi yang terkontrol. Nilai pH air *inlet* yang diukur berkisar antara 6,40 hingga 6,52, sedangkan outlet (*permeate*) menunjukkan sedikit pergeseran menjadi 6,37 hingga 6,73. Fluktuasi yang sangat

kecil ini—yang berada dalam rentang netral-asam ringan—menunjukkan bahwa proses RO, yang pada dasarnya adalah pemisahan fisik bertekanan, tidak banyak memengaruhi keseimbangan asam-basa air. Kestabilan ini juga menandakan bahwa sistem pengaturan pH di prapengolahan (melalui injeksi asam atau basa) berfungsi secara efektif dalam menstabilkan air umpan.

Pentingnya menjaga pH dalam rentang yang ketat terkait langsung dengan integritas kimia membran poliamida. Membran RO yang umum digunakan saat ini, yang terbuat dari poliamida, sangat sensitif terhadap kondisi pH yang ekstrem. Nilai pH yang terlalu rendah (asam kuat) atau terlalu tinggi (basa kuat) dapat memicu proses hidrolisis kimia pada ikatan amida yang membentuk struktur polimer membran (DuPont Water Solutions, 2022).

Kerusakan kimia akibat hidrolisis ini bersifat permanen dan memiliki dampak operasional yang serius:

- a. Perubahan Struktur Membran: Hidrolisis dapat mengubah struktur polimer membran, menyebabkan pelebaran pori-pori (*porositas*) dan hilangnya muatan permukaan.
- b. Penurunan Kualitas Air: Pelebaran pori-pori secara langsung menyebabkan penurunan permanen dalam penolakan garam (*salt rejection*) dan efisiensi penyisihan TDS.
- c. Memperpendek Umur Pakai: Kerusakan kimia memperpendek umur pakai membran secara signifikan, memaksa penggantian membran lebih awal dari yang direncanakan.

Mengingat pH yang diamati berada dalam rentang aman (biasanya pabrikan merekomendasikan pH antara 5 hingga 9), kestabilan yang terpantau menunjukkan bahwa sistem operasional berhasil menjaga lingkungan kimia yang aman bagi membran. Hal ini krusial untuk mempertahankan kinerja superior RO

dalam jangka panjang, khususnya dalam hal efisiensi penyisihan TDS yang tinggi. Kestabilan pH merupakan bukti bahwa risiko degradasi kimia telah dikelola dengan baik, berbeda dengan risiko scaling (kerusakan fisik) yang terlihat pada fluktuasi parameter *total hardness*.

Analisis Kritis Fluktuasi Penyisihan Total Hardness Indikasi Kuat Mineral Scaling

Hasil pengujian pada parameter *total hardness* (kesadahan, yang disebabkan oleh ion Ca^{2+} dan Mg^{2+}) menyajikan temuan yang paling krusial dan harus diinterpretasikan sebagai peringatan operasional serius yang memerlukan tindakan intervensi segera. Kinerja penyisihan ion divalen mengalami penurunan efisiensi yang tajam dan signifikan dalam rentang waktu yang sangat singkat, dari 89,81% pada 18 Februari menjadi hanya 45% pada 19 dan 20 Februari. Penurunan yang hampir separuh ini merupakan bukti tak terbantahkan adanya fenomena *scaling* (pembentukan kerak mineral) pada permukaan membran RO (Antony et al., 2012). Fluktuasi mendadak ini, yang kontras dengan stabilitas TDS (garam monovalen) dan kekeruhan, menggarisbawahi sifat selektif masalah: kinerja penyisihan garam monovalen masih optimal, tetapi penyisihan ion divalen (penyebab *scaling*) telah terganggu secara parah.

Kegagalan yang tiba-tiba ini dipicu oleh proses fisikokimia yang dikenal sebagai konsentrasi polarisasi (*concentration polarization*) (Elimelech et al., 2023). Konsentrasi polarisasi adalah kondisi yang tak terhindarkan yang terjadi di dalam modul membran RO saat air ditarik melalui membran, tetapi ion terlarut, terutama ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} , tertahan dan menumpuk pada lapisan batas membran—yaitu lapisan tipis air di permukaan aktif membran. Pada operasi RO bertekanan tinggi, laju penolakan garam oleh membran

jauh lebih cepat daripada laju difusi kembali garam ke aliran air *bulk* (Rahman et al., 2022). Akibatnya, konsentrasi ion kesadahan pada lapisan batas membran meningkat secara drastis, bahkan jauh melampaui konsentrasi air umpan awal. Ketika konsentrasi ion terlarut ini melampaui batas kelarutannya (ditentukan oleh *saturation index* atau indeks kejenuhan), proses nukleasi kristal terjadi. Kristal garam mineral tak larut—seperti Kalsium Karbonat (CaCO_3) dan Kalsium Sulfat (CaSO_4), yang merupakan jenis *scaling* paling umum—mulai terbentuk dan menempel erat pada permukaan membran.

