

Pengolahan Air Terproduksi Berbasis Teknologi Hybrid Sebagai Upaya Mitigasi Risiko Bahaya Lingkungan dan K3 di PT XYZ

Hybrid Technology-Based Produced Water Treatment as a Risk Mitigation Effort for Environmental and Occupational Health & Safety Hazards at PT XYZ

Teguh Santoso^{1*}, Rochim Bakti Cahyono²

¹ Magister Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

² Program Studi Magister Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

ABSTRACT

Produced water is the main waste generated from oil and gas exploration and production activities, containing hazardous organic and inorganic compounds such as phenol, ammonia, sulfide, as well as oil and grease, which have the potential to pollute the environment and pose risks to occupational health and safety (OHS), particularly from exposure to H₂S and ammonia gases. This study employed an experimental design through laboratory testing and pilot-plant simulation, comprising aeration, coagulation-flocculation, biological aeration, and filtration processes at the wastewater treatment plant (WWTP) of PT XYZ in Indramayu. Samples were collected from the WWTP inlet and outlet using the composite sampling method over a four-month period (April–August 2025), totaling 153 samples with triplicate tests for each parameter, including temperature, pH, oil and grease, COD, phenol, sulfide, and ammonia, in accordance with APHA (2017) standards. The results showed that the hybrid system reduced oil and grease, COD, phenol, and ammonia by more than 80%, and sulfide by more than 70%, indicating that the effluent met the quality standards set by the Ministry of Environment Regulation No. 19 of 2010. The application of hybrid technology proved to be technically effective, operationally safe, and contributed to mitigating OHS risks and supporting environmental sustainability in the upstream oil and gas industry. Further research is recommended to focus on a more detailed analysis of additional parameters such as heavy metals (Hg, Pb, Cd) and organic micro-pollutants to obtain a more comprehensive understanding of the system's effectiveness and potential environmental impacts.

Keywords : *Produced Water, Wastewater Treatment, Oil and Gas Industry*

ABSTRAK

Air terproduksi merupakan limbah utama dari kegiatan eksplorasi dan produksi minyak dan gas bumi yang mengandung senyawa organik dan anorganik berbahaya seperti fenol, amonia, sulfida, serta minyak dan lemak yang berpotensi mencemari lingkungan dan menimbulkan risiko terhadap keselamatan serta kesehatan kerja (K3), khususnya akibat paparan gas H₂S dan amonia. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas teknologi hibride (kombinasi pengolahan secara fisika, kimia dan biologi) dalam meningkatkan kinerja pengolahan air terproduksi di lokasi PT XYZ serta menilai kontribusinya terhadap pemenuhan baku mutu lingkungan dan mitigasi risiko K3. Desain penelitian meliputi uji laboratorium dan simulasi pilot plant melalui proses aerasi, koagulasi-flokulasi, aerasi biologis, dan filtrasi. Sebanyak 153 sampel inlet dan outlet dikumpulkan secara composite sampling selama April–Agustus 2025 dan dianalisis untuk parameter temperatur, pH, Minyak & Lemak, COD, Fenol, Sulfida, dan Amonia. Hasil menunjukkan teknologi hybrid mampu menurunkan Minyak & Lemak, COD, Fenol, Amonias dan Sulfida lebih dari 80%, sehingga effluen memenuhi Permen LHK No. 19 Tahun 2010. Sistem ini terbukti efektif, aman secara operasional, dan mendukung keberlanjutan lingkungan. Penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis logam berat dan mikro-pollutants untuk memperoleh gambaran pengolahan yang lebih komprehensif.

Kata Kunci : Air terproduksi, Teknologi Hybrid, Mitigasi Risiko, Lingkungan Industri, K3

Corresponding author : Teguh Santoso
Email : teguhsantosoamd@mail.ugm.ac.id

• Received 21 Oktober 2025 • Accepted 29 November 2025 • Published 30 November 2025

• p - ISSN : 2088-7612 • e - ISSN : 2548-8538 • DOI: <https://doi.org/10.25311/keskom.Vol11.Iss3.2383>

Copyright ©2017. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative

Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

which permits unrestricted non-commercial used, distribution and reproduction in any medium

PENDAHULUAN

Kegiatan eksplorasi dan produksi minyak dan gas bumi (migas) di seluruh dunia menghasilkan air terproduksi (*produced water*) sebagai limbah cair terbesar dari proses tersebut. Secara global, volume air terproduksi dapat mencapai hingga 80–90% dari total fluida yang diangkat, terutama pada lapangan minyak yang telah berproduksi lama atau mature field. Air ini memiliki karakteristik kompleks karena mengandung senyawa organik dan anorganik berbahaya seperti fenol, amonia, sulfida, hidrokarbon terlarut, logam berat, serta bahan kimia tambahan seperti *corrosion inhibitor*, *demulsifier*, dan *biocide*. Kandungan tersebut menjadikan air terproduksi sebagai salah satu limbah paling berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan tepat.[1].

Di Indonesia, khususnya pada industri hulu migas, permasalahan umum yang dihadapi adalah menurunnya efisiensi sistem pengolahan air terproduksi akibat umur operasi IPAL yang panjang dan meningkatnya beban limbah cair. Kondisi ini menyebabkan beberapa parameter pencemar seperti Minyak & Lemak, COD, fenol, amonia, dan sulfida sering kali melampaui ambang batas yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010. Selain menimbulkan dampak lingkungan berupa peningkatan toksisitas dan penurunan kualitas air [2]. Pengelolaan air terproduksi yang kurang optimal juga berpotensi menimbulkan risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), khususnya akibat paparan gas beracun H₂S dan amonia pada pekerja di fasilitas pengolahan

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan teknologi pengolahan hybrid yang mengombinasikan proses fisika, kimia, dan biologi dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi pengolahan [3]. Sistem ini menggabungkan keunggulan tiap proses, mulai dari pemisahan minyak dan padatan tersuspensi, oksidasi serta presipitasi senyawa toksik, hingga degradasi biologis senyawa organik terlarut [4]. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih terbatas pada uji laboratorium berskala kecil dan belum banyak diterapkan di fasilitas pengolahan migas yang telah beroperasi lama, sehingga diperlukan penelitian yang lebih aplikatif untuk kondisi lapangan actual [5]

Penelitian ini dilakukan di PT XYZ, Kabupaten Indramayu, Jawa Barat, dengan fokus pada perancangan dan pengujian sistem pengolahan air terproduksi berbasis teknologi hybrid yang mengintegrasikan proses koagulasi–flokulasi menggunakan PAC dan FeCl₃, biodegradasi aerobik, serta filtrasi [6]. Sistem ini dirancang untuk menghasilkan efluen yang memenuhi baku mutu sekaligus menekan risiko paparan bahan kimia berbahaya bagi pekerja [7]. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk merancang dan mengevaluasi efektivitas sistem pengolahan air terproduksi berbasis teknologi hybrid dalam menurunkan parameter pencemar utama serta menilai kontribusinya terhadap peningkatan kinerja lingkungan dan K3 di fasilitas produksi migas PT XYZ [8].

METODE

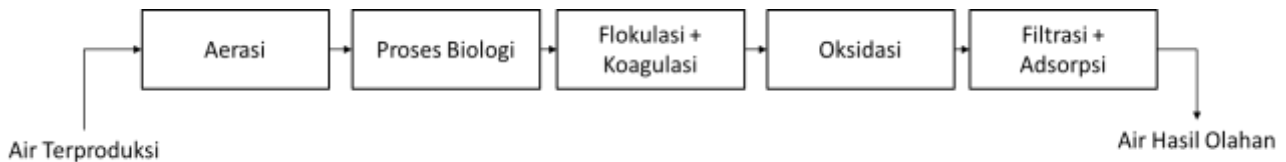
Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen deskriptif, yang bertujuan untuk menganalisis efektivitas sistem pengolahan air terproduksi berbasis teknologi hybrid dalam menurunkan parameter pencemar utama, yaitu Minyak & Lemak, COD, fenol, amonia, dan sulfida [9]. Metode ini dipilih karena memungkinkan dilakukan pengujian langsung terhadap proses pengolahan baik pada skala laboratorium maupun *pilot plant*, sehingga diperoleh data yang representatif dan dapat diaplikasikan pada skala industri migas. Penelitian dilakukan dalam dua tahap utama, yaitu uji laboratorium (*bench scale*) dan uji lapangan (*pilot scale*) [10].

