Texere Vol.24 No.02 (2026)
e-ISSN 2774-1893

PEMANFAATAN AIR LIMBAH TEROLAH UNTUK PENGELOLAAN AIR BERKELANJUTAN INDUSTRI BENANG BAN

TREATED WASTEWATER REUSE FOR SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT IN TIRE CORD MANUFACTURING

Susi Maulinawati[1], Afriani Kusumadewi[2*], Mulyawan Kurnia[3], Arif Dewanto[4]
[1, 2]Universitas Insan Cendekia Mandiri, Bandung, 40162, Indonesia
[3]PT Mulya Sigma Periodik, Bandung, 40123, Indonesia
[4]Politeknik STTT Bandung, Bandung, 40272, Indonesia

*Penulis korespondensi:
Alamat Email: afriani.kusumadewi@gmail.com

Tanggal diterima: 23 Juni 2026, direvisi: 15 Oktober 2026,
disetujui terbit: 15 Oktober 2026

Abstrak

Industri manufaktur benang ban membutuhkan air dalam jumlah besar, termasuk untuk pelapisan perekat (dipping) berbasis *Resorcinol-Formaldehyde-Latex* (RFL), dan menghasilkan air limbah yang perlu diolah sebelum dibuang atau digunakan kembali. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) serta kelayakan air olahan untuk higiene sanitasi dan proses produksi pada industri benang ban. Penelitian menggunakan studi kasus deskriptif-evaluatif pada industri benang ban berskala besar di Indonesia dengan enam kali pengambilan sampel (n = 6) pada Januari–Maret 2024. Sistem pengolahan meliputi ekualisasi, netralisasi, aerasi, sedimentasi, koagulasi-flokulasi dengan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dan polimer anionik, filtrasi pasir, filtrasi karbon aktif, serta *reverse osmosis* (RO). Parameter pH, COD, BOD, TSS, kekeruhan, warna, TDS, suhu, *Total Coliform*, *Escherichia coli*, kesadahan, dan besi dianalisis pada efluen akhir dan air olahan lanjutan. Efisiensi penyisihan digunakan sebagai indikator utama kinerja proses, sedangkan simpangan baku (SD) dan koefisien variasi (CV) digunakan untuk menilai sebaran data, margin kepatuhan terhadap baku mutu, dan kestabilan keluaran. Efluen memenuhi baku mutu dengan efisiensi penyisihan COD, BOD, dan TSS sebesar 84,78%, 84,65%, dan 89,21%; CV TSS menurun dari 36,7% (influen) menjadi 13,2% (efluen), sedangkan CV COD dan BOD efluen (23,0% dan 22,9%) menunjukkan fluktuasi yang masih perlu dikendalikan. Air olahan memenuhi standar higiene sanitasi dan menunjukkan indikasi awal kesesuaian sebagai air proses produksi berdasarkan parameter yang diuji. Sistem merupakan *partial water reuse*, bukan *zero liquid discharge* (ZLD), karena sebagian efluen dan *reject* RO masih memerlukan pengelolaan.

Kata kunci: air limbah terolah; *water reuse*; pengelolaan air berkelanjutan; industri benang ban; *reverse osmosis*.

Abstract

The tire cord manufacturing industry requires large amounts of water, including for adhesive dipping using Resorcinol-Formaldehyde-Latex (RFL), and generates wastewater that must be treated before discharge or reuse. This study evaluated the performance of the wastewater treatment plant (WWTP) and the suitability of treated

water for hygiene-sanitation and production processes at a large-scale tire cord manufacturing facility in Indonesia. A descriptive-evaluative case study was conducted with six sampling events (n = 6) between January and March 2024. The treatment system comprised equalization, neutralization, aeration, sedimentation, coagulation-flocculation using Poly Aluminium Chloride (PAC) and anionic polymer, sand filtration, activated carbon filtration, and reverse osmosis (RO). Physicochemical and microbiological parameters, including hardness and iron, were analyzed in the final effluent and the further-treated water. Removal efficiency was used as the main indicator of process performance, whereas standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV) were used to assess data dispersion, compliance margin, and output stability. The effluent complied with applicable standards, with COD, BOD, and TSS removal efficiencies of 84.78%, 84.65%, and 89.21%; the CV of TSS decreased from 36.7% (influent) to 13.2% (effluent), whereas the effluent CVs of COD and BOD (23.0% and 22.9%) indicated fluctuations that still need to be controlled. The further-treated water met hygiene-sanitation standards and showed an initial indication of suitability for production process water based on the tested parameters. The system represents partial water reuse; unused effluent and RO reject still require management and therefore cannot be categorized as zero liquid discharge (ZLD).

Keywords: *treated wastewater; water reuse; sustainable water management; tire cord manufacturing; reverse osmosis*

PENDAHULUAN

Air merupakan sumber daya esensial yang ketersediaannya semakin terbatas akibat tekanan populasi, urbanisasi, dan perubahan iklim. Setengah populasi dunia pada tahun 2022 mengalami kelangkaan air yang parah setidaknya pada sebagian waktu dalam setahun, sementara seperempat populasi global menghadapi tingkat tekanan air (*water stress*) yang sangat tinggi. Sejalan dengan kondisi tersebut, *Sustainable Development Goals (SDGs)* ke-6 menargetkan peningkatan efisiensi penggunaan air di seluruh sektor serta menjamin keberlanjutan pasokan air bersih hingga tahun 2030, termasuk pada sektor manufaktur dan industri[1]. Efisiensi dalam penggunaan air dan pemanfaatan kembali air limbah menjadi kondisi dalam skala prioritas strategis bagi keberlangsungan operasional industri di berbagai sektor.

Industri benang ban (*tire cord*) memproduksi material penguat ban kendaraan dari serat sintetis, terutama poliester dan nilon, kemudian terus berkembang seiring kebutuhan industri otomotif[2]. Berbeda dari industri tekstil yang bertumpu pada proses basah pada kain, rangkaian proses benang ban pada lokasi penelitian terdiri atas pembentukan filamen sintetis, pemilinan benang (*twisting*), dan pelapisan perekat (*dipping*) yang diikuti pengeringan serta perlakuan panas (*heat treatment* atau *curing*). Pada tahap *dipping*, *cord* dilewatkan pada dispersi berair *Resorcinol-Formaldehyde-Latex* (RFL): resin resorsinol-formaldehida berikatan dengan permukaan serat, sedangkan lateks berinteraksi dengan karet saat vulkanisasi, sehingga terbentuk lapisan perekat antara *textile cord* dan kompon karet[3–5]. Dengan demikian, kebutuhan dan karakteristik air pada industri ini terutama berkaitan dengan sistem RFL serta kegiatan pembilasan dan pembersihan peralatan, bukan dengan proses pemasakan, pemutihan, atau pencelupan zat warna.

Karakteristik RFL menentukan sifat air limbah yang dihasilkan. Resin resorsinol-formaldehida bersifat organik dan larut dalam air, sedangkan lateks

berupa partikel polimer koloid yang distabilkan oleh pengemulsi sehingga sulit mengendap secara gravitasi. Kedua komponen berpotensi masuk ke aliran air limbah melalui sisa larutan, pembilasan, dan pembersihan peralatan *dipping*, dan terukur sebagai COD, BOD, TSS, serta kekeruhan. Penyiapan larutan RFL juga dapat melibatkan penambahan basa, sehingga pH air limbah berpotensi berfluktuasi. Resorsinol dan formaldehida adalah senyawa yang berisiko bagi kesehatan dan lingkungan, sehingga residunya perlu dikelola[3,5]. Penelitian ini tidak melakukan pengukuran secara terpisah terhadap debit maupun beban pencemar dari setiap tahapan produksi, sehingga kontribusi proses *dipping* terhadap total debit ataupun beban pencemar belum dapat ditentukan secara kuantitatif. Proses *dipping* diposisikan sebagai salah satu sumber pencemar spesifik, bukan sebagai kontributor terbesar terhadap total beban air limbah pabrik.