Lapisan kerak yang terbentuk memiliki konsekuensi operasional dan kualitas air yang serius. Penurunan efisiensi dari 89,81% secara definitif menunjukkan bahwa lapisan kerak telah cukup tebal dan kokoh untuk merusak fungsi selektif membran. Kerusakan selektivitas ini secara langsung memungkinkan ion divalen yang seharusnya ditolak kini menembus membran. Hal ini dikonfirmasi oleh peningkatan konsentrasi *total hardness* pada *outlet* yang melonjak hampir lima kali lipat, dari hanya 0,23 mg/L menjadi 1,2 mg/L. Peningkatan kontaminan kesadahan pada permeate merupakan bukti nyata kegagalan mekanisme penolakan ion, yang mengancam kualitas air hasil olahan untuk *reuse*.

Hipotesis utama penyebab *scaling* yang tiba-tiba ini adalah dosis antiscalant yang sub-optimal yang tidak mampu menghambat pertumbuhan kristal pada tekanan dan konsentrasi polarisasi yang terjadi di dalam elemen membran (Wang et al., 2019). Kegagalan ini menuntut intervensi segera: peningkatan konsumsi energi karena pompa dipaksa beroperasi pada tekanan *feed* yang lebih tinggi akibat resistensi hidrolik yang meningkat, serta ancaman serius terhadap umur pakai membran karena kebutuhan akan prosedur pencucian kimia (CIP) yang lebih agresif (Goh et al., 2018). Oleh karena itu, fluktuasi

kinerja ini menjadi sinyal mendesak bahwa sistem memerlukan intervensi *Chemical Cleaning in Place* (CIP) dan evaluasi ulang dosis bahan kimia secara komprehensif.

Mekanisme *Scaling* dan Konsentrasi Polarisation yang Memicu Penurunan Kinerja

Fenomena *scaling* (pembentukan kerak) adalah presipitasi garam mineral tak larut yang dipicu oleh proses kritis yang dikenal sebagai konsentrasi polarisation (*concentration polarization*) (Elimelech et al., 2023). Konsentrasi polarisation merupakan kondisi fisik yang terjadi di dalam modul membran RO saat air ditarik melalui membran, tetapi zat terlarut (terutama ion Ca^{2+} dan Mg^{2+}) tertahan dan menumpuk pada lapisan batas membran, yaitu lapisan tipis air di permukaan aktif membran.

Pada kondisi operasional RO bertekanan tinggi, laju penolakan garam oleh membran jauh lebih cepat daripada laju difusi kembali garam tersebut ke aliran air *bulk*. Akibatnya, konsentrasi garam mineral yang terkonsentrasi pada lapisan batas membran meningkat secara drastis, bahkan jauh melampaui konsentrasi awal di *inlet*. Ketika konsentrasi ini melampaui batas kelarutannya (didefinisikan oleh saturation index atau indeks kejenuhan), nukleasi kristal terjadi, dan kristal garam mineral—seperti Kalsium Karbonat (CaCO_3) atau Kalsium Sulfat (CaSO_4), yang merupakan penyebab utama kesadahan—mulai tumbuh dan menempel erat pada permukaan membran.

Bukti empiris dari fenomena ini terlihat jelas pada data pengujian:

- a) Efisiensi penyisihan *total hardness* anjlok dari 89,81% pada kondisi kinerja optimal (18 Februari) menjadi hanya 45%. Penurunan drastis ini menunjukkan bahwa lapisan kerak yang terbentuk telah cukup tebal dan kokoh untuk merusak fungsi selektif membran.

- b) Kerusakan selektivitas ini secara langsung memungkinkan ion divalen yang seharusnya ditolak kini menembus membran. Hal ini dikonfirmasi oleh peningkatan konsentrasi *Hardness* pada *outlet* yang melonjak hampir lima kali lipat, dari hanya 0,23 mg/L menjadi $\approx 1,2$ mg/L. Peningkatan kontaminan pada *permeate* ini secara definitif menunjukkan kegagalan pada mekanisme penolakan ion, yang disebabkan oleh terbentuknya lapisan *scaling* di permukaan membran. Lapisan kerak ini bertindak sebagai saluran *bypass* parsial atau merusak integritas membran secara mikro.