Pada tahap laboratorium (*bench scale*), pengujian difokuskan untuk menentukan kombinasi dosis bahan kimia terbaik serta waktu tinggal hidrolis optimum pada tiap unit pengolahan. Bahan kimia yang digunakan meliputi *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dan *Ferric Chloride* (FeCl₃) sebagai koagulan, sedangkan bahan filtrasi terdiri atas pasir silika, karbon aktif, dan zeolit sebagai media penyerap dan penukar ion. Proses uji dilakukan dengan peralatan laboratorium utama berupa *jar test apparatus* merek Lovibond Flocculator 6-jar, pH meter Hanna Instruments, DO meter Lutron, serta spektrofotometer UV-Vis Shimadzu UV-1800 untuk analisis kuantitatif parameter kimia. Pengujian awal mengacu pada *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [11].



Gambar 1. Fasilitas Simulasi Skala Laboratorium (Bench Scale)

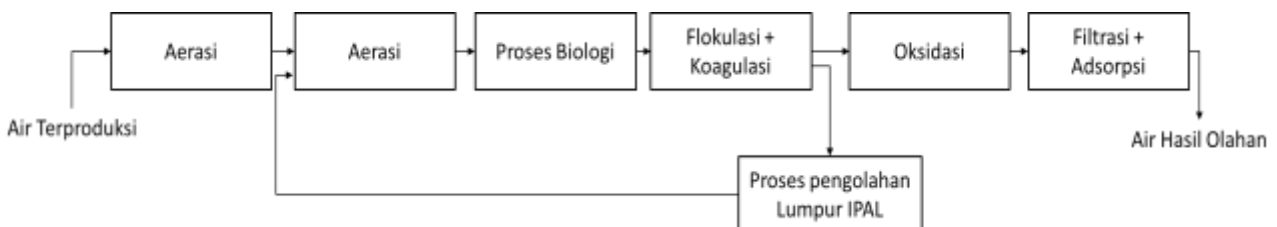


Gambar 2. Skema Uji Skala Laboratorium

Tahap berikutnya adalah uji *pilot plant (field simulation)* yang dilaksanakan di area Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) PT XYZ, Indramayu, menggunakan sistem hybrid berkapasitas 1 m³/jam. Pengujian ini bertujuan menilai performa sistem dalam kondisi operasi nyata dan memvalidasi hasil laboratorium. Sistem hybrid mengintegrasikan tiga proses utama—fisik, kimia, dan biologis—yang bekerja berurutan untuk memaksimalkan efisiensi penghilangan polutan [12]. Pada tahap fisik, air terproduksi dialirkan melalui *oil catcher* dan *gravity separator* untuk memisahkan minyak bebas serta padatan tersuspensi (TSS). Proses *air stripping* selanjutnya menghilangkan gas terlarut seperti H₂S dan NH₃, mengurangi bau serta potensi bahaya toksik [13]. Tahap biologis menggunakan reaktor lumpur aktif aerobik dengan pasokan udara dari blower *Roots Type*, menjaga kadar dissolved oxygen (DO) 3–5 mg/L agar bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*

berfungsi optimal dalam degradasi fenol dan ammonia [14].

Tahap kimia dilakukan melalui proses koagulasi–flokulasi menggunakan koagulan ganda PAC dan FeCl₃ untuk mengikat partikel koloid dan minyak terdispersi serta membentuk flok padat yang mudah diendapkan pada unit sedimentasi [15]. Air hasil sedimentasi kemudian melewati filtrasi dan *adsorpsi multistage* dengan tiga lapisan media pasir silika, karbon aktif, dan zeolit untuk menghilangkan padatan halus, menyerap senyawa organik, serta menurunkan kadar amonia. Tahap akhir berupa penampungan efluen pada tangki treated water, yang kemudian diuji kualitasnya sebelum dilepaskan ke lingkungan sesuai standar baku mutu [16]. Efisiensi penurunan parameter diatas 80% dinilai efektif dan ditetapkan sebagai batas keberhasilan sistem hybrid dalam memenuhi baku mutu [17].



Gambar 3. Skema Uji Skala Pilot System Hybrid

Lokasi dan Waktu Penelitian

Proses pengambilan sampel dilakukan di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) PT XYZ, Kabupaten Indramayu, Jawa Barat. Lokasi ini merupakan fasilitas utama pengolahan air terproduksi yang menerima limbah cair hasil pemisahan minyak dan air dari berbagai unit produksi migas. Sistem IPAL terdiri atas beberapa tahapan pengolahan, yaitu *Oil Catcher Pond* untuk pemisahan minyak bebas, *air stripping* untuk penghilangan gas H_2S dan NH_3 , reaktor biologi aerobik untuk degradasi organik, proses koagulasi-flokulasi dan sedimentasi untuk pengendapan, serta filtrasi dan adsorpsi multistage sebagai penyempurnaan sebelum dialirkan ke tangki *treated water* sesuai baku mutu lingkungan, pengambilan sampel dilakukan selama 5 bulan (April - Agustus 2025).

Populasi dan sampel

Populasi penelitian mencakup seluruh air terproduksi dari kegiatan operasi produksi minyak dan gas di PT XYZ dengan volume rata-rata 20.000–30.000 barrel per hari. Pada skala *pilot plant*, pengujian dilakukan dengan debit 1 m³/jam. Sampel representatif ditentukan menggunakan *purposive sampling*, yaitu pemilihan berdasarkan karakteristik parameter pencemar utama seperti COD, fenol, amonia, sulfida, serta minyak & lemak dari aliran yang beroperasi kontinu. Sampel diambil dari dua titik utama *inlet* (sebelum pengolahan *hybrid*) dan *outlet* (setelah pengolahan akhir) dengan tiga kali pengulangan (*triplicate*) untuk setiap periode pengambilan. Metode yang digunakan adalah grab sampling sesuai standar [1].

Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui observasi langsung, pengukuran laboratorium, dan dokumentasi proses pengolahan di IPAL PT XYZ, Indramayu. Observasi lapangan dilakukan untuk memantau kondisi aktual sistem pengolahan air terproduksi, termasuk kestabilan operasi pada setiap unit pengolahan (fisika, kimia, dan biologi), serta memastikan sistem berjalan sesuai parameter desain. Pengambilan sampel

dilakukan selama lima bulan (April - Agustus 2025) pada dua titik utama, yaitu *inlet* (sebelum pengolahan) dan *outlet* (setelah pengolahan), menggunakan metode *grab sampling* yang mengacu pada APHA (2017) [18]. Setiap titik diambil tiga kali pengulangan untuk memastikan keakuratan dan representativitas data [19].

Analisis laboratorium dilakukan di laboratorium terakreditasi, menggunakan spektrofotometer UV-Vis Shimadzu UV-1800 untuk mengukur *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan metode APHA 5220C, fenol (APHA 5530D), amonia (APHA 4500-NH₃ B,C), dan sulfida (APHA 4500-S²⁻ D) [20]. Selain itu, dilakukan pula dokumentasi teknis yang meliputi pencatatan kondisi operasi IPAL, debit air limbah, penggunaan bahan kimia, serta kegiatan pemeliharaan sistem pengolahan [21]. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh data kuantitatif dan kualitatif yang komprehensif, sehingga hasil penelitian dapat menggambarkan kinerja aktual sistem hybrid treatment secara akurat dan terukur sesuai kondisi lapangan [22].