Air limbah berupa organik terlarut, koloid, dan padatan tersuspensi dengan pH dan beban yang berfluktuasi biasanya ditangani dengan rangkaian unit yang masing-masing memiliki fungsi berbeda. Pada ekualisasi dan netralisasi berfungsi untuk meredam fluktuasi debit, beban, dan pH. Pengolahan biologis aerobik untuk mengoksidasi bahan organik yang dapat terurai. Adapun proses koagulasi-flokulasi dan sedimentasi memiliki fungsi dalam mendestabilisasi koloid dan memisahkan padatan; serta filtrasi pasir, adsorpsi karbon aktif, dan membran *reverse osmosis* (RO) sebagai pengolahan lanjutan sebelum air dimanfaatkan kembali[6,7]. Kinerja rangkaian ini bergantung pada kesesuaian antara karakter inlet dan mekanisme tiap unit, sehingga evaluasi IPAL perlu menghubungkan hasil pengukuran dengan mekanisme proses, dan membandingkannya dengan baku mutu. Studi pada air limbah tekstil melaporkan efisiensi tinggi dari kombinasi unit sejenis, tetapi sumber pencemarnya (zat warna, garam, dan bahan pembantu proses basah) berbeda dengan RFL, sehingga hasilnya hanya digunakan sebagai pembanding teknologi, bukan sebagai acuan karakter air limbah benang ban[8,9,10,11].

Kualitas air olahan yang akan dimanfaatkan kembali memiliki persyaratan yang berbeda sesuai tujuan penggunaannya. Air higiene sanitasi digunakan untuk keperluan higiene perorangan dan sanitasi fasilitas, dengan persyaratan yang diatur dalam Permenkes No. 2 Tahun 2023 yang mencakup parameter mikrobiologi, fisik, dan kimia[12]. Air proses produksi adalah air yang digunakan langsung dalam tahapan produksi atau utilitas proses, persyaratannya ditentukan oleh kebutuhan teknis proses dan peralatan. Beberapa analisa dari parameter diantaranya kesadahan (*hardness*), besi (Fe), *Total Dissolved Solids* (TDS), konduktivitas, dan kekeruhan penting karena berkaitan dengan kestabilan proses serta potensi pembentukan kerak (*scaling*) dan *fouling* pada peralatan atau membran[13,14]. Pada industri benang ban, kation divalen seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} juga relevan secara teoretis terhadap kestabilan dispersi lateks[15], dan hal ini perlu diverifikasi dengan spesifikasi proses di lokasi. Air yang memenuhi persyaratan higiene sanitasi tidak otomatis memenuhi persyaratan air proses produksi, karena tujuan penggunaan dan parameter kritisnya berbeda. Penelitian ini mengevaluasi kualitas air olahan berdasarkan parameter yang tersedia untuk kebutuhan higiene sanitasi dan potensi pemanfaatan kembali dalam proses produksi.

Berdasarkan konseptual**,** *Zero Liquid Discharge* (ZLD) merupakan strategi pengelolaan air limbah tingkat

lanjut yang bertujuan menghilangkan pembuangan limbah cair ke lingkungan melalui pemulihan dan penggunaan kembali air serta pengelolaan lebih lanjut terhadap aliran konsentrat atau residu cair[2,12]. Penerapan ZLD dapat mengintegrasikan teknologi membran, seperti *reverse osmosis* (RO), untuk pemulihan air dan pemekatan aliran konsentrat, yang selanjutnya dapat dikombinasikan dengan proses penguapan dan/atau kristalisasi[2,12,13]. Penggunaan teknologi membran dalam pengolahan air limbah tidak dengan sendirinya menjadikan suatu sistem sebagai ZLD. Suatu sistem dikategorikan sebagai ZLD apabila seluruh aliran limbah cair, termasuk konsentrat atau *reject* dari unit membran, dikelola tanpa pembuangan cair ke lingkungan. Dalam penelitian ini, sistem pengolahan yang dikaji belum dikategorikan sebagai ZLD karena masih terdapat sebagian efluen yang dibuang ke lingkungan setelah memenuhi baku mutu. Sistem tersebut lebih tepat disebut sebagai *partial water reuse***,** yaitu pemanfaatan kembali sebagian air hasil olahan. ZLD dalam penelitian ini digunakan sebagai konsep pembanding dan arah pengembangan menuju pengelolaan air yang lebih sirkular, bukan sebagai kondisi aktual sistem yang diteliti[12–14]. Penerapan ZLD secara penuh masih menghadapi tantangan berupa kebutuhan investasi dan biaya operasi yang tinggi serta konsumsi energi yang relatif besar, terutama pada tahap pemekatan, penguapan, dan kristalisasi[13,14].

Evaluasi kelayakan pemanfaatan kembali air limbah industri perlu mempertimbangkan berbagai indikator, mencakup aspek teknis, lingkungan, sumber daya dan ekonomi secara komprehensif, sebagaimana diatur dalam standar evaluasi proses pengolahan dan pemanfaatan kembali air limbah industri[16]. Kualitas air hasil olahan yang akan dimanfaatkan kembali sebagai air proses produksi juga harus disesuaikan dengan spesifikasi teknis yang dipersyaratkan masing-masing jenis industri, mengingat variasi proses produksi memerlukan karakteristik air yang berbeda-beda[13].

Kesenjangan yang melandasi penelitian ini adalah sebagai berikut : (1) Kajian pemanfaatan kembali air limbah pada industri tekstil sebagian besar membahas air limbah proses pencelupan dan pencucian dengan sumber pencemar berupa zat warna dan bahan pembantu proses basah, sedangkan kajian karakter air limbah dan spesifikasi air proses pada industri benang ban, yang sumber pencemarnya berupa residu RFL, masih sangat terbatas.[17–20]; (2) Sebagian besar penelitian terdahulu mengevaluasi efisiensi teknologi pengolahan secara terpisah atau potensi *reuse* secara umum[8–10,21], evaluasi terpadu yang membedakan kesesuaian air olahan terhadap baku mutu lingkungan, persyaratan higiene sanitasi, dan indikator awal kesesuaian air proses produksi, serta menghubungkannya dengan mekanisme tiap unit pengolahan, masih terbatas; (3) Penerapan ZLD secara penuh dan pemanfaatan kembali air secara parsial (*partial water reuse*), termasuk didalamnya adanya pengelolaan konsentrat/*reject* membran, masih perlu diperjelas dalam konteks kajian sistem[22]. Penelitian ini melengkapi kesenjangan tersebut melalui evaluasi berbasis kondisi operasional aktual pada industri benang ban, dengan memperjelas posisi sistem sebagai *partial water reuse* serta membahas pengelolaan *reject* RO.

Kerangka pemikiran penelitian ini disusun dari karakter sumber air limbah benang ban, bukan dari potret industri tekstil. Pertama, proses produksi dan *dipping* RFL menentukan karakter air limbah, yaitu organik terlarut dari resin, koloid lateks, serta fluktuasi pH dan

beban. Kedua, karakter tersebut menentukan fungsi tiap unit IPAL: ekualisasi dan netralisasi meredam fluktuasi; aerasi mendegradasi organik yang dapat terurai; koagulasi-flokulasi dan sedimentasi memisahkan koloid dan padatan; filtrasi pasir, karbon aktif, dan RO menyisihkan partikel sisa, organik terlarut, dan ion. Ketiga, kinerja dinilai dengan efisiensi penyisihan, sedangkan simpangan baku *(standard deviation, SD)* dan koefisien variasi *(coefficient of variation, CV)* menilai margin kepatuhan dan kestabilan keluaran. Keempat, kesesuaian air olahan dinilai secara bertingkat sesuai tujuan penggunaan (baku mutu lingkungan, higiene sanitasi, dan indikator awal air proses). Kelima, aliran sisa (*reject* RO dan sebagian efluen) menentukan bahwa sistem berposisi sebagai *partial water reuse*, bukan ZLD.

