

## **Pemanfaatan Air Limbah Hasil Pengolahan IPAL Komunal Sebagai *Water Scrubber* Pabrik II Industri Pupuk PT X**

**Naura Alfi Amelia<sup>1)</sup>, Praditya Sigit Ardisty Sitogasa<sup>1)</sup>\***

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Jl. Rungkut Madya, Surabaya

\*Email: [praditya.s.tl@upnjatim.ac.id](mailto:praditya.s.tl@upnjatim.ac.id)

### **Abstrak**

Industri pupuk PT X menghasilkan limbah cair dari berbagai proses produksi yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Penelitian ini bertujuan mengkaji kinerja pemanfaatan air hasil olahan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) komunal sebagai media pencucian gas dalam pengendalian emisi gas di Unit Pabrik II. Metode penelitian bersifat deskriptif dengan pendekatan observasional melalui observasi lapangan, wawancara, serta analisis data operasional IPAL dan hasil uji kualitas emisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa air hasil olahan IPAL komunal dapat dimanfaatkan secara efektif tanpa menurunkan kinerja pengendalian emisi. Konsentrasi partikulat pada cerobong *scrubber* tercatat sekitar 9–10% dari baku mutu, sementara konsentrasi fluor dan amonia masing-masing berada pada kisaran 29–69% dan 7–11% dari baku mutu Permen LHK Nomor 17 Tahun 2019. Pemanfaatan air hasil olahan mencapai 25–32% dari debit IPAL komunal, sehingga berkontribusi dalam menekan penggunaan air bersih. Air sisa proses pencucian gas dialirkan kembali ke IPAL komunal untuk diolah ulang, membentuk sistem resirkulasi yang meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi limbah cair, dan mendukung pengendalian pencemaran udara. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengkajian integrasi pemanfaatan air hasil olahan IPAL komunal dalam sistem pencucian gas sebagai satu kesatuan pengelolaan air limbah dan pengendalian emisi pada industri pupuk di Indonesia, yang mencerminkan penerapan prinsip *zero waste*, produksi bersih dan *circular economy* dalam mendukung keberlanjutan lingkungan serta kinerja perusahaan dalam Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (PROPER).

**Kata kunci:** air hasil olahan, emisi, IPAL, limbah cair, pencucian gas

### **Abstract**

*The fertilizer industry PT X produces liquid waste from various production processes that have the potential to pollute the environment if not managed properly. This study aims to examine the performance of utilizing treated water from the communal Wastewater Treatment Plant (WWTP) as a water scrubber medium in controlling gas emissions at Plant Unit II. The research method is descriptive with an observational approach through field observations, interviews, and analysis of WWTP operational data and emission quality test results. The results show that treated water from the communal WWTP can be utilized effectively without reducing emission control performance. The particulate concentration in the scrubber stack was recorded at around 9-10% of the quality standard, while the fluorine and ammonia concentrations were in the range of 29-69% and 7-11% of the quality standard of LHK Regulation Number 17 of 2019, respectively. The utilization of treated water reached 25–32% of the communal wastewater treatment plant discharge, thereby contributing to reducing the use of clean water. The water remaining from the water scrubber process is returned to the communal wastewater treatment plant for reprocessing, forming a recirculation system that increases resource efficiency, reduces liquid waste, and supports air pollution control. The novelty of this research lies in the assessment of the integration of treated water from communal wastewater treatment plants into water scrubber systems as a unified approach to wastewater management and emission control in the fertilizer industry in Indonesia, this reflects the application of the principles of zero waste, clean production, and circular economy in supporting environmental sustainability and company performance in the Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (PROPER).*

**Keywords:** emission, treated water, wastewater, water scrubber, WWTP

## 1. PENDAHULUAN

Industri pupuk PT X merupakan salah satu perusahaan pupuk terbesar di Indonesia yang beroperasi di bawah naungan PT Pupuk Indonesia (Persero) dengan tiga kompleks utama, yaitu Pabrik I, II, dan III yang memproduksi berbagai jenis produk pupuk seperti amonia, urea, dan pupuk majemuk NPK Phonska, serta bahan kimia. Setiap unit produksi memiliki karakteristik proses yang berbeda, melibatkan tahapan reaksi kimia, pencampuran atau pemisahan bahan, dan pemurnian yang kompleks. Kompleksitas proses tersebut secara langsung menghasilkan limbah, baik berupa limbah padat, gas, dan cair.