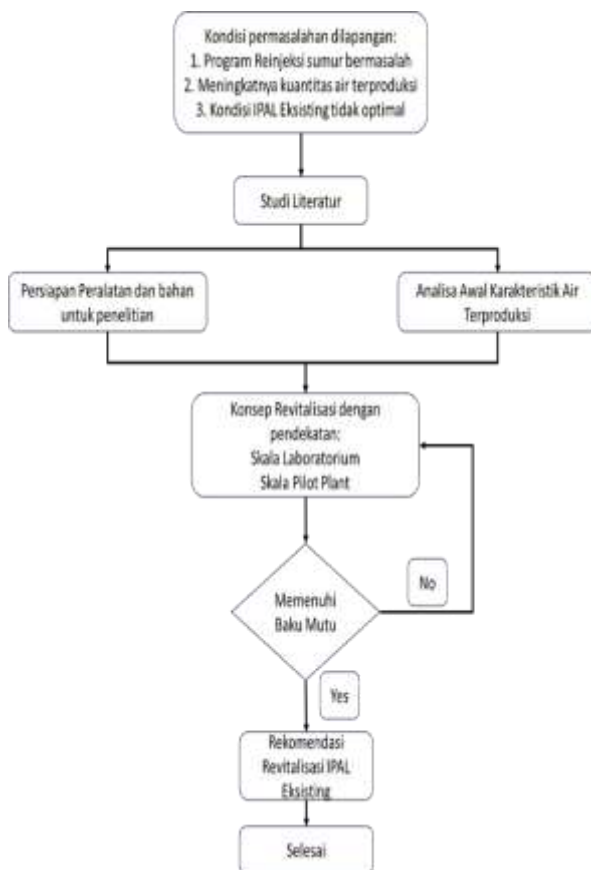
Variabel Penelitian

Kerangka konsep penelitian ini disusun berdasarkan hasil telaah pustaka, kerangka teori, serta analisis terhadap tantangan aktual yang dihadapi oleh PT XYZ dalam mengelola air terproduksi. Konsep ini menggambarkan hubungan antar variabel utama yang menjadi fokus penelitian serta menjelaskan arah intervensi teknis yang dilakukan dalam upaya revitalisasi sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Variabel masukan (*input*) dalam penelitian ini meliputi karakteristik awal air terproduksi yang terdiri atas parameter COD, minyak dan lemak, sulfida, amonia, fenol, suhu, serta pH, disertai dengan kapasitas dan kinerja IPAL eksisting serta ketentuan regulasi lingkungan yang mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010.

Variabel proses mencakup penerapan teknologi pengolahan fisik seperti *gravity separator*, *Dissolved Air Flotation* (DAF), dan filtrasi; teknologi pengolahan kimia melalui proses koagulasi-flokulasi; serta teknologi pengolahan biologis untuk degradasi lanjutan senyawa organik dan anorganik. Sementara itu, variabel keluaran (*output*) meliputi hasil penurunan kadar pencemar utama seperti COD, minyak dan lemak, sulfida, amonia, fenol, serta stabilitas suhu dan pH pada

efluen akhir yang telah memenuhi baku mutu air limbah sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010. Dengan demikian, kerangka konsep ini memberikan arah analisis yang jelas mengenai efektivitas sistem pengolahan hybrid dalam menurunkan beban pencemar sekaligus mendukung pengelolaan limbah cair yang berkelanjutan di industri hulu migas.

Kerangka konsep ini mendasari hipotesis bahwa integrasi teknologi pengolahan fisik, kimia, dan biologis berbasis pendekatan hybrid dapat meningkatkan efektivitas sistem IPAL dalam mengolah air terproduksi hingga memenuhi standar baku mutu [23]. Dengan pendekatan ini, penelitian akan memfokuskan pada evaluasi performa unit eksisting, perancangan sistem terpadu, serta pengujian efisiensi sistem pada parameter lingkungan yang relevan [24].



Gambar 4. Alur Proses Penelitian

Ethical Clearance

Penelitian ini telah mendapatkan persetujuan etik (*ethical clearance*) dari Komite

Etik Penelitian Lingkungan dan Keselamatan Kerja serta izin resmi pengambilan data dari manajemen PT XYZ, Indramayu Field. Seluruh kegiatan penelitian dilaksanakan sesuai prinsip kehati-hatian, keselamatan kerja, dan perlindungan lingkungan. Selama kegiatan *onsite sampling* di fasilitas Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) PT XYZ, seluruh aktivitas dilakukan secara aman, terkoordinasi dengan pihak perusahaan, dan tidak mengganggu proses produksi. Peneliti menerapkan prosedur HSSE perusahaan secara ketat serta menggunakan alat pelindung diri (APD) sesuai standar industri.

Seluruh data yang diperoleh dijaga kerahasiaannya, digunakan hanya untuk kepentingan ilmiah, dan tidak mengandung informasi rahasia perusahaan. Dengan demikian, penelitian ini telah memenuhi kaidah etika penelitian, keselamatan kerja, serta tanggung jawab sosial terhadap lingkungan dan perusahaan.

HASIL

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem pengolahan air terproduksi berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ, Indramayu, meningkatkan efisiensi penurunan pencemar dibandingkan sistem konvensional. Proses pengolahan meliputi oil catcher untuk pemisahan minyak bebas, *air stripping* untuk penghilangan gas H_2S dan NH_3 , reaktor biologis aerobik untuk degradasi organik dan amonia, serta proses koagulasi-flokulasi menggunakan PAC dan $FeCl_3$ yang dilanjutkan dengan sedimentasi. Tahap akhir berupa filtrasi dan *adsorpsi multistage* dengan media pasir silika, karbon aktif, dan zeolit menghasilkan efluennya yang memenuhi baku mutu lingkungan sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010.

Secara umum, konsentrasi awal (*inlet*) air terproduksi sebelum pengolahan menunjukkan nilai Minyak & Lemak 24,00–30,20 mg/L, COD 740–1400 mg/L, fenol 3,1–9,2 mg/L, amonia (NH_3-N) 12,0–33,0 mg/L, dan sulfida (H_2S) 0,02–0,12 mg/L. Setelah melalui seluruh tahapan pengolahan *hybrid*, konsentrasi efluennya (*outlet*) menurun signifikan menjadi Minyak & Lemak 3,50–6,00 mg/L, COD 80–175 mg/L, fenol 0,7–1,8 mg/L, amonia 3,6–4,3 mg/L, dan sulfida 0,01–0,03 mg/L. Hasil ini menunjukkan efisiensi penurunan lebih dari 80% untuk semua parameter utama, yang dikategorikan efektif karena telah melampaui batas keberhasilan minimal (*cut-off*) efisiensi 50% [25].