Kegagalan yang tiba-tiba ini sangat mengindikasikan bahwa dosiss antiscalant yang diinjeksikan pada sistem telah mencapai titik kritis kegagalan (*breakthrough point*) dan tidak mampu lagi menghambat pertumbuhan kristal pada tekanan dan konsentrasi polarisation yang terjadi di dalam elemen membran (Antony et al., 2012). Fluktuasi tersebut bukan hanya isu kualitas air, tetapi merupakan sinyal alarm tentang ancaman terhadap keberlanjutan operasional sistem secara keseluruhan.

Konsekuensi Operasional dan Hipotesis Penyebab

Penurunan efisiensi RO dari 89,81% ke 45% menunjukkan bahwa lapisan kerak mineral telah terbentuk cukup tebal dan telah merusak selektivitas membran secara signifikan. Lapisan kerak ini bukan hanya menyumbat pori-pori, tetapi juga mengganggu mekanisme penolakan ion pada tingkat molekuler. Dampak langsung dari kegagalan selektivitas ini adalah ion divalen (Ca^{2+} dan Mg^{2+}) yang seharusnya ditolak, kini mampu menembus membran dan mencemari air *permeate*. Hal ini secara tegas dikonfirmasi oleh peningkatan konsentrasi *total hardness* pada *outlet*, yang melonjak dari 0,23 mg/L menjadi 1,2 mg/L

(Lihat Tabel 1). Kenaikan kontaminan ini mengancam tujuan *reuse* air hasil olahan, karena kesadahan yang tinggi dapat memicu masalah pada sistem sekunder industri, seperti pengendapan kerak di dalam pipa penukar panas (*heat exchanger*) atau *boiler*.

Konsekuensi operasional dari *scaling* melampaui masalah kualitas air dan secara langsung memengaruhi efisiensi dan biaya sistem:

1. Peningkatan Biaya Energi (*Energy Cost*): Lapisan kerak yang menempel pada permukaan membran meningkatkan resistensi hidrolis total sistem. Untuk mempertahankan laju produksi air (*fluks*) yang stabil, pompa bertekanan tinggi terpaksa beroperasi pada tekanan feed yang lebih tinggi. Peningkatan tekanan operasional ini secara langsung dan signifikan meningkatkan konsumsi energi spesifik sistem per meter kubik air olahan, sehingga menaikkan biaya operasional harian (Goh et al., 2018).
2. Penurunan Umur Membran (*Membrane Lifetime*): *Scaling* yang terabaikan akan menyebabkan kerusakan fisik permanen pada membran. Untuk menghilangkan kerak yang keras, sistem memerlukan prosedur pencucian kimia agresif (*Chemical Cleaning in Place – CIP*) dengan larutan asam atau basa kuat. Proses pencucian yang sering dan agresif ini secara kimiawi dan fisik dapat menekan dan merusak lapisan tipis poliamida membran, yang pada akhirnya memperpendek umur pakai membran secara signifikan dan menaikkan biaya penggantian modal (Goh et al., 2018; DuPont Water Solutions, 2022).

4. Simpulan dan Saran

Berdasarkan analisis deskriptif yang mendalam terhadap kinerja operasional unit *Reverse Osmosis* (RO) dalam pengolahan limbah cair industri, dapat ditarik beberapa

Hipotesis utama penyebab *scaling* yang terjadi secara mendadak ini adalah dosis antiscalant yang sub-optimal. Meskipun antiscalant diinjeksikan, dosis atau formulasi kimianya mungkin tidak memadai untuk menanggulangi lonjakan kecil konsentrasi ion kesadahan atau pada kondisi *water recovery* yang tinggi yang meningkatkan potensi konsentrasi polarisasi (Wang et al., 2019). Temuan ini memperkuat literatur bahwa RO, meskipun superior untuk TDS, sangat rentan terhadap ion divalen dan membutuhkan kontrol *pre-treatment* kimia yang ketat (Baker, 2012).

Fluktuasi ini menjadi sinyal mendesak bahwa sistem memerlukan intervensi segera. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini telah berhasil menjawab tujuan utama bahwa sistem RO sangat efektif dalam menurunkan TDS dan kekeruhan. Namun, anomali kinerja yang teridentifikasi pada penyisihan kesadahan harus menjadi titik fokus koreksi operasional untuk menjamin stabilitas dan umur panjang sistem di masa mendatang.