Berdasarkan dokumen internal PT X, limbah cair yang berasal dari kegiatan pencucian peralatan, netralisasi bahan baku, kondensasi uap, hingga proses pendinginan memiliki kapasitas maksimal 207 m<sup>3</sup>/jam dengan kandungan pencemar seperti amonia, fluor, COD, dan TSS. Limbah cair menjadi fokus penting dalam pengelolaan lingkungan karena berpotensi mencemari apabila tidak diolah dengan baik (Farhan *et al.*, 2023). Industri pupuk PT X mengolah limbah cairnya melalui IPAL yang mencakup beberapa tahap utama, antara lain aerasi, netralisasi, koagulasi-flokulasi, dan sedimentasi. Air hasil olahan dipastikan memenuhi baku mutu sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor SK.175/Menlhk/Setjen/PKL.1/4/2017.

Seiring dengan prinsip *zero waste*, pengolahan air limbah kini tidak hanya difokuskan pada pemenuhan baku mutu, tetapi juga pada pemanfaatan kembali (*reuse*) hasil olahannya (Al Muhyi & Rahmadia, 2024). Hal ini juga sejalan dengan penerapan *cleaner production* yang menekankan efisiensi penggunaan air, pengurangan limbah cair, dan pengendalian emisi (Novasani *et al.*, 2023). Pendekatan ini menjadi penting bagi industri pupuk PT X yang memiliki kebutuhan air proses dalam jumlah besar dan berkelanjutan. Salah satu kebutuhan air yang signifikan dalam industri pupuk PT X adalah penggunaan air baku pada sistem *water scrubber*, yang berfungsi sebagai media pembersih gas buang untuk menyerap gas dan partikel pencemar sebelum dilepaskan ke atmosfer (Damayanti & Hendrasarie, 2025). Pengoperasian *water scrubber* membutuhkan suplai air baku yang kontinu dan dalam jumlah besar, sehingga berpotensi meningkatkan konsumsi air bersih apabila tidak diintegrasikan dengan sistem pengelolaan air limbah. Di sisi lain, emisi gas buang industri pupuk wajib memenuhi baku mutu sesuai Permen LHK No. 17 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Bagi Usaha dan Atau Kegiatan Industri Pupuk dan Industri Amonium Nitrat.

Pemanfaatan *treated water* IPAL komunal sebagai media *water scrubber* telah diterapkan di Unit Pabrik II NPK Phonska PT X sebagai integrasi antara pengelolaan air limbah dan pengendalian pencemaran udara. Air hasil olahan IPAL komunal digunakan untuk proses pembersihan gas buang, kemudian dialirkan kembali ke IPAL komunal untuk diolah kembali. Penerapan sistem tersebut hingga saat ini belum banyak dibahas dalam kajian ilmiah, terutama yang menguraikan pemanfaatan air olahan IPAL sebagai pengendali emisi pada sistem *water scrubber*, kontribusinya terhadap pengurangan penggunaan air bersih, serta pola sirkulasi air dalam satu sistem pengelolaan yang terpadu pada industri pupuk di Indonesia.

Implementasi kebijakan ini juga sejalan dengan komitmen industri pupuk PT X terhadap Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (PROPER) yang diinisiasi oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Berdasarkan kondisi tersebut, studi ini mengkaji kinerja *water scrubber* yang menggunakan *treated water* IPAL komunal dalam memenuhi baku mutu emisi gas buang, menganalisis kontribusi pemanfaatan *treated water* terhadap pengurangan penggunaan air bersih, mendeskripsikan sistem sirkulasi air hasil *water scrubber* yang dialirkan kembali ke IPAL komunal untuk diolah ulang, sehingga dapat menjadi referensi pengembangan strategi pengelolaan air limbah berkelanjutan di sektor industri pupuk nasional.