Kesenjangan secara keseluruhan memerlukan pengkajian yang lebih spesifik dan terintegrasi pada industri benang ban. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada tiga aspek : pertama, penelitian ini menyajikan evaluasi empiris pemanfaatan kembali air limbah terolah pada industri manufaktur benang ban, dengan mempertimbangkan proses *dipping* RFL sebagai salah satu sumber pencemar spesifik dan menghubungkan hasil pengukuran dengan mekanisme penyisihan pada tiap unit pengolahan; kedua, penelitian ini menerapkan pendekatan evaluasi ganda yang membedakan secara eksplisit antara kesesuaian terhadap baku mutu lingkungan, persyaratan higiene sanitasi, dan indikator awal kesesuaian terhadap kebutuhan air proses produksi; ketiga, penelitian ini memposisikan kajian sistem sebagai *partial water reuse* menuju sirkularitas air, bukan sebagai *Zero Liquid Discharge* (ZLD), serta membahas pengelolaan *reject* RO sebagai bagian pengembangan sistem *reuse*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja IPAL dan kelayakan pemanfaatan air limbah terolah dalam mendukung pengelolaan air berkelanjutan pada industri benang ban melalui kajian kesesuaian air olahan terhadap baku mutu lingkungan, persyaratan higiene sanitasi, dan indikator kesesuaian air proses produksi.

BAHAN DAN METODA

Penelitian dilakukan pada salah satu industri manufaktur benang ban berskala besar di Indonesia. IPAL pabrik memiliki kapasitas pengolahan sebesar 240 m^3/hari. Pengambilan data dilakukan selama periode Januari–Maret 2024. Objek penelitian terdiri atas dua jenis air, yaitu (1) air limbah pada outlet akhir IPAL sebelum dialirkan ke lingkungan dan (2) air hasil pengolahan lanjutan yang ditujukan untuk dimanfaatkan kembali (*water reuse*) sebagai sumber air untuk kebutuhan yang sesuai dengan karakteristik dan persyaratan penggunaannya.

Proses produksi benang ban pada lokasi penelitian meliputi pembentukan benang/filamen, *twisting*, dan *dipping*. Pada tahap *dipping*, *tire cord* diberi perlakuan menggunakan sistem adhesif berbasis *Resorcinol-Formaldehyde-Latex* (RFL) untuk meningkatkan daya rekat antara *tire cord* dan kompon karet, yang selanjutnya diikuti dengan proses pengeringan dan *heat treatment* atau *curing*. Penggunaan sistem RFL serta tahapan pencelupan dan perlakuan panas pada *tire cord* nilon dan poliester telah dilaporkan pada penelitian mengenai *tire cord*[4,23]. Air limbah yang masuk ke sistem IPAL pada lokasi penelitian berasal dari kegiatan yang berkaitan dengan operasional dan pemeliharaan proses produksi sesuai aliran limbah yang terhubung ke sistem IPAL pabrik.

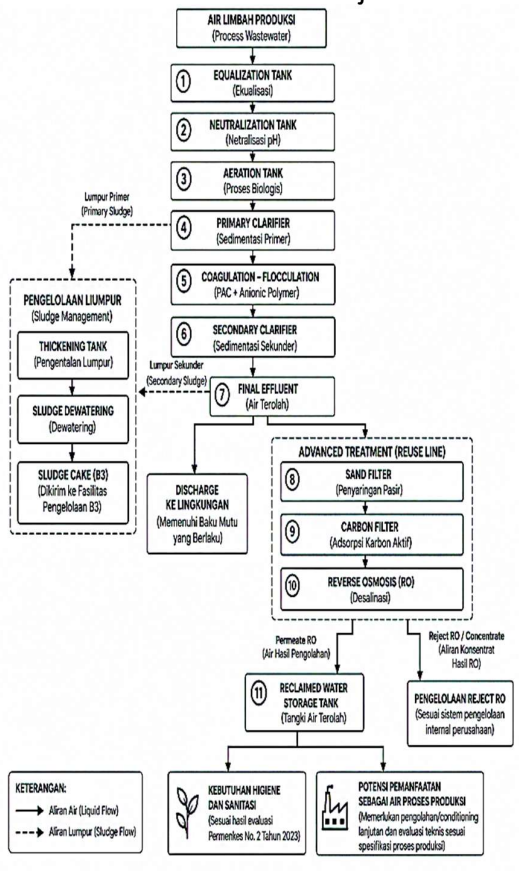
IPAL pabrik menerapkan sistem pengolahan air limbah secara bertahap yang terdiri atas unit pengolahan fisika,

biologi, kimia dan membran secara terintegrasi. Secara garis besar, air limbah mengalami tahapan pra-pengolahan berupa ekualisasi dan netralisasi, dilanjutkan dengan pengolahan biologi menggunakan sistem aerasi dan sedimentasi awal sebelum memasuki tahap pengolahan kimia sistem koagulasi-flokulasi menggunakan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) sebagai koagulan dan polimer anionik sebagai flokulan. Pada proses koagulasi-flokulasi memiliki fungsi menggumpalkan partikel koloid dan tersuspensi, sehingga lebih mudah dipisahkan melalui proses sedimentasi. Dosis koagulan dan flokulan disesuaikan dengan karakteristik dan kondisi air limbah yang masuk ke unit pengolahan sehingga dosis operasional dapat berubah selama proses pengolahan. Air hasil olahan (*final effluent*) yang memenuhi baku mutu selanjutnya dapat dialirkan untuk dibuang ke lingkungan atau dimanfaatkan kembali melalui pengolahan lanjutan berupa filtrasi pasir, filtrasi karbon aktif, dan *reverse osmosis* (RO).

Pada proses RO dihasilkan dua aliran utama, *permeate* dan *reject/concentrate*. Air *permeate* merupakan air hasil pemisahan membran yang digunakan sebagai objek pengujian air *reuse*, sedangkan aliran *reject/concentrate* merupakan aliran yang mengandung konsentrasi zat terlarut lebih tinggi dan perlu dikelola sesuai sistem pengelolaan limbah yang diterapkan oleh pabrik. Pemanfaatan air *permeate* sebagai air *reuse* dalam penelitian ini tidak secara langsung dikategorikan sebagai *zero liquid discharge* (ZLD), karena penerapan ZLD mensyaratkan pengelolaan aliran sisa hingga tidak terdapat pembuangan cairan akhir ke lingkungan.

Lumpur hasil sedimentasi diolah melalui proses *sludge dewatering* untuk mengurangi kadar air dan volume lumpur. *Cake* lumpur dikelola sesuai ketentuan pengelolaan limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) sebagaimana diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021[24,25].

Diagram alir sistem pengolahan air limbah dan skema pemanfaatan kembali air terolah disajikan pada Gambar 1. Titik pengambilan sampel influen berada pada inlet IPAL dan titik efluen berada pada outlet akhir IPAL (*final effluent*) sebelum filtrasi pasir. Dengan demikian, efisiensi penyisihan pada bagian Hasil mencerminkan kerja unit ekualisasi hingga koagulasi-flokulasi dan sedimentasi, sedangkan kerja filtrasi pasir, karbon aktif, dan RO tercermin pada kualitas air olahan lanjutan.



Gambar 1. Diagram Alir Sistem Pengolahan Air Limbah Dan Skema Pemanfaatan Kembali Air Terolah Pada Industri Manufaktur Benang Ban

Parameter yang diuji pada air limbah dan air hasil pengolahan lanjutan meliputi pH, *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solids* (TSS), kekeruhan, warna, *Total Dissolved Solids* (TDS), suhu, dan parameter mikrobiologi yang terdiri atas *Total Coliform* dan *Escherichia coli*. Pengujian dilakukan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI), yaitu pengukuran pH menggunakan pH meter berdasarkan SNI 06-6989.11-2004[26], COD menggunakan metode refluks tertutup secara spektrofotometri berdasarkan SNI 6989.2-2009[27], BOD menggunakan metode dilusi dengan inkubasi selama 5 hari pada suhu 20°C berdasarkan SNI 6989.72[28], dan TSS menggunakan metode gravimetri berdasarkan SNI 6989.3-2019[29]. Parameter mikrobiologi (*Total Coliform* dan *Escherichia coli*) dianalisis menggunakan metode *Most Probable Number* (MPN) mengacu pada SNI 01-2332.1-2006[30]. Parameter tambahan kesadahan total dianalisis secara titrimetri, sedangkan kadar besi (Fe) dianalisis secara spektrofotometri menggunakan spektrofotometer Hach DR 900. Kedua parameter tersebut adigunakan sebagai tambahan dalam evaluasi awal kesesuaian air hasil pengolahan sebagai air proses produksi.