Tabel 1. Hasil pengujian kualitas air pada *inlet* dan *outlet* sistem RO

Tanggal	TDS		Efisiensi TDS (%)	pH		Kekeruhan	
	Inlet (mg/L)	Outlet (mg/L)		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
18/02/2025	3,44	9,07	97,36	6,40	6,37	1,03	0,067
19/02/2025	3,58	13,53	96,22	6,46	6,61	2,01	0,122
20/02/2025	3,62	17,06	95,29	6,52	6,73	3,01	0,090

Tabel 1. Hasil pengujian kualitas air pada *inlet* dan *outlet* sistem RO

Kekeruhan		Efisiensi Kekeruhan (%)	Hardness		Efisiensi Hardness
Inlet	Outlet		Inlet	Outlet	
1,03	0,067	93,50	2,31	0,23	89,81
2,01	0,122	93,93	2,16	1,18	45,37
3,01	0,090	97,01	2,25	1,22	45,78

kesimpulan kunci yang menguraikan keberhasilan dan tantangan sistem. Pertama, secara keseluruhan, sistem RO terbukti sangat efektif dalam meningkatkan kualitas air, ditandai dengan efisiensi

penyisihan *Total Dissolved Solid* (TDS) yang sangat konsisten, yaitu selalu berada di atas 95% (Ali et al., 2011). Tingkat *salt rejection* yang unggul ini menghasilkan permeate dengan kadar TDS yang jauh di bawah standar baku mutu air minum, menegaskan integritas membran untuk menyaring garam monovalen. Kedua, keberhasilan juga terlihat pada aspek fisik: kekeruhan berhasil diturunkan secara signifikan hingga lebih dari 90%, yang secara tegas mengonfirmasi efektivitas sistem prapengolahan (MMF, ACF, dan *filter cartridge*) dalam mengendalikan *fouling* partikulat (Ladewig & Al-Sawaftah, 2017). Ketiga, nilai pH air tetap stabil dalam kisaran netral-asam ringan yang aman, menunjukkan sistem kontrol kimiawi yang baik dan mencegah risiko degradasi kimia permanen pada membran poliamida. Secara kolektif, temuan ini menegaskan bahwa konfigurasi prapengolahan dan sistem RO yang digunakan mampu menghasilkan permeate dengan kualitas yang sangat baik dan aman untuk dialokasikan kembali pada kebutuhan *non-potable* di fasilitas industri.

Namun demikian, temuan paling krusial adalah adanya anomali kinerja yang tajam pada parameter *total hardness*. Hasil penelitian memperlihatkan adanya fluktuasi efisiensi yang drastis, anjlok dari 89,81% menjadi hanya 45% dalam waktu singkat. Penurunan signifikan ini merupakan bukti kuat dan tak terbantahkan bahwa telah terjadi fenomena *scaling* (pembentukan kerak mineral) pada permukaan membran (Antony et al., 2012). *Scaling* ini dipicu oleh kegagalan kontrol terhadap presipitasi garam mineral pada kondisi konsentrasi polarisasi, yang pada gilirannya merusak selektivitas membran dan menyebabkan ion kesadahan menembus permeate. Kondisi ini secara jelas mengindikasikan perlunya evaluasi segera terkait dosis antiscalant, kondisi fisik membran, dan efektivitas tahapan prapengolahan dalam mengelola ion divalen.

Berdasarkan analisis kritis terhadap kinerja fluktuatif penyisihan kesadahan, beberapa saran strategis dan teknis harus dipertimbangkan untuk pemulihan dan optimalisasi sistem RO:

1. Optimalisasi dan Kalibrasi Kontrol Kimia (antiscalant): Pihak pengelola fasilitas industri harus segera melakukan evaluasi mendalam dan kalibrasi terhadap dosis penggunaan bahan kimia antiscalant. Dosis harus dihitung ulang dan dioptimalkan agar mampu mengatasi *scaling* potential yang diperparah oleh fenomena konsentrasi polarisasi pada tingkat *water recovery* yang tinggi, guna menjamin efisiensi penyisihan kesadahan stabil di atas 90% dan sesuai dengan indeks saturasi air umpan (Wang et al., 2019).
2. Pemulihan Kinerja Membran melalui CIP: Mengingat adanya indikasi *scaling* yang kuat, penetapan dan kepatuhan terhadap jadwal pembersihan membran (*Cleaning In Place* - CIP) menjadi sangat mendesak. Prosedur CIP menggunakan larutan asam atau basa harus segera dilaksanakan untuk menghilangkan lapisan kerak yang telah teridentifikasi dan memulihkan fluks serta selektivitas membran, sehingga mencegah kerusakan fisik permanen dan memperpanjang umur pakai membran secara signifikan (DuPont Water Solutions, 2022).
3. Peningkatan Pemantauan dan Pengawasan Prapengolahan: Pemantauan berkala tidak hanya harus mencakup TDS dan pH, tetapi juga harus diperluas untuk mencakup parameter kunci penyebab *scaling* (misalnya tingkat Kalsium, Silika, dan Alkalinity) dan indikator *fouling* seperti *Silt Density Index* (SDI), untuk kontrol prapengolahan yang lebih proaktif dan prediktif terhadap potensi kerusakan membran.