## **2. METODE**

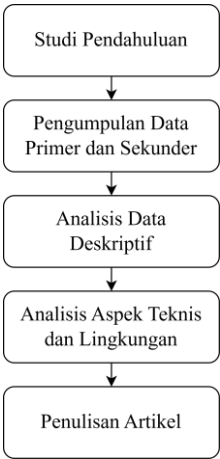
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif dengan pendekatan observasional. Metode deskriptif bertujuan untuk menggambarkan secara sistematis dan faktual suatu fenomena tanpa memberikan perlakuan terhadap variabel yang diteliti (Suganda *et al.*, 2025). Penelitian ini difokuskan untuk menggambarkan kondisi aktual pengelolaan dan pemanfaatan *treated water* dari IPAL komunal sebagai *water scrubber* pada Unit Pabrik II PT X. Pendekatan observasional dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap proses pengolahan air limbah di IPAL komunal, alur distribusi dan sistem kerja *water scrubber*, serta air sisa *scrubber* yang dikembalikan ke IPAL untuk diolah kembali.

Data yang digunakan terdiri atas data primer melalui observasi lapangan dan wawancara dengan staf Departemen Lingkungan Hidup PT X, operator IPAL, serta operator *water scrubber*, dan data sekunder berupa laporan operasional IPAL pada tanggal 8–14 Maret 2025 dan hasil uji kualitas emisi pada triwulan I tahun 2025. Analisis dilakukan untuk menilai efektivitas pemanfaatan *treated water* sebagai *water scrubber* dengan membandingkan

parameter kualitas emisi terhadap baku mutu Permen LHK 17 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Bagi Usaha dan Atau Kegiatan Industri Pupuk dan Industri Amonium Nitrat serta menilai efisiensi penggunaan air bersih. Variabel penelitian dan teknik pengolahan data disajikan pada Tabel 1, sedangkan alur penulisan artikel disajikan pada Gambar 1.

Tabel 1. Variabel penelitian

| No. | Variabel                                      | Parameter yang Diamati                                                       | Teknik Pengolahan Data                                        | Sumber Data                           |
|-----|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1   | Pemanfaatan <i>treated water</i> IPAL komunal | Debit <i>treated water</i> untuk <i>water scrubber</i> (m <sup>3</sup> /jam) | Analisis debit dan persentase terhadap kapasitas IPAL komunal | Laporan operasional IPAL komunal      |
| 2   | Kinerja pengendalian emisi                    | Parameter emisi gas buang                                                    | Perbandingan dengan Baku Mutu Permen LHK No. 17 Tahun 2019    | Hasil uji emisi Triwulan I Tahun 2025 |
| 3   | Sistem sirkulasi air                          | Alur resirkulasi air <i>water scrubber</i> ke IPAL komunal                   | Analisis deskriptif alur proses                               | Observasi lapangan                    |

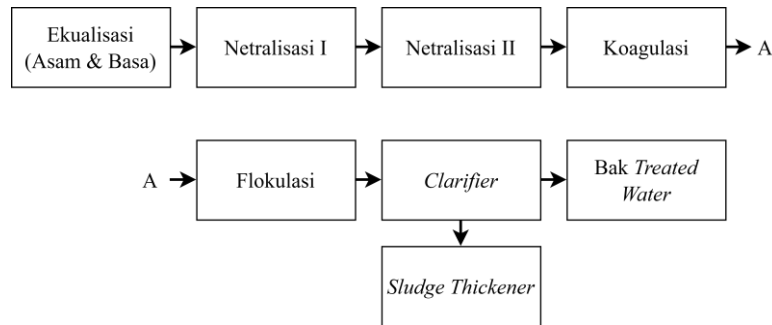


Gambar 1. Alur Penulisan Artikel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Proses pengolahan air limbah di IPAL komunal PT X