Seluruh hasil olahan telah memenuhi baku mutu air limbah migas sesuai Permen LHK No. 19 Tahun

2010, dengan batas maksimal COD 300 mg/L, fenol 2 mg/L, amonia 10 mg/L, dan sulfida 1 mg/L.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Inlet dan Outlet IPAL Hybrid

Parameter	Inlet (Rentang & Rata-rata)	Outlet (Rentang & Rata-rata)	% Reduksi (±)	Baku Mutu sesuai Permen LHK No. 19 Tahun 2010
Temperatur (°C)	26,2 – 36,7 (31,90) °C	25,3 – 34,4 (30,83)	~3%	45°C
pH	6,3 – 7,6 (7,13)	Konsisten 7,0	–	6-9
Oil & Grease (ppm)	24,00 – 30,20 (27,16) mg/L	3,50 – 6,00 (4,36) mg/L	>80% (Efektif)	25 mg/L
Ammonia (NH ₃ -N, ppm)	12,0 – 33,0 (21,91) mg/L	3,6 – 4,3 (3,96) mg/L	>80% (Efektif)	10 mg/L
COD (ppm)	740 – 1400 (1035) mg/L	80 – 175 (114) mg/L	>80% (Efektif)	300 mg/L
Sulfida (H ₂ S, ppm)	0,02 – 0,12 (0,07) mg/L	0,01 – 0,03 (0,01) mg/L	>70% (Efektif)	1 mg/L
Fenol (ppm)	3,1 – 9,2 (5,88) mg/L	0,7 – 1,8 (1,15) mg/L	>80% (Efektif)	2 mg/L

Sumber: Data Primer, 2025

PEMBAHASAN

Penurunan Chemical Oxygen Demand COD

Chemical Oxygen Demand (COD) merupakan parameter utama yang menunjukkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dan anorganik dalam air limbah. Nilai COD yang tinggi pada air terproduksi mencerminkan tingginya kandungan hidrokarbon terlarut, senyawa aromatik, dan bahan kimia tambahan dari proses produksi yang sulit terdegradasi secara alami [25]. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa sistem pengolahan berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ mampu menurunkan beban COD secara signifikan, yang mengindikasikan kemampuan sistem dalam memecah senyawa organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan stabil. Penurunan COD tersebut diperoleh melalui kombinasi tahapan fisika, kimia, biologi, dan adsorpsi yang bekerja secara sinergis. Tahap fisika, seperti pemisahan minyak bebas dan padatan tersuspensi melalui *Oil Catcher Pond* dan unit sedimentasi, berperan dalam mengurangi beban organik awal. Mekanisme ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa pemisahan awal secara gravitasi dapat menurunkan beban COD hingga 40% sebelum tahap lanjutan dimulai [5].

Tahap kimia menggunakan koagulan *Ferric Chloride* (FeCl₃) dan *Poly Aluminium*

Chloride (PAC) efektif dalam menggumpalkan partikel koloid dan emulsi minyak-air menjadi flok yang mudah diendapkan. Proses ini terbukti menurunkan COD secara signifikan, sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa kombinasi koagulan ganda dapat meningkatkan efisiensi penghilangan COD hingga lebih dari 70% pada air terproduksi [13]. Selanjutnya, tahap biologis memainkan peran penting dalam degradasi lanjutan senyawa organik terlarut. Mikroorganisme seperti *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, dan *Alcaligenes sp.* berkontribusi dalam oksidasi hidrokarbon dan senyawa aromatik menjadi CO₂ dan H₂O [26]. Temuan ini konsisten dengan studi sebelumnya, yang menyatakan bahwa proses biodegradasi aerobik mampu menurunkan COD lebih dari 80% pada kondisi pH netral (6,5–7,5) dan suhu operasi 30–35°C [11], [27].

Proses akhir berupa filtrasi dan adsorpsi *multistage* menggunakan media pasir silika, karbon aktif, dan zeolit berfungsi menyerap sisa senyawa organik refraktori. Tahapan ini menghasilkan efisiensi tambahan 10–15% dalam penghilangan COD, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian sebelumnya, bahwa kombinasi adsorpsi dan filtrasi *multistage* dapat meningkatkan efisiensi total hingga 85–90% [19]. Dengan demikian, efisiensi penurunan COD di atas 80% yang dicapai dalam penelitian ini dapat dikategorikan efektif, sesuai dengan batas

keberhasilan operasional sistem *hybrid* yang direkomendasikan oleh penelitian sebelumnya [30].

Dari perspektif lingkungan, penurunan beban COD berkontribusi terhadap peningkatan kualitas efluen dan mencegah penurunan kadar oksigen terlarut (DO) di badan air penerima, sehingga mengurangi potensi eutrofikasi dan kematian biota akuatik [20]. Sementara itu, dari aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), berkurangnya senyawa organik volatil (VOC) seperti benzena dan toluena juga menurunkan risiko paparan gas berbahaya yang bersifat karsinogenik dan dapat menyebabkan gangguan sistem saraf pusat [6]. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem hybrid tidak hanya efektif secara teknis dalam menurunkan beban COD, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap pengendalian risiko K3 dan keberlanjutan lingkungan di industri hulu migas.

Penurunan Fenol

Fenol merupakan senyawa aromatik beracun yang umum ditemukan dalam air terproduksi akibat degradasi senyawa organik dari minyak mentah dan bahan kimia tambahan selama proses produksi [20]. Senyawa ini bersifat toksik bagi organisme akuatik, bersifat karsinogenik, dan dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi pekerja apabila terpapar dalam jangka panjang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ mampu menurunkan kadar fenol dengan efisiensi lebih dari 80%, yang dikategorikan efektif secara teknis sebagaimana juga dilaporkan oleh penelitian sebelumnya, bahwa efisiensi di atas 80% merupakan batas keberhasilan sistem biologis-adsorptif dalam mengeliminasi senyawa fenolik dari air terproduksi [11].

Penurunan kadar fenol dalam penelitian ini tidak melibatkan proses oksidasi kimia, melainkan diperoleh melalui kombinasi mekanisme fisika, kimia, biologi, dan filtrasi adsorptif, yang bekerja secara sinergis. Tahap fisika, melalui unit *Oil Catcher Pond* dan sedimentasi, berfungsi mengurangi kandungan minyak bebas dan padatan tersuspensi yang dapat menjadi media pengikat senyawa fenolik. Hasil ini konsisten dengan temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pemisahan fisik awal dapat menurunkan kandungan fenol terlarut hingga 15–20% melalui

penghilangan fase minyak yang berikatan dengan senyawa aromatik [23].

Tahap kimia, menggunakan kombinasi koagulan FeCl_3 dan PAC, berperan dalam pengendapan kompleks fenolik dan partikel koloid melalui pembentukan flok besar yang mudah diendapkan. Mekanisme ini sejalan dengan studi yang dilakukan sebelumnya yang menjelaskan bahwa proses koagulasi-flokulasi dapat menurunkan kadar fenol hingga 40% melalui reaksi adsorpsi dan netralisasi muatan [13]. Tahap biologis berperan penting dalam biodegradasi senyawa fenol aromatik oleh mikroorganisme seperti *Pseudomonas sp.*, *Acinetobacter sp.*, dan *Thauera aromatica*. Mikroorganisme ini memanfaatkan fenol sebagai sumber karbon melalui jalur *ortho-cleavage* dan *meta-cleavage*, menghasilkan senyawa antara seperti *catechol*, yang kemudian diubah menjadi *maleat* dan asam *fumarat*, serta akhirnya dimineralisasi menjadi CO_2 dan H_2O [30]. Mekanisme ini sesuai dengan temuan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa sistem biologis aerobik dengan dominasi *Pseudomonas* mampu menurunkan kadar fenol hingga di bawah 2 mg/L pada pH netral dan suhu 30–35°C [17, 36].

Tahap akhir berupa filtrasi karbon aktif dan zeolit berfungsi sebagai proses pemoles (*polishing*) untuk menyerap sisa senyawa fenolik dan produk antara biodegradasi yang masih tersisa. Proses adsorpsi ini bekerja melalui mekanisme van der Waals dan interaksi antara cincin aromatik fenol dengan permukaan karbon aktif berpori tinggi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa karbon aktif mampu menurunkan kadar fenol hingga 90% pada sistem hybrid biologis-adsorptif [8].

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini konsisten dengan berbagai literatur bahwa pendekatan multi-tahap hybrid (fisika-kimia-biologi-adsorptif) merupakan strategi efektif dalam penghilangan senyawa fenolik kompleks dari air terproduksi [1, 10, 11, 36]. Selain meningkatkan kualitas efluen hingga memenuhi baku mutu lingkungan, keberhasilan sistem ini juga berkontribusi terhadap pengendalian risiko K3, terutama dalam mencegah paparan senyawa aromatik volatil yang bersifat toksik dan karsinogenik bagi pekerja di unit pengolahan air terproduksi.