Sampel air diambil pada dua titik utama, yaitu outlet akhir IPAL sebelum air dialirkan untuk pembuangan atau pengolahan lanjutan dan titik air hasil pengolahan lanjutan yang dimanfaatkan kembali. Pengambilan sampel sebanyak sebanyak enam kali pada masing-masing titik (n = 6), dilakukan menggunakan metode *grab sample* secara berkala dengan pengambilan sampel dua kali dalam sebulan selama periode Januari–Maret 2024. Notasi n pada seluruh tabel menyatakan jumlah pengambilan sampel tersebut, dan setiap nilai rata-rata ±SD dihitung dari enam hasil uji yang diambil sebanyak dua kali dalam sebulan periode Januari-Maret 2024.

Dalam penelitian ini, air proses produksi adalah air yang digunakan secara langsung atau tidak langsung dalam kegiatan produksi benang ban dan harus memenuhi persyaratan teknis kebutuhan proses dan peralatan produksi. Persyaratan tersebut berbeda dengan air untuk higiene dan sanitasi. Evaluasi air hasil pengolahan lanjutan dilakukan dengan membandingkan parameter pH, suhu, TDS, kekeruhan, warna, *Total Coliform*, dan *Escherichia coli* terhadap persyaratan kualitas air untuk keperluan higiene dan sanitasi berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023[12]. Hasil evaluasi digunakan untuk menunjukkan kualitas air *reuse* dari aspek higiene dan sanitasi. Pemenuhan persyaratan higiene dan sanitasi tidak digunakan sebagai dasar untuk menyatakan bahwa air hasil pengolahan telah memenuhi atau dapat langsung digunakan sebagai air proses produksi. Pemanfaatan air hasil pengolahan sebagai air proses produksi memerlukan pengujian parameter tambahan serta pembandingan dengan spesifikasi teknis proses yang berlaku pada industri benang ban di lokasi penelitian.

Data dianalisis secara deskriptif-evaluatif dengan membandingkan hasil pengujian air limbah terhadap baku mutu yang berlaku berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.16 Tahun 2019[34], serta membandingkan kualitas air hasil pengolahan lanjutan terhadap persyaratan higiene dan sanitasi berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023[12]. Tiga indikator kuantitatif digunakan dengan tujuan yang berbeda. Pertama, efisiensi penyisihan COD, BOD, dan TSS digunakan sebagai indikator utama kinerja proses karena menyatakan fraksi beban pencemar yang disisihkan IPAL.

Efisiensi dihitung dari konsentrasi rata-rata influen dan efluen akhir dengan persamaan berikut :

$$\boldsymbol{Efisiensi}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{C_{\{in\}} - C_{\{out\}}}}{\boldsymbol{C_{\{in\}}}}\ \boldsymbol{x\ 100\%}$$

Dimana :
C_{in} = konsentrasi rata-rata sebelum pengolahan (mg/L)
C_{out} = konsentrasi rata-rata setelah pengolahan (mg/L)

Kedua, simpangan baku *(standard deviation, SD)* menyatakan sebaran data dalam satuan yang sama dengan parameter, sehingga rata-rata SD dapat dibandingkan langsung dengan baku mutu untuk menilai margin kepatuhan, yaitu seberapa jauh rata-rata ditambah SD masih berada di bawah batas baku mutu[31]. Ketiga, koefisien variasi *(coefficient of variation, CV)* menyatakan SD relatif terhadap rata-rata tanpa satuan, sehingga dapat digunakan untuk membandingkan kestabilan antar parameter yang berbeda satuan dan besaran serta antara influen dan efluen[32]. Adapun persamaannya sebagai berikut :

$$\boldsymbol{CV}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{SD}}{\boldsymbol{Mean}}\ \boldsymbol{x\ 100\%}$$

CV influen digunakan sebagai indikator fluktuasi beban air limbah, sedangkan CV efluen digunakan sebagai indikator konsistensi keluaran IPAL. CV tidak dihitung untuk pH dan suhu karena pH berskala logaritmik dan suhu berskala interval (nol bukan titik nol mutlak), serta tidak dihitung untuk *Total Coliform* dan *E. coli* yang bernilai nol. CV pada parameter dengan rata-rata mendekati nol (kekeruhan) kurang informatif sehingga dibaca bersama nilai absolutnya. Berdasarkan jumlah pengamatan sebanyak enam (n = 6) selama Januari-Maret 2024, SD dan CV dipergunakan untuk menggambarkan dan membandingkan variasi data secara deskriptif, tanpa melakukan pengujian statistik inferensial.

HASIL

Kualitas dan kinerja IPAL dalam mengolah air limbah disajikan pada Tabel 1 dan 2. Tabel 1 menunjukkan karakteristik air limbah pada sistem IPAL serta perbandingannya dengan baku mutu air limbah industri tekstil, sedangkan Tabel 2 menyajikan efisiensi penyisihan parameter utama selama proses pengolahan. Notasi *n* = 6 pada seluruh tabel menyatakan jumlah pengambilan sampel (*grab sample*) pada masing-masing titik selama Januari–Maret 2024.

Tabel 1. Kualitas Air Limbah pada Sistem IPAL Industri Benang Ban dan Perbandingannya dengan Baku Mutu Air Limbah Industri Tekstil (*n* = 6, Periode Januari–Maret 2024)

Item	Influen (Mean ± SD)	CV Inlet (%)	Effluen (Mean ± SD)	CV Effluen (%)	Baku Mutu[33]
pH	7,34 ± 0,59	–	6,66 ± 0,13	–	6,0 – 9,0
COD (mg/L)	303,33 ± 53,23	17,6	46,17 ± 10,61	23,0	150
BOD (mg/L)	152,00 ± 26,48	17,4	23,33 ± 5,35	22,9	60
TSS (mg/L)	163,67 ± 60,13	36,7	17,67 ± 2,34	13,2	50

Keterangan: Baku mutu berdasarkan Permen LHK No. P.16/2019[33]. *n* = jumlah pengambilan sampel (*grab sample*) pada masing-masing titik (inlet dan outlet akhir IPAL) selama Januari–Maret 2024; SD = simpangan baku; CV = SD/mean × 100%; – = tidak dihitung (pH berskala logaritmik).

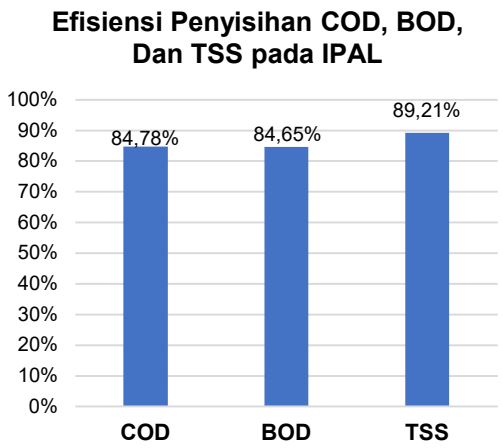
Tabel 2. Kinerja IPAL Industri Benang Ban (*n* = 6, Periode Januari–Maret 2024)

Item	Efisiensi	Status
pH	–	Memenuhi
COD (mg/L)	84,78 %	Memenuhi
BOD (mg/L)	84,65 %	Memenuhi
TSS (mg/L)	89,21 %	Memenuhi

Keterangan: Efisiensi = $(C_{in} - C_{out})/C_{in} \times 100\%$, dihitung dari konsentrasi rata-rata influen dan efluen akhir pada Tabel 1; status dibandingkan dengan baku mutu pada Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1 dan 2, dapat dilihat grafik yang menunjukkan efisiensi

penyisihan COD, BOD, dan TSS IPAL industri benang ban pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Efisiensi Penyisihan COD, BOD, dan TSS pada Sistem IPAL Industri Benang Ban