Air limbah yang dihasilkan oleh industri pupuk PT X memiliki kapasitas maksimal 207 m<sup>3</sup>/jam, terdiri atas air limbah bersifat basa yang berasal dari proses produksi urea (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) dan amonia (NH<sub>3</sub>), serta air limbah bersifat asam dari penggunaan bahan baku proses pembuatan pupuk majemuk. Air limbah yang dihasilkan akan dialirkan menuju IPAL komunal untuk menurunkan kadar pencemar (Santo *et al.*, 2019). Proses pengolahan dilakukan secara bertahap melalui beberapa unit pengolahan fisika-kimia.



**Gambar 2.** Diagram Alir IPAL Komunal PT X

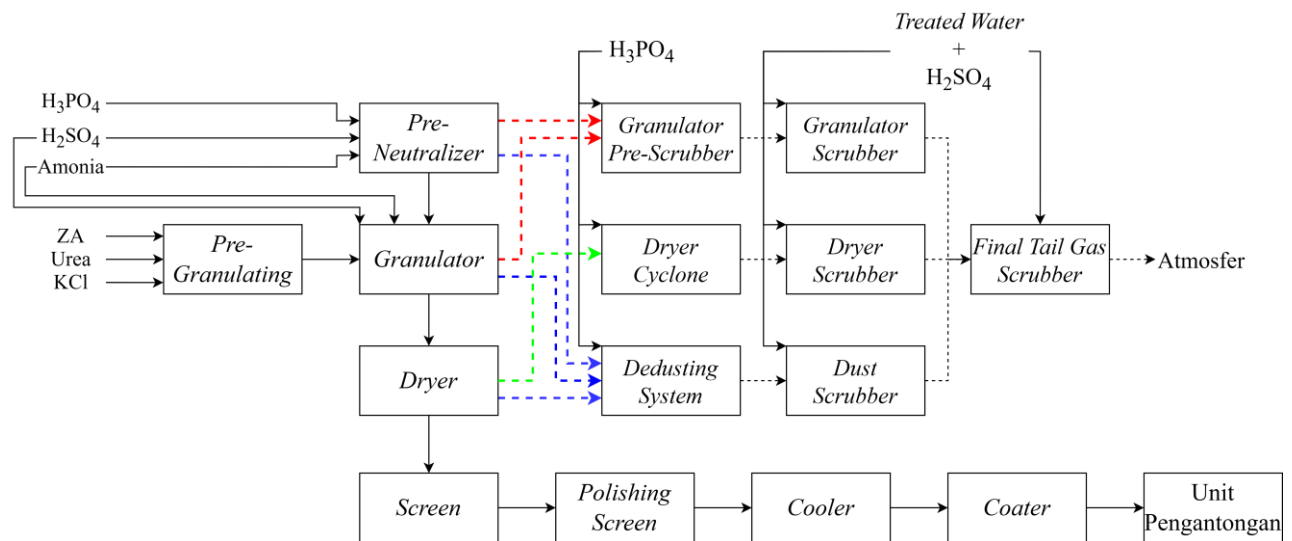
Gambar 2 menunjukkan proses pengolahan air limbah di IPAL Komunal PT X yang diawali pada unit ekualisasi sebagai tempat pencampuran limbah asam dan basa dengan aerasi untuk menstabilkan kualitas air. Air kemudian dialirkan ke netralisasi I untuk penyesuaian pH menggunakan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  atau  $\text{NaOH}$ , lalu mengalir ke netralisasi II. Tahap selanjutnya adalah koagulasi dengan penambahan tawas, diikuti flokulasi menggunakan polimer anionik untuk membentuk flok yang mudah mengendap. Air limbah kemudian masuk ke *clarifier* untuk memisahkan flok dari air bersih (Fikri, 2021). Air hasil olahan ditampung di bak *treated water*, sedangkan lumpur dikirim ke *sludge thickener* untuk proses pengentalan sebelum penanganan lebih lanjut.