Penurunan Amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$)

Amonia merupakan salah satu parameter utama yang perlu dikendalikan dalam air terproduksi karena bersifat toksik bagi organisme akuatik dan berpotensi membentuk gas beracun yang dapat menurunkan kualitas udara di area kerja [21]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ mampu menurunkan kadar amonia dengan efisiensi lebih dari 80%, yang dikategorikan efektif secara operasional sebagaimana juga dilaporkan oleh penelitian sebelumnya bahwa efisiensi >80% merupakan kriteria kinerja optimal dalam sistem pengolahan air terproduksi *multistage* [31,37].

Penurunan kadar amonia dicapai melalui kombinasi proses fisika, kimia, dan biologi yang saling mendukung. Tahap awal berupa air stripping membantu menghilangkan gas amonia volatil dari fase cair, terutama pada pH basa di atas 8, di mana amonia berada dalam bentuk NH_3 bebas yang mudah terlepas ke udara. Mekanisme ini sejalan dengan hasil studi sebelumnya yang menyebutkan bahwa proses stripping dapat mengurangi beban amonia hingga 40% sebelum memasuki unit biologis [1]. Pada tahap koagulasi-flokulasi, sebagian senyawa nitrogen terlarut ikut terendapkan bersama flok padatan tersuspensi, sehingga menurunkan beban pencemar menuju tahap biologis [32]. Penggunaan FeCl_3 sebagai koagulan juga berperan dalam mengadsorpsi ion amonium (NH_4^+) melalui mekanisme pertukaran ion, sebagaimana dikemukakan oleh penelitian sebelumnya bahwa koagulan berbasis besi mampu menurunkan konsentrasi amonia hingga 25–30% melalui reaksi kompleksasi [22].

Tahap biologis menjadi kunci utama penurunan amonia melalui proses nitrifikasi aerobik. Dalam mekanisme ini, bakteri *Nitrosomonas* mengoksidasi amonia (NH_3) menjadi nitrit (NO_2^-), kemudian *Nitrobacter* mengubah nitrit menjadi nitrat (NO_3^-). Proses ini berjalan optimal pada kondisi oksigen terlarut (DO) > 3 mg/L, pH 6,5–7,5, dan suhu 30–35°C dengan waktu tinggal hidrolik minimal 3 jam [1,5,21]. Temuan ini sejalan dengan studi terdahulu yang menyatakan bahwa sistem hybrid dengan reaktor aerobik memiliki efisiensi tinggi dalam mengubah amonia menjadi bentuk nitrogen yang lebih stabil dan tidak beracun [11,19].

Tahap akhir berupa filtrasi dan adsorpsi *multistage*, terutama melalui media karbon aktif, berperan dalam menghilangkan sisa senyawa

nitrogen organik serta mengurangi bau yang disebabkan oleh gas amonia volatil. Hal ini sesuai dengan laporan penelitian sebelumnya bahwa karbon aktif dengan luas permukaan tinggi efektif dalam menyerap amonia melalui mekanisme adsorpsi [8]. Secara keseluruhan, kombinasi mekanisme *air stripping* – koagulasi – biologis – filtrasi dalam sistem hybrid terbukti efektif menurunkan amonia secara signifikan sekaligus meningkatkan kualitas udara di sekitar area IPAL. Hasil ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa pendekatan pengolahan hybrid tidak hanya meningkatkan efisiensi penghilangan nitrogen, tetapi juga memperkuat aspek K3 dan keberlanjutan lingkungan di fasilitas pengolahan air terproduksi [30].

Penurunan Sulfida (H_2S)

Sulfida merupakan salah satu parameter kritis dalam air terproduksi yang perlu dikendalikan secara ketat karena bersifat korosif, toksik, dan mudah menguap, sehingga dapat menimbulkan risiko serius terhadap keselamatan dan kesehatan kerja (K3) di fasilitas pengolahan [3, 6]. Kandungan H_2S yang tinggi juga berpotensi menurunkan kualitas lingkungan karena gas ini mudah larut dan menimbulkan bau menyengat, serta dapat menyebabkan korosi pada peralatan logam [5]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengolahan berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ mampu menurunkan kadar sulfida dengan efisiensi di atas 70%, yang dikategorikan efektif secara operasional karena telah memenuhi kriteria penurunan di atas 70% sebagaimana dilaporkan oleh penelitian sebelumnya bahwa efisiensi tersebut umumnya menjadi batas minimum keberhasilan pengolahan sulfida dalam sistem multi-tahap [13,17].

Penurunan kadar sulfida pada sistem ini dicapai melalui kombinasi proses fisika, kimia, dan biologis yang bekerja secara berurutan. Tahap fisika, seperti pemisahan minyak bebas, *air stripping*, dan sedimentasi, berperan dalam menghilangkan minyak dan padatan tersuspensi yang dapat menjadi prekursor pembentukan gas H_2S . Mekanisme serupa juga dilaporkan penelitian sebelumnya di mana proses aerasi dan pemisahan awal mampu menurunkan kandungan sulfida terlarut melalui desorpsi alami gas ke udara [9]. Pada tahap kimia, penggunaan koagulan *Ferric Chloride* (FeCl_3) dan flokulan polimer berfungsi mengendapkan senyawa sulfur terlarut, termasuk

ion sulfida (S^{2-}), dengan membentuk flok stabil yang mudah dihilangkan melalui sedimentasi [12]. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa presipitasi logam dengan koagulan berbasis Fe^{3+} dapat menurunkan sulfida hingga 75% melalui pembentukan senyawa Fe_2S_3 yang tidak larut [22].

Tahap biologis memainkan peran penting dalam proses oksidasi lanjutan. Bakteri *Thiobacillus sp.* dan *Beggiatoa sp.* berperan sebagai mikroorganisme kemosintetik yang mengoksidasi sulfida menjadi sulfat (SO_4^{2-}) dalam kondisi aerobik, sehingga mengubah senyawa toksik menjadi bentuk yang stabil dan tidak berbau [11,19]. Hasil ini konsisten dengan temuan dalam penelitian sebelumnya, menjelaskan bahwa proses biokonversi sulfida-sulfat menjadi langkah efektif dalam mencegah akumulasi gas H_2S di unit pengolahan minyak dan gas [6]. Selain meningkatkan kualitas efluen, proses biologis ini juga berkontribusi terhadap pengendalian emisi gas H_2S di udara kerja. Hasil pengukuran di lapangan menunjukkan bahwa gas H_2S tidak terdeteksi pada area IPAL setelah sistem hybrid beroperasi secara stabil. Kondisi ini menegaskan bahwa pengolahan kombinasi fisika-kimia-biologi tidak hanya efektif dalam menurunkan kandungan sulfida di air terproduksi, tetapi juga berperan penting dalam mitigasi risiko K3, khususnya paparan gas beracun bagi pekerja dan potensi korosi peralatan.

Secara keseluruhan, penelitian ini mendukung temuan penelitian sebelumnya bahwa pendekatan *hybrid treatment* mampu memberikan kinerja stabil dalam penanganan parameter sulfur dengan efisiensi tinggi dan risiko operasional yang minimal [30, 36]. Dengan demikian, sistem hybrid di IPAL PT XYZ dapat dikategorikan efektif dan berkelanjutan dalam mengendalikan kadar sulfida serta mendukung implementasi keselamatan proses di sektor hulu migas.

Penurunan Minyak dan Lemak (*Oil & Grease*)

Minyak dan lemak merupakan salah satu parameter utama dalam air terproduksi yang harus dikendalikan karena dapat menyebabkan pembentukan lapisan film pada permukaan air, menurunkan difusi oksigen, serta meningkatkan risiko penyumbatan pada sistem perpipaan dan media filtrasi [2, 5]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem pengolahan berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ efektif menurunkan kadar minyak dan lemak dengan efisiensi di atas 80%, yang secara operasional

dikategorikan efektif, sesuai batas keberhasilan minimum pengolahan limbah migas sebagaimana dilaporkan oleh Igunnu dan Chen (2014) [2].