Parameter COD, BOD, dan TSS pada Tabel 1 dan 2 digunakan sebagai indikator kinerja tahap pengolahan konvensional dengan metode fisika-biologi-kimia dalam memenuhi baku mutu air limbah sebelum air dialirkan ke lingkungan maupun diteruskan ke unit pengolahan lanjutan berbasis membran. Ketiga parameter tersebut bukan merupakan indikator langsung kesesuaian air sebagai air proses produksi maupun indikator penerapan *Zero Liquid Discharge* (ZLD), tetapi menunjukkan keberhasilan pengolahan awal sebelum air diteruskan ke tahap filtrasi dan *reverse osmosis* (RO). Kualitas air hasil pengolahan lanjutan selanjutnya dievaluasi berdasarkan parameter yang relevan dengan tujuan pemanfaatannya kembali, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Variabilitas karakteristik influen terlihat terutama pada TSS dengan CV sebesar 36,7%, sedangkan COD dan BOD masing-masing memiliki CV sebesar 17,6% dan 17,4%. Setelah pengolahan, CV TSS menurun menjadi 13,2%, sedangkan CV COD dan BOD efluen meningkat menjadi 23,0% dan 22,9%. Peningkatan CV ini terjadi walaupun SD absolut menurun (COD dari 53,23 menjadi 10,61 mg/L; BOD dari 26,48 menjadi 5,35 mg/L; TSS dari 60,13 menjadi 2,34 mg/L) karena rata-rata konsentrasi efluen jauh lebih rendah. Rata-rata ditambah satu SD pada efluen masih berada di bawah baku mutu: COD 56,78 mg/L (baku mutu 150 mg/L), BOD 28,68 mg/L (60 mg/L), dan TSS 20,01 mg/L (50 mg/L).

Tabel 3. Kualitas Air *Reuse* Terhadap Regulasi Higiene dan Sanitasi (n = 6, periode Januari–Maret 2024)

Item	Mean ± SD	CV (%)	Baku Mutu Reuse[12]	Status
pH	6,95 ± 0,19	–	6,5 – 8,5	Memenuhi
Suhu (°C)	25,87 ± 1,10	–	Suhu udara ±3°C	Memenuhi
TDS (mg/L)	45,50 ± 10,17	22,3	≤300	Memenuhi
Kekeruhan (NTU)	1,00 ± 1,55	155,0	≤3	Memenuhi
Warna (TCU)	5,17 ± 1,72	33,3	≤10	Memenuhi
Total Coliform (CFU/100 mL)	0	–	0	Memenuhi
E. coli (CFU/100 mL)	0	–	0	Memenuhi

Keterangan: Baku Mutu Air *Reuse* berdasarkan Permenkes No. 2/2023 untuk air higiene sanitasi[12]. CV tidak dihitung (–) untuk pH, suhu, dan parameter bernilai nol; CV kekeruhan dibaca bersama nilai absolutnya karena rata-rata mendekati nol.

Berdasarkan Tabel 3, seluruh parameter air hasil pengolahan lanjutan yang diuji memenuhi baku mutu air untuk higiene dan sanitasi berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023. Nilai pH sebesar 6,95 ± 0,19, TDS sebesar 45,50 ± 10,17 mg/L, kekeruhan sebesar 1,00 ± 1,55 NTU, dan warna sebesar 5,17 ± 1,72 TCU berada dalam rentang atau di bawah batas yang dipersyaratkan. Selain itu, hasil pengujian mikrobiologi menunjukkan Total Coliform dan *Escherichia coli* sebesar 0, sehingga dari parameter yang diuji, air hasil pengolahan lanjutan memenuhi persyaratan yang digunakan untuk

evaluasi air higiene dan sanitasi.

Nilai CV tertinggi pada air hasil pengolahan lanjutan terdapat pada kekeruhan, yaitu 155,0%, sedangkan warna memiliki CV sebesar 33,3% dan TDS sebesar 22,3%. CV kekeruhan yang tinggi berkaitan dengan rata-rata yang rendah (1,00 NTU) sehingga perubahan kecil secara absolut menghasilkan variasi relatif yang besar. Rata-rata ditambah satu SD (2,55 NTU) masih di bawah batas baku mutu sebesar ≤3 NTU, tetapi margin tersebut lebih sempit daripada yang tampak dari nilai rata-rata saja.

Selain dievaluasi berdasarkan persyaratan higiene dan sanitasi, karakteristik permeat reverse osmosis (RO) juga ditinjau secara indikatif untuk menilai potensinya sebagai air proses produksi. Evaluasi ini mencakup parameter pH, TDS, dan kekeruhan yang telah disajikan pada Tabel 3, serta parameter tambahan berupa kesadahan dan besi (Fe). Penilaian dilakukan berdasarkan rentang umum yang dilaporkan dalam literatur teknik pengolahan air industri, sehingga tidak dimaksudkan sebagai pernyataan pemenuhan standar universal air proses.

Tabel 4. Evaluasi Indikatif Karakteristik Permeat RO untuk Potensi Penggunaan sebagai Air Proses Produksi (n = 6, periode Januari–Maret 2024)

Parameter	Hasil Pengukuran	Rentang Umum Persyaratan Air Proses[12,14]	Keterangan
pH	6,95 ± 0,19	6,5 – 8,5	Indikatif sesuai
TDS (mg/L)	45,50 ± 10,17	<500	Indikatif sesuai
Kekeruhan (NTU)	1,00 ± 1,55	Rendah	Indikatif sesuai
Kesadahan (mg/L $CaCO_3$)	<1	Rendah	Sangat rendah
Besi/Fe (mg/L)	0,029 ± 0,011 mg/L	Rendah	Konsentrasi rendah

Keterangan : Hasil pengukuran dinyatakan sebagai rata-rata ± simpangan baku (SD), kecuali kesadahan yang dilaporkan sebagai <1 mg/L $CaCO_3$ sesuai hasil analisis. n = 6 sampel *permeate* RO. Rentang umum persyaratan air proses bersifat indikatif berdasarkan literatur teknik pengolahan air industri[12,14], bukan spesifikasi universal untuk seluruh proses produksi tekstil.

Evaluasi kesesuaian air proses produksi masih bersifat awal karena spesifikasi teknis aktual pada masing-masing unit proses belum seluruhnya dievaluasi. Parameter lain yang relevan terhadap proses tertentu dapat menjadi bagian dari pengujian lanjutan. Pada proses reverse osmosis (RO), selain menghasilkan air permeate yang dilakukan pemanfaatan kembali, dihasilkan juga aliran *reject* (*concentrate*) yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan sistem secara keseluruhan. Unit RO memiliki kapasitas desain sebesar 10 m³/jam dengan *recovery* sekitar 70%, sehingga sekitar 30% aliran umpan menjadi *reject.* Karakteristik *reject* RO selama periode pengamatan disajikan pada Tabel 5 dalam bentuk rata-rata ± simpangan baku (SD) dan koefisien variasi (CV) untuk menggambarkan konsentrasi serta variasi relatif parameter yang diukur.

Tabel 5. Karakteristik Air *Reject Reverse Osmosis* (RO) (Rata-rata ± SD, n = 6)

Parameter	Hasil Pengukuran	CV (%)
TDS (mg/L)	1.947,17 ± 89,97	4,62
COD (mg/L)	35,83 ± 3,66	10,20

Keterangan: n = 6 sampel air *reject* RO selama periode Januari-Maret 2024 pengamatan; SD = simpangan baku; CV = koefisien variasi, dihitung sebagai (SD/rata-rata) × 100%.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa reject RO memiliki TDS sebesar 1.947,17 ± 89,97 mg/L dan COD sebesar 35,83 ± 3,66 mg/L. Nilai TDS yang relatif tinggi menunjukkan terjadinya pemekatan zat terlarut selama proses pemisahan membran.

Berdasarkan kondisi operasional di lokasi penelitian, reject saat ini dibuang, sedangkan pemanfaatan sebagai air penyiraman tanaman menjadi salah satu alternatif pengelolaan. Pemanfaatan tersebut tetap memerlukan evaluasi lebih lanjut terhadap karakteristik kualitas air dan kesesuaiannya dengan kebutuhan tanaman sebelum diterapkan secara rutin.