### 3.2 Sistem *water scrubber* di unit pabrik II

Pabrik II PT X memproduksi pupuk NPK Phonska melalui tahapan pencampuran bahan baku, granulasi, pengeringan, pengayakan, dan pendinginan. Proses ini menghasilkan emisi yang mengandung amonia ( $\text{NH}_3$ ), fluor (F), dan debu (*dust*) yang berpotensi mencemari udara. Untuk mengendalikan emisi agar sesuai baku mutu, digunakan sistem *water scrubber* sebagai alat pengendali pencemar udara (Ilmi *et al.*, 2025). Sistem ini bekerja dengan mengalirkan cairan pembersih di dalam kolom untuk menangkap partikel dan gas pencemar melalui mekanisme kontak antara gas dan cairan. Gas yang keluar ke atmosfer memiliki kadar pencemar lebih rendah dan telah memenuhi baku mutu emisi yang ditetapkan (A. A *et al.*, 2022).

Air yang digunakan sebagai media pembersih emisi pada *water scrubber* di pabrik pupuk NPK Phonska PT X berasal dari hasil olahan IPAL komunal, yaitu *treated water*. Pemanfaatan air olahan ini merupakan penerapan prinsip *reuse*, yaitu penggunaan kembali air yang telah diolah untuk kebutuhan bernilai guna (Al Muhyi & Rahmadia, 2024). Dalam prosesnya, *treated water* ditambahkan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  sebagai agen pengikat dan penetral senyawa basa pada emisi. Penambahan asam sulfat berfungsi menurunkan pH agar proses penyerapan gas

lebih efektif dan mencegah pelepasan kembali senyawa ke atmosfer, sehingga proses pelarutan gas pada sistem *scrubber* berlangsung optimal (Abd Al-Hussein, 2021).



**Gambar 3.** Proses Produksi Pupuk NPK Phonska

Pada Gambar 3 dijelaskan proses pembuatan pupuk NPK Phonska serta tiga tahapan utama sistem *water scrubber*. Tahap pertama, gas buang yang berasal dari proses *pre-neutralizer* dan *granulator* dialirkan ke *granulator pre-scrubber*, gas buang dari unit *dryer* dialirkan ke *dryer cyclone*, dan gas yang mengandung debu dari proses produksi dialirkan ke *dedusting system*. Seluruh aliran gas tersebut kemudian dicuci menggunakan larutan asam fosfat ( $H_3PO_4$ ) yang berfungsi sebagai agen penyerap dan penetral gas bersifat basa, sehingga mampu menurunkan kadar senyawa reaktif di udara (Sholikhah *et al.*, 2021). Proses ini menyerap dan mengikat gas amonia ( $NH_3$ ), fluor (F), serta partikel debu (*dust*) dari proses produksi sebelum dialirkan ke tahap berikutnya.

Tahap kedua dilakukan pada tiga unit *scrubber*, yaitu *granulator scrubber*, *dryer scrubber*, dan *dust scrubber*, dengan menyemprotkan air yang berasal dari *treated water* dengan penambahan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ). Proses ini berfungsi mencuci serta melarutkan sisa gas dan partikulat yang belum terpisah pada tahap awal. Kontak intensif antara gas dan cairan penyerap meningkatkan efisiensi penyerapan, sehingga kadar gas berbahaya semakin berkurang (Gunawan *et al.*, 2025).

Tahap ketiga, gas sisa dialirkan ke *Tail Gas Scrubber* (TGS) untuk pencucian akhir menggunakan air yang telah diinjeksi  $H_2SO_4$  sebagai media penyerap. Proses ini menetralkan sisa gas amonia dan menurunkan kadar fluor hingga memenuhi baku mutu sesuai Permen LHK No. 17 Tahun 2019. Sistem kerja TGS berlangsung dalam kolom tertutup yang dilengkapi *nozzle*

semprotan air di bagian atas. Gas buang bergerak dari bawah kolom berlawanan arah dengan semprotan air dari atas, sehingga partikel dan gas pencemar terserap ke dalam cairan.