Penurunan kadar minyak dan lemak secara dominan dicapai melalui tahapan fisika dan kimia yang saling melengkapi. Tahap fisika, khususnya melalui unit *oil catcher*, *air stripping*, dan gravity separator, memanfaatkan perbedaan densitas antara air dan minyak untuk memisahkan fraksi hidrokarbon bebas. Mekanisme ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pemisahan gravitasi dapat menghilangkan 60–70% minyak bebas sebelum tahap pengolahan lanjutan [14]. Selanjutnya, tahap koagulasi-flokulasi memperkuat proses pemisahan minyak mikroterdispersi ($<10\ \mu m$) dengan membentuk flok besar yang mengikat partikel minyak menggunakan koagulan $FeCl_3$ dan flokulan polimer. Efisiensi yang diperoleh dalam penelitian ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya, yang melaporkan bahwa kombinasi Fe^{3+} dan flokulan anionik mampu menurunkan kadar minyak dan lemak hingga lebih dari 85% melalui mekanisme charge neutralization dan bridging [5, 13].

Tahap akhir berupa *filtrasi multistage* yang terdiri dari pasir silika, karbon aktif, dan zeolit berfungsi sebagai unit pemoles (*polishing unit*) untuk mengadsorpsi minyak residu dan senyawa organik berminyak yang tersisa. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya bahwa kombinasi media berpori dengan karakteristik hidrofilik-hidrofobik berbeda dapat meningkatkan efisiensi penyerapan minyak lebih dari 90% [4]. Dengan demikian, integrasi antara proses fisika, kimia, dan adsorptif terbukti memberikan kinerja penghilangan yang tinggi terhadap fraksi minyak bebas maupun terdispersi.

Selain meningkatkan kualitas efluen, sistem hybrid juga memberikan manfaat teknis terhadap stabilitas operasi IPAL. Dengan berkurangnya kandungan minyak dalam air, risiko pembentukan kerak (*scaling*) dan lapisan biofilm berminyak pada media filtrasi dapat diminimalkan. Kondisi ini memperpanjang umur operasi sistem, meningkatkan efisiensi aerasi, serta mengurangi kebutuhan pencucian media secara intensif, sebagaimana juga diamati oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa desain sistem hibrid multifase mampu menjaga performa jangka panjang dengan konsumsi energi yang lebih rendah [28]. Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat bukti bahwa penerapan sistem hybrid di IPAL PT

XYZ efektif dalam mengurangi kandungan minyak dan lemak sekaligus meningkatkan efisiensi operasi serta keberlanjutan lingkungan pada pengolahan air terproduksi di sektor hulu migas.

Dampak terhadap Lingkungan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efluen hasil pengolahan menggunakan sistem teknologi hybrid di IPAL PT XYZ telah memenuhi baku mutu air limbah migas sesuai peraturan yang berlaku, dengan konsentrasi COD, fenol, amonia, serta minyak dan lemak berada jauh di bawah ambang batas yang dipersyaratkan [29]. Kualitas efluen yang dihasilkan memiliki tingkat toksisitas rendah, sehingga aman untuk dialirkan ke sistem pembuangan maupun dimanfaatkan kembali melalui skema *re-injection* dan *reuse process water* dalam kegiatan operasi migas. Kondisi ini sejalan dengan hasil studi terdahulu, yang menyatakan bahwa air terproduksi yang telah diolah dengan efisiensi penurunan parameter organik dan anorganik di atas 80% dapat digunakan kembali secara aman tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan [26].

Penurunan signifikan kadar minyak dan lemak mencegah terbentuknya lapisan hidrokarbon pada permukaan air yang dapat menghambat difusi oksigen dan menyebabkan kematian biota akuatik. Hasil ini konsisten dengan temuan penelitian sebelumnya, yang menunjukkan bahwa penurunan fraksi minyak bebas hingga di bawah 10 mg/L secara signifikan memperbaiki kondisi oksigen terlarut (DO) di badan air penerima [30]. Selain itu, pengendalian kadar fenol dan amonia di bawah ambang batas baku mutu berperan penting dalam menjaga stabilitas ekosistem mikroba di perairan dan tanah. Studi terdahulu melaporkan bahwa fenol dan amonia pada konsentrasi tinggi bersifat penghambat bagi pertumbuhan mikroorganisme tanah dan biota akuatik, sehingga keberhasilannya dikendalikan melalui sistem hybrid berkontribusi terhadap keseimbangan ekosistem lokal [31].

Dari aspek pengelolaan limbah padat, sistem hybrid juga menunjukkan efisiensi tinggi dengan menghasilkan volume lumpur lebih rendah, yaitu sekitar 0,8–1,2% dari total debit air limbah, dibandingkan dengan sistem konvensional yang umumnya mencapai 3–4%. Hasil ini sejalan dengan laporan penelitian sebelumnya yang menemukan bahwa proses hybrid dengan unit biologis aktif dan filtrasi *multistage* mampu menekan pembentukan lumpur lebih dari 60%

dibandingkan proses fisika-kimia tunggal [26]. Penurunan volume lumpur berdampak langsung pada berkurangnya biaya pengangkutan dan pengelolaan limbah B3 serta menurunkan potensi kontaminasi tanah akibat pembuangan residu kimia [32].

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat temuan penelitian sebelumnya bahwa penerapan sistem pengolahan hybrid tidak hanya meningkatkan kualitas efluen hingga memenuhi standar lingkungan, tetapi juga mendukung keberlanjutan operasional dan konservasi sumber daya air melalui praktik *reuse* dan pengurangan limbah padat secara signifikan [33]. Dengan demikian, sistem hybrid di IPAL PT XYZ terbukti efektif dalam menekan beban pencemar dan memberikan manfaat nyata bagi perlindungan lingkungan dan ekosistem perairan di sekitar area operasi migas [34].

Dampak Terhadap Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Penerapan sistem pengolahan air terproduksi berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ, memberikan dampak positif yang signifikan terhadap peningkatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di lingkungan operasional. Sebelum dilakukan optimalisasi, sistem pengolahan masih menggunakan konfigurasi semi terbuka, khususnya pada unit aerasi dan kolam sedimentasi, yang berpotensi melepaskan gas berbahaya seperti hidrogen sulfida (H_2S) dan amonia (NH_3) ke udara sekitar. Kedua gas ini diketahui bersifat toksik, korosif, dan mudah menguap, serta dapat menyebabkan iritasi pernapasan, gangguan sistem saraf, dan risiko fatal jika terpapar dalam konsentrasi tinggi [35]. Kondisi tersebut umum ditemukan di fasilitas pengolahan migas yang belum sepenuhnya menerapkan sistem tertutup dan ventilasi terkontrol, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian sebelumnya bahwa paparan H_2S di atas 10 ppm telah terbukti menurunkan kapasitas respirasi operator dan meningkatkan risiko neurologis [36].

Setelah penerapan sistem hybrid, kondisi udara kerja di area IPAL menunjukkan peningkatan kualitas yang signifikan. Desain sistem unit *air stripping* secara efektif menurunkan pelepasan gas H_2S dan NH_3 ke atmosfer, sejalan dengan hasil studi penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa integrasi proses biologi dan aerasi terkontrol mampu menekan emisi H_2S lebih dari 90% dibandingkan sistem konvensional [37].

Pemantauan lapangan menunjukkan bahwa konsentrasi gas H_2S di area IPAL tidak terdeteksi, sementara kadar NH_3 berada di bawah nilai ambang batas paparan kerja (*Threshold Limit Value-TLV*) 25 ppm sebagaimana direkomendasikan secara standar [38].

