

The Role of Jet Bubble Column Technology in Domestic Wastewater Treatment at Pesantren Zaadul Ma'ad

Yuniar, Didiek Hari Nugroho*, Yuliansyah

Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia
Email: dh.nugroho@polsri.ac.id

Article Info

Received: 23/09/2025
Revised: 05/12/2025
Accepted: 16/02/2026
Published: 19/03/2026

Keywords: aeration technology; domestic wastewater; jet bubble column; pesantren; water treatment



Copyrights © Author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0). All writings published in this journal are personal views of the author and do not represent the views of this journal and the author's affiliated institutions.

Abstract

Domestic wastewater in Islamic boarding schools is commonly managed using simple holding ponds without standardized treatment, resulting in high turbidity, elevated suspended solids, ammonia accumulation, and low dissolved oxygen levels. These conditions negatively affect environmental quality, sanitation, and the health of the community. Pesantren Zaadul Ma'ad experienced similar problems, with initial wastewater characteristics showing low dissolved oxygen (3.85 mg/L), turbidity of 49.3 NTU, total suspended solids (TSS) of approximately 50 mg/L, and ammonia concentrations around 30 mg/L. This community engagement program aimed to apply Jet Bubble Column (JBC) technology to improve wastewater quality and to strengthen the capacity of students and teachers in managing simple wastewater treatment systems. The program was carried out using a structured Participatory Action Research (PAR) approach, consisting of socialization, operational training, installation of the JBC unit, operational mentoring, periodic monitoring, and sustainability planning. The JBC system was installed in the wastewater holding pond and integrated with a multilayer filtration unit. Water quality monitoring was conducted using portable instruments to measure pH, dissolved oxygen (DO), total dissolved solids (TDS), turbidity, total suspended solids (TSS), and ammonia (NH₃). The implementation of JBC technology resulted in significant improvements in wastewater quality. DO levels increased to above 5 mg/L, ammonia concentrations decreased by 80–90%, TSS levels were reduced by more than 50%, and turbidity dropped to below 1 NTU. These improvements indicate a transition from anaerobic to stable aerobic conditions, highlighting the effectiveness of microbubble aeration combined with multilayer filtration in treating domestic wastewater. Beyond the technical results, the program strengthened local management capacity through the training of internal operators, the development of standard operating procedures (SOPs), and the integration of sanitation topics into educational activities. Recommended follow-up actions include optimizing the JBC design for greater efficiency, expanding the use of treated water for non-consumptive purposes, and replicating the model in other boarding schools as part of a broader effort to support decentralized and sustainable wastewater management systems.

Peran Teknologi Kolom Gelembung Pancaran pada Proses Pengolahan Air Limbah Domestik Pesantren Zaadul Ma'ad

Kata Kunci: aerasi; kolom gelembung pancaran; limbah domestik; pesantren; pengolahan air

Abstrak

Air limbah domestik di lingkungan pesantren umumnya dikelola melalui kolam penampungan sederhana tanpa proses pengolahan yang terstandar.

Kondisi ini menyebabkan tingginya kekeruhan, meningkatnya padatan tersuspensi, akumulasi amonia, serta rendahnya kadar oksigen terlarut, yang berdampak negatif terhadap kualitas lingkungan, sanitasi, dan kesehatan warga pesantren. Pesantren Zaadul Ma'ad menghadapi permasalahan serupa, dengan karakteristik awal air limbah berupa dissolved oxygen (DO) 3,85 mg/L, turbidity 49,3 NTU, total suspended solids (TSS) sekitar 50 mg/L, dan kadar amonia ± 30 mg/L. Kegiatan pengabdian masyarakat ini bertujuan untuk menerapkan teknologi Jet Bubble Column (JBC) sebagai solusi pengolahan air limbah domestik yang efektif serta meningkatkan kapasitas santri dan guru dalam pengelolaan sistem pengolahan sederhana. Pelaksanaan program menggunakan pendekatan Participatory Action Research (PAR), yang meliputi tahapan sosialisasi, pelatihan operasional, instalasi unit JBC, pendampingan operasional harian, monitoring berkala, dan penyusunan rencana keberlanjutan. Sistem JBC dipasang pada kolam penampungan air limbah dan diintegrasikan dengan unit filtrasi berlapis. Monitoring kualitas air dilakukan menggunakan instrumen portabel untuk mengukur parameter pH, DO, total dissolved solids (TDS), turbidity, TSS, dan amonia (NH_3). Hasil implementasi menunjukkan peningkatan signifikan pada kualitas air limbah. Nilai DO meningkat menjadi lebih dari 5 mg/L, kadar amonia menurun sebesar 80–90%, TSS berkurang lebih dari 50%, dan turbidity turun hingga kurang dari 1 NTU. Perbaikan ini menunjukkan transisi dari kondisi anaerob menuju kondisi aerob yang stabil, sekaligus menegaskan efektivitas aerasi mikrogelembung yang dipadukan dengan filtrasi berlapis dalam menurunkan beban pencemar air limbah domestik. Selain luaran teknis, program ini memperkuat kapasitas pengelolaan internal melalui pembentukan operator santri, penyusunan prosedur operasional standar (SOP), serta integrasi isu sanitasi ke dalam kegiatan pembelajaran. Rekomendasi tindak lanjut mencakup optimasi desain JBC untuk efisiensi yang lebih tinggi, pemanfaatan air olahan untuk kebutuhan non-konsumsi, serta replikasi model ini pada pesantren lain guna memperluas penerapan sistem pengolahan air limbah terdesentralisasi dan berkelanjutan.