**Tabel 2.** Pengujian emisi pada cerobong *scrubber* NPK I Triwulan 1 Tahun 2025

| No. | Parameter                | Hasil | Baku Mutu | Satuan             | Metode              |
|-----|--------------------------|-------|-----------|--------------------|---------------------|
| 1   | Partikulat               | 15    | 150       | mg/Nm <sup>3</sup> | SNI 7117.21:2021    |
| 2   | Fluor, F                 | 2,65  | 9         | mg/Nm <sup>3</sup> | SNI 19-7117.9-2005  |
| 3   | Ammonia, NH <sub>3</sub> | 27,33 | 250       | mg/Nm <sup>3</sup> | SNI 19-7117.6-2005  |
| 4   | Opasitas                 | <20   | -         | %                  | SNI 19-7117.11-2005 |

**Tabel 3.** Pengujian emisi pada cerobong *scrubber* Phonska I Triwulan 1 Tahun 2025

| No. | Parameter                | Hasil | Baku Mutu | Satuan             | Metode              |
|-----|--------------------------|-------|-----------|--------------------|---------------------|
| 1   | Partikulat               | 14    | 150       | mg/Nm <sup>3</sup> | SNI 7117.21:2021    |
| 2   | Fluor, F                 | 6,02  | 9         | mg/Nm <sup>3</sup> | SNI 19-7117.9-2005  |
| 3   | Ammonia, NH <sub>3</sub> | 16,54 | 250       | mg/Nm <sup>3</sup> | SNI 19-7117.6-2005  |
| 4   | Opasitas                 | <20   | -         | %                  | SNI 19-7117.11-2005 |

Berdasarkan hasil pengujian emisi pada Tabel 2 dan Tabel 3, seluruh parameter emisi berada pada nilai yang lebih rendah dibandingkan baku mutu yang ditetapkan dalam Permen LHK No. 17 Tahun 2019. Konsentrasi partikulat pada cerobong *scrubber* NPK I dan Phonska I tercatat hanya sekitar 9–10% dari nilai ambang batas. Parameter fluor dan amonia juga menunjukkan tingkat pengendalian yang tinggi, dengan konsentrasi fluor berada pada kisaran 29–69% dari nilai ambang batas, sedangkan konsentrasi amonia hanya berkisar 7–11% dari nilai ambang batas. Perbedaan yang cukup besar antara nilai terukur dan baku mutu ini menunjukkan bahwa penggunaan *treated water* sebagai media pada sistem *water scrubber* tidak menurunkan efektivitas pengendalian emisi gas buang.

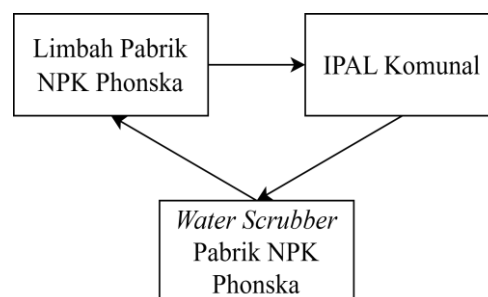
### 3.3 Analisis pemanfaatan *treated water* sebagai *water scrubber*

Pemanfaatan *treated water* sebagai media pada sistem *water scrubber* dilakukan untuk meninjau potensi pengurangan penggunaan air bersih dalam mendukung pengendalian emisi gas di PT X. Variasi debit *treated water* menunjukkan fluktuasi yang masih berada dalam rentang operasional, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai debit minimum–maksimum pada Tabel 4 yang memadai untuk mendukung kinerja sistem *water scrubber*.