PEMBAHASAN

1. Kinerja IPAL dan mekanisme penyisihan pada tiap tahap

Efisiensi penyisihan COD, BOD, dan TSS sebesar 84,78%; 84,65%; dan 89,21% merupakan hasil kerja unit ekualisasi hingga koagulasi-flokulasi dan sedimentasi akhir, karena titik pengambilan efluen akhir berada sebelum filtrasi pasir, karbon aktif, dan RO (Gambar 1). Penelitian ini hanya mengukur influen dan efluen akhir, tanpa pengukuran antarunit, dosis PAC dan polimer, waktu tinggal, maupun oksigen terlarut. Kontribusi kuantitatif tiap unit karenanya tidak dapat dipisahkan, dan uraian berikut menjelaskan mekanisme yang secara prinsip bekerja pada masukan berupa air limbah yang mengandung residu RFL.

Pada tahap awal, ekualisasi mencampur aliran dari kegiatan produksi, pembilasan, dan pembersihan peralatan *dipping* sehingga puncak konsentrasi teredam sebelum masuk ke unit biologi. Hal ini relevan karena influen menunjukkan fluktuasi beban yang nyata (CV TSS 36,7%; CV COD 17,6%). Netralisasi menyesuaikan pH ke kisaran mendekati netral: pH influen dapat bergeser sekitar ±0,6 satuan (7,34 ± 0,59), sedangkan efluen berada pada 6,66 ± 0,13. Kisaran tersebut diperlukan karena aktivitas mikroorganisme aerobik dan hidrolisis aluminium dari PAC sama-sama sensitif terhadap pH[6,15].

Pada unit aerasi, mikroorganisme heterotrof aerobik memanfaatkan oksigen terlarut untuk mengoksidasi bahan organik terlarut yang dapat terurai menjadi CO_2, air, dan biomassa baru yang membentuk flok biologis[6]. Rasio BOD/COD influen sekitar 0,50 (152,00/303,33) umumnya dipandang sebagai indikasi biodegradabilitas sedang hingga baik, sehingga unit aerasi berpotensi menyisihkan porsi organik yang besar. Biomassa dan padatan yang terbentuk dipisahkan pada sedimentasi, yaitu pengendapan gravitasi untuk partikel yang cukup besar dan padat. Partikel lateks yang berukuran koloid dan umumnya bermuatan permukaan tidak mengendap secara gravitasi dalam waktu praktis, sehingga memerlukan tahap koagulasi-flokulasi[15].

Pada koagulasi-flokulasi, PAC terhidrolisis menghasilkan spesies aluminium polinuklear bermuatan positif dan endapan aluminium hidroksida. Spesies bermuatan positif menetralkan muatan negatif permukaan koloid (netralisasi muatan), sedangkan endapan hidroksida menjerat koloid dan sebagian organik terlarut (*sweep flocculation* dan adsorpsi), sehingga terbentuk mikroflok[15]. Polimer anionik kemudian menjembatani mikroflok melalui adsorpsi pada permukaan flok (*bridging*) menjadi flok yang lebih besar dan padat sehingga mengendap pada sedimentasi akhir. Mekanisme ini sesuai dengan tingginya penyisihan TSS (89,21%) dan mendukung penyisihan fraksi COD dan BOD yang berbentuk partikulat atau koloid. Karena beban influen berfluktuasi, dosis koagulan disesuaikan selama operasi; konsistensi TSS efluen (CV 13,2%) dapat mengindikasikan bahwa penyesuaian tersebut bekerja efektif, walaupun data dosis tidak tersedia untuk diverifikasi.

Penyisihan COD (84,78%) dan BOD (84,65%) hampir sama, dan rasio BOD/COD efluen (23,33/46,17 ≈ 0,51)

tetap seperti influen. Jika penyisihan hanya terjadi melalui oksidasi biologis fraksi yang dapat terurai, fraksi COD yang tidak terurai akan semakin dominan dan rasio BOD/COD akan turun. Pola yang tetap ini mengindikasikan bahwa penyisihan bahan organik juga berlangsung secara fisika-kimia terhadap fraksi koloid dan partikulat (misalnya partikel lateks dan organik yang terikat padanya) pada tahap koagulasi-flokulasi, yang menyisihkan fraksi terurai dan tak terurai secara proporsional. Ini merupakan interpretasi dari data dan perlu diverifikasi dengan pengukuran antarunit. Efisiensi COD sebesar 84,78% lebih rendah daripada efisiensi lebih dari 90% yang dilaporkan Raj et al. untuk kombinasi koagulasi-flokulasi dan adsorpsi pada air limbah tekstil[3]; perbedaan matriks air limbah dan posisi tahap adsorpsi (karbon aktif pada IPAL ini berada setelah titik pengambilan efluen) membuat perbandingan ini hanya bersifat indikatif. Efektivitas koagulasi-flokulasi pada berbagai matriks air limbah juga dilaporkan pada penelitian lain[9,10].

2. Kestabilan keluaran: peran SD dan CV

Efisiensi penyisihan, SD, dan CV menjawab pertanyaan yang berbeda. Efisiensi menyatakan seberapa besar beban pencemar disisihkan sehingga menjadi indikator utama kinerja proses, tetapi efisiensi dari nilai rata-rata tidak memperlihatkan seberapa stabil hasil tersebut dari satu pengambilan sampel ke pengambilan berikutnya. Pada *grab sample* dengan beban yang berfluktuasi dan n = 6, nilai rata-rata dapat tidak mewakili kondisi sesaat. SD menunjukkan sebaran absolut sehingga dipakai untuk menilai margin terhadap baku mutu, sedangkan CV menunjukkan sebaran relatif sehingga dipakai untuk membandingkan kestabilan antarparameter dan antara influen dan efluen[31,32]. Dengan pembagian fungsi ini, efisiensi digunakan untuk menilai kinerja, SD untuk menilai kepatuhan, dan CV untuk menilai kestabilan operasi.

CV TSS influen sebesar 36,7% menunjukkan beban padatan yang berfluktuasi. Secara mekanistik hal ini dapat berkaitan dengan siklus produksi dan pembersihan peralatan *dipping* (dugaan; tidak diukur terpisah), dan penurunannya menjadi 13,2% pada efluen menunjukkan bahwa rangkaian ekualisasi dan koagulasi-flokulasi-sedimentasi meredam fluktuasi tersebut. Sebaliknya, CV COD dan BOD efluen (23,0% dan 22,9%) lebih tinggi daripada CV influen (17,6% dan 17,4%) meskipun SD absolutnya menurun; kenaikan CV ini terutama dipengaruhi oleh rata-rata yang jauh lebih kecil. Untuk menilai kepatuhan, SD dan margin terhadap baku mutu lebih tepat dibaca: rata-rata ditambah dua SD efluen (COD 67,39 mg/L; BOD 34,03 mg/L; TSS 22,35 mg/L) masih jauh di bawah baku mutu (150, 60, dan 50 mg/L), dengan asumsi sebaran mendekati normal yang belum dapat diuji pada n = 6. CV COD dan BOD efluen yang relatif lebih besar menandakan bahwa fluktuasi keluaran organik masih perlu dikendalikan, misalnya melalui pemantauan rutin dan penyesuaian dosis.

Pada air *reuse*, kekeruhan 1,00 ± 1,55 NTU memiliki CV 155,0% karena SD lebih besar daripada rata-rata, karena nilai kekeruhan tidak mungkin negatif, kombinasi ini menandakan sebaran yang condong ke kanan: sebagian sampel berada jauh di atas rata-rata dan mendekati batas ≤3 NTU, sedangkan sebagian lain mendekati nol. Rata-rata ditambah satu SD (2,55 NTU) masih di bawah batas baku mutu, tetapi margin ini jauh lebih sempit daripada yang tampak dari nilai rata-rata saja. Hal ini menunjukkan alasan SD harus dilaporkan bersama rata-rata, dan

mendasari saran penyajian data individual, median, serta rentang minimum-maksimum pada penelitian lanjutan.

3. Mekanisme pengolahan lanjutan dan kualitas air *reuse*

Filtrasi pasir menyisihkan sisa flok halus melalui penyaringan dan penempelan partikel pada butiran media, sedangkan karbon aktif menjerap senyawa organik terlarut berberat molekul rendah (termasuk, secara teoretis, residu fenolik seperti resorsinol) pada pori-porinya melalui adsorpsi fisik[7]. Kedua unit ini juga berfungsi sebagai *pretreatment* RO karena menurunkan partikel dan organik penyebab *fouling* membran[34]. Dukungan data pada *reject* RO berperan secara tidak langsung. Konsentrat mengandung zat yang tertolak pada konsentrasi lebih tinggi daripada umpan, sehingga COD *reject* (35,83 mg/L) yang lebih rendah daripada COD efluen akhir (46,17 mg/L) berarti COD umpan RO lebih rendah dari 35,83 mg/L, atau setidaknya 22% lebih rendah daripada efluen akhir (1 − 35,83/46,17). Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian organik telah disisihkan oleh filtrasi pasir dan karbon aktif sebelum RO. Ini merupakan inferensi neraca sederhana, bukan pengukuran langsung.