Peningkatan kualitas udara kerja ini tidak hanya mencerminkan keberhasilan teknis sistem hybrid, tetapi juga mencerminkan penerapan prinsip hierarki pengendalian risiko dalam sistem manajemen K3. Dengan menghilangkan sumber emisi (*elimination*) dan melakukan rekayasa sistem (*engineering control*), risiko paparan langsung bagi operator dapat ditekan secara efektif [39]. Selain itu, penerapan sistem pemantauan gas otomatis, penggunaan alat pelindung diri (APD), dan pelatihan rutin bagi operator semakin memperkuat budaya keselamatan kerja di fasilitas pengolahan. Selama periode enam bulan pengamatan, tidak tercatat adanya insiden atau kecelakaan kerja yang berkaitan dengan paparan gas berbahaya maupun gangguan operasional. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan sistem hybrid tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis pengolahan air terproduksi, tetapi juga mendukung terwujudnya lingkungan kerja yang aman, sehat, dan berkelanjutan.

Evaluasi Keseluruhan Sistem IPAL Hybrid

Secara keseluruhan, sistem pengolahan air terproduksi berbasis teknologi hybrid di IPAL PT XYZ menunjukkan efisiensi total di atas 80% untuk seluruh parameter utama COD, fenol, amonia, sulfida, serta minyak dan lemak dan menghasilkan efluen yang sepenuhnya memenuhi baku mutu air limbah migas sebagaimana tercantum peraturan yang berlaku [29]. Kinerja tinggi ini menegaskan bahwa sistem hybrid mampu mengintegrasikan keunggulan proses fisika, kimia, dan biologi secara sinergis, sekaligus menjamin kestabilan operasi terhadap fluktuasi beban pencemar dan efisiensi energi pengolahan [40].

Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuan adaptif dan stabilitas proses. Tahap koagulasi-flokulasi dengan kombinasi PAC dan $FeCl_3$ terbukti efektif dalam menghilangkan minyak terdispersi, padatan tersuspensi, serta bahan organik kompleks sebelum memasuki reaktor biologis, sebagaimana juga dilaporkan dalam penelitian sebelumnya, bahwa penggunaan koagulan ganda meningkatkan efisiensi penurunan senyawa aromatik toksik hingga diatas 90% [41]. Pada tahap reaktor biologis, degradasi lanjutan

terhadap senyawa organik dan amonia berlangsung stabil berkat aktivitas bakteri heterotrof (*Pseudomonas*, *Acinetobacter*) dan bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*). Keberadaan media biofilm berluas permukaan tinggi mempercepat kolonisasi mikroba dan menjaga efisiensi biodegradasi meskipun terjadi fluktuasi beban limbah [36, 37]. Desain sistem ini juga meningkatkan pengendalian gas H_2S , di mana hasil pengukuran udara kerja menunjukkan konsentrasi jauh di bawah batas aman yaitu 10 ppm [38].

Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penerapan sistem hybrid tidak hanya efektif secara teknis dan operasional, tetapi juga berkontribusi nyata terhadap peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) melalui penurunan risiko paparan gas beracun serta penciptaan lingkungan kerja yang lebih aman dan nyaman. Di sisi lain, dari perspektif lingkungan, sistem ini mendukung prinsip keberlanjutan (*sustainability*) melalui pengurangan beban pencemar, minimisasi lumpur hasil olahan, dan peluang pemanfaatan kembali air hasil pengolahan (*reuse / re-injection*) di fasilitas produksi migas.



Gambar 5. Kondisi Air Proses Olahan IPAL System Hybrid

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, analisis laboratorium, dan pengujian lapangan selama lima bulan (April–Agustus 2025), dapat disimpulkan bahwa tujuan penelitian untuk mengevaluasi efektivitas teknologi hybrid dalam pengolahan air terproduksi di IPAL PT XYZ telah tercapai. Sistem pengolahan yang mengintegrasikan proses fisika, kimia, dan biologi terbukti mampu menurunkan beban pencemar utama yaitu COD, fenol, amonia, sulfida, serta minyak dan lemak dengan efisiensi di atas 80%, sehingga seluruh efluen memenuhi baku mutu. Selain peningkatan kualitas efluen, sistem ini juga berkontribusi terhadap pengendalian risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) melalui

penurunan paparan gas toksik (H_2S dan NH_3) hingga di bawah ambang batas aman. Dengan demikian, penerapan teknologi hybrid tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga mendukung keberlanjutan operasional industri migas melalui peningkatan efisiensi, pengurangan potensi pencemaran, serta terciptanya lingkungan kerja yang lebih aman dan berorientasi *zero accident*.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada manajemen PT XYZ, Indramayu, atas dukungan dan izin penelitian yang diberikan selama proses pengambilan data serta pelaksanaan kegiatan di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh tim HSSE dan Operation PT XYZ yang telah memberikan bantuan teknis, fasilitas, serta pendampingan selama kegiatan penelitian dan pengujian lapangan berlangsung. Penulis berterima kasih kepada laboratorium lingkungan PT XYZ yang telah membantu dalam proses analisis parameter kualitas air dengan standar yang berlaku, serta kepada rekan-rekan profesional dan akademisi yang turut memberikan masukan dan saran dalam penyusunan laporan penelitian ini. Dukungan, kerja sama, dan kontribusi dari berbagai pihak tersebut sangat berarti dalam keberhasilan pelaksanaan penelitian dan penyelesaian publikasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Abu-Orf, G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. (Author, F. (Author, and B. Pfrang, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 2023.
- [2] H. D. Dawoud, H. Saleem, N. A. Alnuaimi, and S. J. Zaidi, "Characterization and treatment technologies applied for produced water in Qatar," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 24, 2021, doi: 10.3390/w13243573.
- [3] M. Vakili, P. Koutnik, and J. Kohout, "Addressing Hydrogen Sulfide Corrosion in Oil and Gas Industries: A Sustainable Perspective," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 4, 2024, doi: 10.3390/su16041661.
- [4] Y. Ibrahim and N. Hilal, "Enhancing ultrafiltration membrane permeability and antifouling performance through surface patterning with features resembling feed spacers," *NPJ Clean Water*, vol. 6, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41545-023-00277-3.
- [5] J. Xu, H. Wang, Z. Zhou, and Z. Zou, "Ferromagnetic properties of N-doped and undoped TiO_2 rutile single-crystal wafers with addition of tungsten trioxide," *Materials*, vol. 11, no. 10, 2021, doi: 10.3390/ma11101934.
- [6] S. Alzahrani and A. W. Mohammad, "Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 4, no. C, pp. 107–133, 2014, doi: 10.1016/j.jwpe.2014.09.007.
- [7] D. C. Da Silva, C. Lucas, H. Borges de Moraes Juviano, M. Moura, A. Dantas Neto, and T. Dantas, "Novel produced water treatment using microemulsion systems to remove oil contents," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 33, p. 101006, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.101006.
- [8] R. Azeez and F. Al-Zuhairi, "Bio-Treatment Technologies of Produced Water: A Review," *Engineering and Technology Journal*, vol. 40, no. 9, pp. 1–15, 2022, doi: 10.30684/etj.2022.131480.1040.
- [9] A. Fakhru'l-Razi, A. Pendashteh, L. C. Abdullah, D. R. A. Biak, S. S. Madaeni, and Z. Z. Abidin, "Review of technologies for oil and gas produced water treatment," *J Hazard Mater*, vol. 170, no. 2–3, pp. 530–551, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.044.
- [10] Y. Gong, X. Zhao, Z. Cai, S. E. O'Reilly, X. Hao, and D. Zhao, "A review of oil, dispersed oil and sediment interactions in the aquatic environment: Influence on the fate, transport and remediation of oil spills," *Mar Pollut Bull*, vol. 79, no. 1–2, pp. 16–33, 2014, doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.12.024.
- [11] C. Li, J. Li, N. Wang, Q. Zhao, and P. Wang, "Status of the treatment of produced water containing polymer in oilfields: A review," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 4, p. 105303, 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105303.
- [12] C. Abdelhamid, A. Latrach, M. Rabiei, and K. Venugopal, "Produced Water Treatment Technologies : A Review," 2025.
- [13] American Public Health Association and American Water Works Association and