4. Pemanfaatan Aliran *Reject* untuk Keberlanjutan: Untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air (*water use efficiency*) dan mengurangi beban lingkungan, pemanfaatan aliran *reject* (konsentrat) dari sistem RO sebaiknya dipertimbangkan secara serius untuk aplikasi sekunder yang toleran terhadap garam, seperti make-up water untuk *cooling tower* atau irigasi non-tanaman pangan. Strategi ini mendukung prinsip ekonomi sirkular dan memitigasi dampak pembuangan limbah konsentrat (NREL, 2023).

Daftar Pustaka

- Al-Amoudi, A., & Lovitt, R. W. (2007). Fouling strategies and the cleaning system of NF and RO membranes. *Desalination*, 215(1–3), 1–15.
- Ali, M., Singh, N., & Hussain, Z. (2011). A short review on process and applications of reverse osmosis. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 1(3), 1–5.
- Antony, A., Low, J. H., Gray, S., Childress, A. E., Le-Clech, P., & Leslie, G. (2012). Scale formation and control in high-pressure membrane water treatment systems. *Journal of Membrane Science*, 383(1–2), 1–16.
- Aziz, S.Q., Alwash, A.H., & Jassim, A.H. 2024. *Recent Trends in Reverse Osmosis Desalination: Advances and Challenges*. Berlin: Springer Nature.
- Baker, R.W. 2012. *Membrane Technology and Applications*. New York: John Wiley & Sons.
- Deka, P., & Sarma, S. (2020). Performance of RO membrane for industrial wastewater treatment: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100954.
- Departemen Kesehatan Republik Indonesia. 2010. Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- DuPont Water Solutions. (2022). *FilmTec™ reverse osmosis membranes technical manual*. Wilmington, DE: DuPont.
- Elimelech, M., Phillip, W.A., & Werber, J.R. 2023. *Reverse Osmosis Revisited: Performance, Challenges, and Opportunities*. London: Nature Publishing Group.
- Firdhaus, M.S., Lestari, A., & Rahman, A. 2020. *Removal of Hardness (Calcium and Magnesium) from Groundwater Using Natural Zeolite*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada Press.
- Goh, P. S., Ng, B. C., Lau, W. J., & Ismail, A. F. (2018). Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. *Desalination*, 425, 130–155.
- Kumar, R., Singh, A., & Verma, P. K. (2021). A comprehensive review on membrane fouling: Mathematical modelling, prediction, diagnosis and mitigation. *Water*, 13(9), 1327.
- Ladewig, B. P., & Al-Sawaftah, N. A. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Journal of Membrane Science and Research*, 3(1), 1–15.
- Lee, J., Park, J., & Kim, C. H. (2019). A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water-purification applications. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 1–11.
- Luo, J., Zhang, X., & Liu, G. (2017). A critical review of reverse osmosis for water treatment. *Applied Energy*, 198, 483–494.

- Malaeb, L., & Ayoub, G. M. (2011). Reverse osmosis technology for water desalination: An overview. *Desalination*, 267(1), 1–8.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). *Trends and future outlooks in circularity of desalination membrane*. Golden, CO: U.S. Department of Energy.
- Rahman, M. S., Hossain, M. M., & Ahmed, M. F. (2022). Optimization of RO system for industrial effluent treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 102954.
- Rahman, R., Alam, M. M., & Uddin, M. T. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A review. *Membranes*, 10(5), 89.
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, H. V. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301–310.
- Wang, Y., Zhang, H., Li, X., & Chen, J. (2019). Analysis of scaling in RO membrane systems and its prevention. *Journal of Environmental Management*, 247, 587–596.
- Yadav, S., & Mondal, P. (2021). Application of reverse osmosis in textile wastewater treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102431.
- Zhang, J., Liu, J., & Yang, Y. (2020). Effect of feed water quality on reverse osmosis membrane performance. *Water Science and Technology*, 81(8), 1635–1645.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). *Trends and future outlooks in circularity of desalination membrane*. Golden, CO: U.S. Department of Energy.