Pada RO, air melewati membran semipermeabel padat di bawah tekanan yang melampaui tekanan osmotik, sedangkan ion dan molekul terlarut tertahan melalui mekanisme pelarutan-difusi, ukuran, dan muatan[34]. Hasilnya, *permeate* memiliki TDS 45,50 ± 10,17 mg/L, kesadahan <1 mg/L $CaCO_3$, dan Fe 0,029 mg/L, jauh lebih rendah daripada aliran konsentrat (TDS 1.947,17 mg/L). Ion divalen seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} umumnya tertahan lebih efektif daripada ion monovalen, sejalan dengan kesadahan yang sangat rendah. Dengan *recovery* 70%, neraca massa sederhana :

$$Q_f x C_f = (Q_p x C_p) + (Q_r x C_r)$$

Keterangan:
Q_f = debit umpan (*feed)*
Q_p = debit *permeate*
Q_r = debit *reject*
C_f = debit umpan (*feed)*
C_p= debit *permeate*
C_r = debit *reject*

memberikan estimasi TDS umpan sekitar 616 mg/L (0,7 × 45,50 + 0,3 × 1.947,17) dan faktor pemekatan sekitar 3,2 kali (1.947,17/616), mendekati nilai teoretis 1/(1 − 0,70) = 3,3. Estimasi ini bersifat indikatif karena TDS umpan RO tidak diukur dan *recovery* merupakan nilai desain. Pemekatan tersebut menjelaskan mengapa *reject* bernilai TDS tinggi dan tidak dapat dibuang atau digunakan tanpa evaluasi.

Air hasil pengolahan lanjutan memenuhi seluruh parameter fisika, kimia, dan mikrobiologi yang digunakan untuk menilai air higiene sanitasi, sehingga berpotensi dimanfaatkan kembali untuk keperluan higiene karyawan. Nilai *Total Coliform* dan *E. coli* sebesar nol sejalan dengan penahanan mikroorganisme oleh membran RO; namun keamanan mikrobiologis pada titik penggunaan juga bergantung pada integritas membran serta kebersihan tangki dan jaringan distribusi, yang tidak dievaluasi dalam penelitian ini. Hasil ini sejalan dengan penelitian Ćurić dan Dolar yang menunjukkan integrasi koagulasi-flokulasi dan teknologi membran dapat menghasilkan air berkualitas tinggi untuk penggunaan kembali pada proses pencucian dan pencelupan tekstil[18].

4. Kesesuaian air proses, *reject* RO, dan posisi sistem

Persyaratan higiene sanitasi tidak dapat disamakan dengan kesesuaian sebagai air proses produksi. Kebutuhan air ditentukan oleh fungsi pada titik penggunaannya, seperti proses *dipping* RFL, pendinginan, dan utilitas. TDS yang rendah, kesadahan yang sangat

rendah, dan Fe yang rendah memberi indikasi awal yang baik karena mengurangi potensi kerak dan endapan pada peralatan[13,14]. Secara teoritis, air dengan kation divalen rendah lebih aman bagi kestabilan dispersi lateks pada RFL, karena kation multivalen efektif mendestabilisasi koloid bermuatan negatif[15]. Hal ini membutuhkan diverifikasi terhadap spesifikasi air proses di lokasi, termasuk silika dan klorida yang belum diuji. Berdasarkan parameter yang telah diuji, pH, TDS, dan kekeruhan hanya memberikan indikasi awal terhadap potensi penggunaan sebagai air proses produksi, belum merupakan kesimpulan teknis yang menyeluruh[35].

Sistem RO juga menghasilkan aliran *reject* atau konsentrat dengan konsentrasi zat terlarut lebih tinggi dibandingkan air umpan, sehingga dapat menghasilkan *permeate* yang berkualitas tinggi, namun belum menunjukkan bahwa sistem telah mencapai ZLD. Pengelolaan konsentrat dapat dilakukan melalui pengembalian ke unit pengolahan apabila karakteristik dan kapasitas sistem memungkinkan, pengolahan tambahan, *high-recovery RO*, atau pemekatan lebih lanjut melalui evaporasi/kristalisasi untuk sistem yang diarahkan menuju ZLD[22,36]. Pengelolaan aktual konsentrat RO tidak dievaluasi secara khusus dalam penelitian ini, sehingga aspek tersebut menjadi bagian yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan sistem *partial water reuse*.

Penelitian ini melengkapi kajian terdahulu yang sebagian besar membahas air limbah proses basah tekstil dengan mengevaluasi pemanfaatan air limbah terolah pada industri benang ban, yang sumber pencemarnya berupa residu RFL, serta menghubungkan hasil pengukuran dengan mekanisme tiap unit pengolahan. Evaluasi dilakukan secara terintegrasi melalui kinerja pengolahan air limbah, kesesuaian terhadap standar higiene sanitasi, serta indikator awal kesesuaian air proses produksi. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan potensi *partial water reuse*, tetapi belum dapat menyatakan kesesuaian teknis air pada seluruh titik proses produksi dan bukan merupakan penerapan ZLD penuh, karena masih terdapat aliran air yang perlu dikelola dan sebagian efluen masih dialirkan ke lingkungan. Keterbatasan penelitian ini meliputi jumlah pengambilan sampel yang terbatas (n = *6*) menggunakan metode *grab sampling*, serta belum tersedianya data pengukuran pada setiap unit pengolahan, dosis bahan kimia, dan parameter operasi secara terperinci. Pembahasan dalam hal ini adalah mengenai mekanisme penyisihan pada masing-masing unit didasarkan pada prinsip proses pengolahan dan karakteristik hasil pengukuran pada titik sampling yang tersedia, bukan pada evaluasi empiris setiap unit secara terpisah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pemanfaatan kembali air limbah terolah pada industri manufaktur benang ban dapat diterapkan sebagai bagian dari upaya pengelolaan air berkelanjutan. Rangkaian ekualisasi-netralisasi, aerasi, sedimentasi, dan koagulasi-flokulasi menghasilkan efluen yang memenuhi baku mutu air limbah industri dengan efisiensi penyisihan COD, BOD, dan TSS masing-masing sebesar 84,78%; 84,65%; dan 89,21%. Mekanisme utamanya adalah peredaman fluktuasi beban dan pH, oksidasi biologis bahan organik yang dapat terurai, serta destabilisasi dan pemisahan koloid dan padatan melalui koagulasi-flokulasi. Kestabilan keluaran dinilai melalui SD dan CV (*n* = 6): CV TSS menurun dari 36,7% pada influen menjadi 13,2% pada efluen, sedangkan CV COD dan BOD efluen (23,0% dan 22,9%) masih menunjukkan fluktuasi, walaupun rata-

rata ditambah dua SD tetap berada di bawah baku mutu. Air hasil pengolahan lanjutan (filtrasi pasir, karbon aktif, dan RO) memenuhi seluruh parameter fisika, kimia, dan mikrobiologi yang digunakan untuk penilaian air higiene sanitasi; CV kekeruhan yang tinggi (155,0%) menandakan margin kepatuhan yang sempit sehingga perlu pemantauan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa air hasil pengolahan lanjutan berpotensi untuk dimanfaatkan kembali sebagai air higiene sanitasi dan memiliki indikasi awal untuk pemanfaatan sebagai air proses produksi**.** Kesesuaian sebagai air proses produksi belum dapat dinyatakan secara menyeluruh karena beberapa parameter teknis belum dilakukan pengujian. Parameter yang telah diuji mencakup kesadahan dan Fe, sedangkan silika dan klorida belum diuji. Kajian sistem termasuk kategori *partial water reuse*, bukan ZLD, karena masih terdapat aliran *reject* RO dan sebagian efluen yang dikelola melalui sistem pembuangan yang berlaku. Parameter COD, BOD, dan TSS menunjukkan kinerja pengolahan air limbah, sedangkan penilaian kesesuaian air proses memerlukan parameter teknis yang sesuai dengan kebutuhan pada masing-masing titik penggunaan.