- Water Environment Federation, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," in *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017. [Online]. Available: <https://www.standardmethods.org>
- [14] J. A. Veil, *Produced Water Management Options and Technologies*. 2021. doi: 10.1007/978-1-4614-0046-2_29.
- [15] S. Jiménez, M. M. Micó, M. Arnaldos, F. Medina, and S. Contreras, "State of the art of produced water treatment," *Chemosphere*, vol. 192, pp. 186–208, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.139.
- [16] A. Simões, R. Macêdo-Júnior, B. Santos, L. Silva, D. Silva, and D. Ruzene, "Produced Water: An overview of treatment technologies," *Int J Innov Educ Res*, vol. 8, no. 4, pp. 207–224, 2020, doi: 10.31686/ijer.vol8.iss4.2283.
- [17] R. Etchepare, H. Oliveira, A. Azevedo, and J. Rubio, "Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles," *Sep Purif Technol*, vol. 186, pp. 326–332, 2017, doi: 10.1016/j.seppur.2017.06.007.
- [18] F. Salem and T. Thiemann, "Produced Water from Oil and Gas Exploration—Problems, Solutions and Opportunities," *J Water Resour Prot*, vol. 14, no. 02, pp. 142–185, 2022, doi: 10.4236/jwarp.2022.142009.
- [19] V. K. Gupta, I. Ali, T. A. Saleh, A. Nayak, and S. Agarwal, "Chemical treatment technologies for waste-water recycling - An overview," *RSC Adv*, vol. 2, no. 16, pp. 6380–6388, 2019, doi: 10.1039/c2ra20340e.
- [20] A. C. Klemz et al., "Oilfield produced water treatment by liquid-liquid extraction: A review," *J Pet Sci Eng*, vol. 199, no. November 2020, 2021, doi: 10.1016/j.petrol.2020.108282.
- [21] T. E. Aniyikaiye, T. Oluseyi, J. O. Odiyo, and J. N. Edokpayi, "Physico-chemical analysis of wastewater discharge from selected paint industries in Lagos, Nigeria," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ijerph16071235.
- [22] W. Jiang et al., "A critical review of analytical methods for comprehensive characterization of produced water," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 2, pp. 1–29, 2021, doi: 10.3390/w13020183.
- [23] F. Nath, M. O. S. Chowdhury, and M. M. Rhaman, "Navigating Produced Water Sustainability in the Oil and Gas Sector: A Critical Review of Reuse Challenges, Treatment Technologies, and Prospects Ahead," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 23, 2023, doi: 10.3390/w15234088.
- [24] J. A. Veil, M. G. Puder, D. Elcock, and R. J. Jr. Redweik, "A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane. Prepared by: Argonne National Laboratory. Prepared for: U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory Under Contract W-31-109-Eng-38," *Argonne National Laboratory report, prepare for U.S Department of Energy and National Energy Technology laboratory*, no. January, p. 87, 2024, [Online]. Available: <http://www.osti.gov/servlets/purl/821666/%0Ahttp://www.circleofblue.org/waternews/wp-content/uploads/2010/08/prodwaterpaper1.pdf>
- [25] W. Jiang and L. Chen, "Alternative splicing: Human disease and quantitative analysis from high-throughput sequencing," *Comput Struct Biotechnol J*, vol. 19, pp. 183–195, 2021, doi: 10.1016/j.csbj.2020.12.009.
- [26] L. Stroud, E. Green, and J. Cronje, "A Revision Process That Bridges Qualitative and Quantitative Assessment," pp. 436–444, 2020, doi: 10.4236/psych.2020.113029.
- [27] S. Madan, R. Madan, and A. Hussain, "Advancement in biological wastewater treatment using hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR): a review," *Appl Water Sci*, vol. 12, no. 6, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1007/s13201-022-01662-y.
- [28] M. A. Al-Ghouti, M. A. Al-Kaabi, M. Y. Ashfaq, and D. A. Da'na, "Produced water characteristics, treatment and reuse: A review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 28, no. January, pp. 222–239, 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.02.001.
- [29] J. Xu, Q. Cui, C. Bu, S. Ismail, and S. Q. Ni, "Partition of Anammox and Nitrifiers Through Bio-Carriers for Full-Scale Sidestream Partial Nitrification–Anammox Plant," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 10, no. March, pp. 1–9, 2022, doi: 10.3389/fbioe.2022.819937.
- [30] PERMENLHK, "Permen No.19 thn 2010-BMAL MIGAS," *Peraturan Menteri Negara*

Lingkungan Hidup Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Minyak Dan Gas Serta Panas Bumi, pp. 1–12, 2010.

- [31] P. Zahreddine and S. Nepal, “Innovative Nutrient Removal Technologies – Case Studies of Intensified or Enhanced Treatment,” *94th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference, WEFTEC 2021*, no. August, pp. 891–907, 2021.
- [32] Y. Yang *et al.*, “Ecological risk assessment and environment carrying capacity of soil pesticide residues in vegetable ecosystem in the Three Gorges Reservoir Area,” *J Hazard Mater*, vol. 435, p. 128987, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2022.128987.
- [33] L. Tang *et al.*, “Knockout of OsNRAMP5 enhances rice tolerance to cadmium toxicity in response to varying external cadmium concentrations via distinct mechanisms,” *Science of the Total Environment*, vol. 832, no. March, p. 155006, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155006.
- [34] Y. Yang *et al.*, “Ecological risk assessment and environment carrying capacity of soil pesticide residues in vegetable ecosystem in the Three Gorges Reservoir Area,” *J Hazard Mater*, vol. 435, p. 128987, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128987>.
- [35] E. H. Khader, N. S. Abbood, T. N. Albyati, and T. J. Mohammed, “Performance evaluation of integral process for treatment of oilfield wastewater,” *AIP Conf Proc*, vol. 2443, no. July, 2022, doi: 10.1063/5.0091914.
- [36] I. M. Chohan, A. Ahmad, N. Sallih, N. Bheel, W. M. Salilew, and A. H. Almaliki, “Effect of seawater salinity, pH, and temperature on external corrosion behavior and microhardness of offshore oil and gas pipeline: RSM modelling and optimization,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, pp. 1–18, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-67463-2.
- [37] M. Baikousi *et al.*, “Hydrogen Sulfide Removal via Sorption Process on Activated Carbon–Metal Oxide Composites Derived from Different Biomass Sources,” *Molecules*, vol. 28, no. 21, 2023, doi: 10.3390/molecules28217418.
- [38] T. U. Rahman *et al.*, “The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management,” *Membranes (Basel)*, vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.3390/membranes13020181.
- [39] ACGIH, *TLVs and BEIs: Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2023. Available: <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines/>
- [40] J. Meng, S. Shen, C. Zhou, T. Zhang, and Y. Xu, “Optimization pilot scale study on ammonia nitrogen removal by bio filter,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-42885-6.
- [41] S. H. Lee *et al.*, “Identification of serum metabolic signatures of environmental-leveled phthalate in the Taiwanese child population using NMR-based metabolomics,” *Environmental Pollution*, vol. 316, p. 120454, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2022.120454.
- [42] W. Zhu, C. Duan, and B. Chen, “Energy-pollutant nexus for wastewater treatment in China based on multi-regional input-output analysis,” *J Clean Prod*, vol. 363, p. 132490, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132490.