**Tabel 4.** Debit *Treated Water* untuk Tangki Penyimpanan Air *Water Scrubber* Tanggal 8–14 Maret 2025

| No. | Parameter                                          | Nilai   | Satuan              |
|-----|----------------------------------------------------|---------|---------------------|
| 1   | Debit minimum                                      | 23,24   | m <sup>3</sup> /jam |
| 2   | Debit maksimum                                     | 48,15   | m <sup>3</sup> /jam |
| 3   | Debit rata-rata                                    | 34,60   | m <sup>3</sup> /jam |
| 4   | Persentase pemanfaatan terhadap debit IPAL komunal | 25 – 32 | m <sup>3</sup> /jam |

Debit *treated water* yang dialirkan ke tangki *water scrubber* pada tanggal 8–14 Maret 2025 berada pada kisaran rata-rata 34,60 m<sup>3</sup>/jam, atau sekitar 25–32% dari debit IPAL komunal. Persentase ini menunjukkan bahwa sebagian kebutuhan air untuk proses *scrubber* dapat secara konsisten dipenuhi dari *treated water*, sehingga ketergantungan terhadap air bersih dapat ditekan. Selain itu, air dari tangki penyimpanan dialirkan ke *water scrubber* menggunakan pompa berkapasitas 10 m<sup>3</sup>/jam yang dioperasikan sekitar 60% dari kapasitas total sehingga aliran *treated water* tetap stabil tanpa menambah beban energi yang signifikan. Keberlanjutan pemanfaatan *treated water* sebagai media *water scrubber* tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan debit, tetapi juga oleh kualitas air hasil olahan IPAL komunal. Proses pengolahan pada IPAL komunal berperan dalam menghasilkan *treated water* dengan karakteristik yang aman untuk digunakan sebagai media pencuci gas, sehingga tidak menimbulkan gangguan operasional pada sistem *scrubber*.



**Gambar 4.** Resirkulasi Limbah Cair pada Pabrik NPK Phonska

Air yang telah digunakan pada sistem *water scrubber* dialirkan kembali ke IPAL komunal untuk diolah ulang, sehingga membentuk sistem resirkulasi air tertutup yang memaksimalkan pemanfaatan air tanpa menambah beban limbah cair ke lingkungan. Aliran *treated water* menuju tangki penyimpanan tidak selalu berlangsung secara kontinyu. Pada kondisi tertentu, seperti ketika kapasitas tangki telah mencapai batas operasional atau ketika kebutuhan suplai untuk proses *water scrubber* menurun, *treated water* dapat dialihkan untuk dibuang secara

langsung ke badan air penerima setelah memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Pola pemanfaatan ini mencerminkan penerapan konsep *circular economy* di sektor industri, di mana air hasil olahan IPAL komunal dimanfaatkan kembali dalam sistem pengendalian emisi dan pelepasannya dikendalikan agar tetap memenuhi baku mutu lingkungan, sekaligus mendukung kontinuitas operasional, konservasi sumber daya air, dan perlindungan lingkungan.

#### **4. KESIMPULAN**

Pemanfaatan kembali *treated water* dari IPAL komunal sebagai media pembersih gas buang pada sistem *water scrubber* di Pabrik NPK Phonska PT X menunjukkan integrasi antara pengelolaan air limbah dan pengendalian pencemaran udara. Emisi gas buang hasil proses *scrubber* telah memenuhi baku mutu yang berlaku, menandakan bahwa penggunaan *treated water* tidak menurunkan kinerja pengendalian emisi. Analisis debit menunjukkan bahwa pemanfaatan *treated water* berkontribusi sekitar 25–32% dari kapasitas IPAL komunal, sehingga mampu menurunkan potensi penggunaan air bersih dalam proses operasional. Air hasil proses *water scrubber* kemudian dialirkan kembali ke IPAL komunal untuk diolah ulang hingga memenuhi standar kualitas sebelum digunakan kembali. Penerapan sistem ini tidak hanya memastikan kepatuhan terhadap baku mutu emisi, tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan air, menekan volume limbah cair, serta mengurangi pencemaran udara. Selain itu, sistem sirkulasi ini juga berkontribusi dalam menghemat sumber daya dan mendukung pencapaian target lingkungan perusahaan dalam PROPER serta menunjukkan komitmen terhadap prinsip produksi bersih dan keberlanjutan industri.