Saran

Penelitian ini masih memerlukan pengujian lanjutan dan evaluasi karakteristik dan pengelolaan *reject* RO serta neraca air secara lebih rinci untuk menentukan peluang peningkatan *partial water reuse* menuju sistem pemanfaatan air yang lebih tinggi. Pengujian pada titik penggunaan secara langsung juga diperlukan untuk memastikan kesesuaian teknis air olahan terhadap kebutuhan proses produksi. Pengukuran antarunit, pencatatan dosis PAC dan polimer, serta penambahan jumlah sampel dengan pasangan waktu influen-efluen disarankan agar efisiensi per kejadian dan SD efisiensi dapat dihitung, dan agar data individual, median, serta rentang minimum-maksimum dapat dilaporkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menghaturkan terima kasih kepada Universitas Insan Cendekia Mandiri Bandung untuk dukungan akademik, semua pihak, serta tim peneliti untuk kontribusi dalam mendukung terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Wooter. *Progress on Change in Water-Use Efficiency: Mid-Term Status of SDG Indicator 6.4. 1 and Acceleration Needs, with Special Focus on Food Security and Climate Change, 2024*. (Food & Agriculture Org., 2024).
2. Thombre, N., Patil, P., Yadav, A. & Patwardhan, A. A short review on water management and reuse in textile industry – a sustainable approach. *Discov. Water* **5**, (2025).
3. Yazıcı, N. *et al.* The outstanding interfacial adhesion between acrylo-POSS/natural rubber composites and polyamide-based cords: 'An environmentally friendly alternative to resorcinol-formaldehyde latex coating'. *Polymer (Guildf).* **228**, 123880 (2021).
4. Job, L. & Joseph, R. Studies on Rubber-to-Nylon Tire Cord Bonding. *J. Appl. Polym. Sci.* **71**, 1197–1202 (1999).
5. Huang, W. *et al.* A new eco-friendly dipping system for PA66 fiber cords/rubber composites with strong interfacial adhesion and good fatigue stability. *Compos. Part B Eng.* **253**, 110541 (2023).
6. Metcalf & Eddy, A. *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. (McGraw-Hill Education., 2014).
7. Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. & Tchobanoglous, G. *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. (John Wiley & Sons, 2012).
8. Raj, S., Singh, H. & Bhattacharya, J. Treatment of textile industry wastewater based on coagulation-flocculation aided sedimentation followed by adsorption: Process studies in an industrial ecology concept. *Sci. Total Environ.* **857**, 159464 (2023).
9. Ennadi, B. *et al.* Integrated coagulation-flocculation and column adsorption processes for efficient textile wastewater treatment. *Process Saf. Environ. Prot.* 108264 (2025).
10. Vasiljević, S. *et al.* Efficiency of coagulation/flocculation for the removal of complex mixture of textile fibers from water. *Processes* **11**, 820 (2023).
11. Youcef, S. *et al.* Chemical oxygen demand (COD) reduction in wastewater from the textile industry by coagulation-flocculation and adsorption. *Environ. Monit. Assess.* **197**, 536 (2025).
12. Kementerian Kesehatan. Permenkes No. 2 Tahun 2023. *Kemenkes Republik Indones.* 1–175 (2023).
13. SUEZ. Industrial water: process water. *Degrémont® Water Handbook* https://www.suezwaterhandbook.com/Water-and-generalities/What-water-should-we-treat-and-why/Industrial-water/process-water.
14. Ion Exchange Global. Key Water Quality Parameters for Industrial Use. *Ion Exchange Global* https://ionexchangeglobal.com/key-water-quality-parameters-for-industrial-use/ (2025).
15. Bratby, J. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. (IWA publishing, 2016).
16. International Organization for Standardization. ISO 23043:2021- Evaluation methods for industrial wastewater treatment reuse processes. https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23043:ed-1:v1:en.
17. Gomes, K., Caucci, S., Morris, J., Guenther, E. & Miggelbrink, J. Sustainability transformation in the textile industry—The case of wastewater management. *Bus. Strateg. Dev.* **7**, 1–16 (2024).
18. Ćurić, I. & Dolar, D. Investigation of Pretreatment of Textile Wastewater for

Membrane Processes and Reuse for Washing Dyeing Machines. *Membranes (Basel).* **12**, (2022).
19. Nahar, N., Haque, M. S. & Haque, S. E. Groundwater conservation, and recycling and reuse of textile wastewater in a denim industry of Bangladesh. *Water Resour. Ind.* **31**, 100249 (2024).
20. López-Casaperalta, P. *et al.* Optimization of a Textile Effluent Treatment System and Evaluation of the Feasibility to Be Reused as Influents in Textile Dyeing Processes. *Sustain.* **14**, (2022).
21. Ćurić, I., Dolar, D. & Bošnjak, J. Reuse of textile wastewater for dyeing cotton knitted fabric with hybrid treatment: Coagulation/sand filtration/UF/NF-RO. *J. Environ. Manage.* **295**, 113133 (2021).
22. Pundir, A. *et al.* Innovations in textile wastewater management: a review of zero liquid discharge technology. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **31**, 12597–12616 (2024).
23. Tian, L., Lv, P., Zhuo, J. & Wei, Q. Preparation and characteristics of an advanced polyester tire cord with hybrid effect. *J. Eng. Fiber. Fabr.* **14**, (2019).
24. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah*. (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, Indonesia, 2019).
25. Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Permen LHK No. P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019. *Peratur. Menteri Lingkung. Hidup Dan Kehutan. Republik Indones. Perubahan Kedua atas Peratur. Menteri Lingkung. Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah* **53**, 1689–1699 (2019).
26. SNI. Air dan air limbah – Bagian 11: Cara uji derajat keasaman (pH) dengan menggunakan alat pH meter. *Badan Stand. Nas.* 1–3 (2004).
27. SNI. 3884-SNI 6989.2-2009-Air dan air limbah - Bagian 2 Cara uji kebutuhan oksigen kimiawi (Chemical Oxygen DemandCOD) dengan refluks tertutup secara spekt.pdf.
28. SNI 6989.72:2009. SNI 6989.72:2009 tentang Cara Uji Kebutuhan Oksigen Biokimia (biochemical Oxygen Demand/BOD). *Air dan air limbah-Bagian 72 Cara uji Kebutuhan Oksigen Biokimia (Biochemical Oxyg. Demand/ BOD)* 1–20 (2009).
29. SNI. SNI 6989.3-2019-Air dan air limbah – Bagian 3: Cara uji padatan tersuspensi total (total suspended solids/TSS) secara gravimetri.
30. [BSN] Badan Standardisasi Nasional. Cara uji mikrobiologi-Bagian 1: Penentuan koliform dan Escherichia coli pada produk perikanan. *Badan Standarisasi Nas.* 1–19 (2015).
31. Altman, D. G. & Bland, J. M. Standard deviations and standard errors. *BMJ Br. Med. J.* **331**, 903 (2005).
32. Reed, G. F., Lynn, F. & Meade, B. D. Use of coefficient of variation in assessing variability of quantitative assays. *Clin. Vaccine Immunol.* **9**, 1235–1239 (2002).
33. Adeel, S. *et al.* Eco-friendly approach towards isolation of colorant from Esfand for bio-mordanted silk dyeing. *Env. Sci Pollut Res* **29**, (2022).
34. Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B. & Moulin, P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Res.* **43**, 2317–2348 (2009).
35. International Organization for Standardization. INTERNATIONAL STANDARD Evaluation methods for industrial wastewater treatment reuse processes. vol. 2021 https://www.iso.org/cms/live/live/es/sites/isoorg/contents/data/standard/07/43/74376.html (2021).

36. The Watertreatment Magazine. Zero liquid discharge (ZLD) in the textile industry: a complete guide for sustainability managers. https://watertreatmentmagazine.com/en/zero-liquid-discharge-strategy/ (2025).