#### **DAFTAR RUJUKAN / PUSTAKA**

- A. A, N. H., Prajogo, S., & Kurniasetiwati, A. S. (2022). Perancangan Wet Scrubber Kapasitas 0,72 m<sup>3</sup>/jam pada Proses Pemurnian Biogas dari Kotoran Sapi. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 13(01), 850–858. <https://doi.org/10.35313/irwns.v13i01.4178>
- Abd Al-Hussein, A. S. (2021). Using sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) for pH adjustment in water treatment. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 11(3), 19–27. <https://doi.org/10.52716/jprs.v11i3.530>
- Al Muhyi, A., & Rahmadia, N. (2024). Penerapan Prinsip Keberlanjutan dalam Pengelolaan Limbah di Kawasan Industri Terpadu Batang. *Elektriese: Jurnal Sains Dan Teknologi Elektro*, 14(01), 159–171. <https://doi.org/10.47709/elektriese.v14i01.4683>
- Damayanti, S. R., & Hendrasarie, N. (2025). Efektivitas Absorben Kimia pada Wet Scrubber untuk Menurunkan Emisi CO dan CO<sub>2</sub>. *Jurnal Serambi Engineering*, X(1), 11787–11795.
- Farhan, A., Lauren, C. C., & Fuzain, N. A. (2023). Analisis Faktor Pencemaran Air dan Dampak Pola

- Konsumsi Masyarakat di Indonesia. *Jurnal Hukum dan HAM Wara Sains*, 2(12), 1095–1103. <https://doi.org/10.58812/jhhws.v2i12.803>
- Fikri, M. (2021). Penggunaan Teknologi Clarifier Tank pada Pengolahan Air Limbah Industri Kelapa Sawit. *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal*, 803–810.
- Gunawan, Sugiantoro, B., Ngisomudin, Warso, & Supriyana, N. (2025). Optimasi Vortex Wet Scrubber Dengan Suspensi Dolomit Untuk Penangkapan Partikel Karbon Ultrafine Dan Polutan Asam Yang Lebih Efisien. *Jurnal Crankshaft*, 8(3), 54–61. <https://doi.org/10.24176/cra.v8i3.15565>
- Ilmi, I., Simamora, J., Suherman, S., & Siregar, Z. H. (2025). Pengolahan Gas Buang Hasil Pembakaran Campuran Refuse Derived Fuel dan Serbuk Gergaji dengan Spray Tower Scrubber. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 4(1), 136–146. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i1.190>
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik. (2017). *Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor SK.175/Menlhk/Setjen/PKL.1/4/2017*.
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik. (2019). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.17/MenLHK/Setjen/Kum.1/4/2019 Tentang Baku Mutu Emisi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Pupuk dan Industri Amonium Nitrat*.
- Novasani, R., Semnasti, Y. C. W., Semnasti, M. C. P. I., & Semnasti, A. P. (2023). Analisis Alternatif Penerapan Produksi Bersih Pada Salah Satu Industri Tahu Kediri Melalui Model Interaktif. *Waluyo Jatmiko Proceeding*, 16(1), 571–580. <https://doi.org/10.33005/wj.v16i1.83>
- Santo, F. E., Utomo, S., & Sir, T. M. W. (2019). Perencanaan Instalasi Pengelolaan Air Limbah Sistem Komunal pada Perumahan Kodim 1605 Belu. *Jurnal Teknik Sipil*, VIII(1), 57.
- Sholikhah, H. I., Putri, H. R., & Inayati, I. (2021). Pengaruh Konsentrasi Aktivator Asam Fosfat ( $H_3PO_4$ ) pada Pembuatan Karbon Aktif dari Sabut Kelapa terhadap Adsorpsi Logam Kromium. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 5(1), 45. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v5i1.53572>
- Suganda, D. A., Haura, R., Widodo, S., & Datu, Y. A. (2025). Metode Penelitian Kualitatif, Kuantitatif dan Campuran Teori dan Implementasi. *PT Media Penerbit Indonesia. Medan*.