1. PENDAHULUAN

Air bersih dan sanitasi merupakan dua pilar utama dalam menjaga kesehatan lingkungan, terutama pada kawasan dengan kepadatan aktivitas manusia yang tinggi. Pada skala global, permasalahan pengelolaan air limbah domestik masih menjadi tantangan serius, khususnya di wilayah dengan sistem pengelolaan terdesentralisasi. Li et al. (2024) menegaskan bahwa sistem pengolahan air limbah skala komunitas menghadapi hambatan pada keterbatasan infrastruktur, efisiensi teknologi, serta rendahnya kapasitas pengelola. Kondisi ini diperkuat oleh temuan Aghalari et al. (2020) yang menunjukkan bahwa ketidakefektifan sistem pengolahan limbah berkontribusi terhadap penyebaran agen mikroba berbahaya.

Pesatnya perkembangan teknologi pengolahan air limbah mendorong munculnya berbagai inovasi berbasis proses fisika, kimia, dan biologis. Tolkou dan Kyzas (2024) menjelaskan bahwa teknologi modern diarahkan pada peningkatan efisiensi pemindahan massa, stabilitas reaktor, serta pengurangan kebutuhan energi. Dalam konteks aerasi, penggunaan mikrogelembung dan nanobubble terbukti mampu meningkatkan koefisien transfer oksigen secara signifikan sehingga mempercepat proses degradasi bahan organik (Xiao & Xu, 2020). Selain itu, pendekatan reaktor kolom gelembung semakin berkembang karena mampu mengoptimalkan kontak gas-cair dalam volume reaktor yang relatif kompak (Inkeri & Tynjälä, 2020; Majhool et al., 2023; Papadaki et al., 2024).

Pengolahan air limbah domestik secara terdesentralisasi juga menjadi fokus utama dalam sistem sanitasi kawasan permukiman, termasuk kawasan pendidikan. Brontowiyono et al. (2022) menunjukkan bahwa efektivitas instalasi pengolahan air limbah komunal sangat dipengaruhi oleh desain sistem, manajemen operasional, serta keterlibatan masyarakat. Studi serupa oleh Edokpayi et al. (2021) dan Yulistiyorini et al. (2019) menegaskan bahwa sistem kolam stabilisasi dan reaktor anaerob skala lapangan mampu menurunkan beban pencemar, namun sering terkendala pada kestabilan operasional dalam jangka panjang. Oleh karena itu, integrasi antara inovasi teknologi dan pendekatan partisipatif menjadi kebutuhan mendesak.

Pada lingkungan pesantren, tantangan pengelolaan air limbah domestik menjadi lebih kompleks karena

tingginya intensitas aktivitas santri dalam satu kawasan terbatas. Limbah yang dihasilkan berasal dari aktivitas mandi, wudhu, mencuci pakaian, dan sanitasi harian. Pada banyak kasus, limbah tersebut hanya ditampung dalam kolam tanpa pengolahan lanjutan, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Nugroho (2025) menjelaskan bahwa sistem pengelolaan limbah domestik yang tidak disertai teknologi aerasi dan filtrasi akan menyebabkan akumulasi beban organik, menurunkan kadar oksigen terlarut, serta meningkatkan kandungan amonia.

Secara regulatif, pemerintah Indonesia telah menetapkan baku mutu air limbah domestik melalui Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2025. Regulasi ini mensyaratkan keterpenuhan parameter utama seperti pH, TSS, amonia, dan DO sebelum air limbah dialirkan ke lingkungan. Namun pada praktiknya, banyak institusi pendidikan berbasis asrama belum mampu memenuhi standar tersebut karena keterbatasan teknologi dan sumber daya manusia (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan (Permen LHK), 2025).

Jet Bubble Column (JBC) merupakan salah satu inovasi teknologi kolom gelembung yang memanfaatkan prinsip pancaran fluida berkecepatan tinggi melalui venturi untuk menghasilkan mikrogelembung secara kontinu. Prinsip ini meningkatkan luas permukaan kontak gas-cair sehingga mempercepat perpindahan oksigen dan proses air stripping senyawa volatil. Efektivitas teknologi kolom gelembung pancaran dalam menurunkan kadar amonia telah dibuktikan secara eksperimen oleh Aprillia et al. (2025), sementara Nugroho (2025) menegaskan keunggulan teknologi ini dalam pengolahan limbah cair industri dan domestik. Selain itu, sistem bubble column juga terbukti efektif dalam berbagai aplikasi pengolahan air berbasis proses oksidatif dan adsorptif (Majhool et al., 2023; Papadaki et al., 2024).

Namun demikian, keberhasilan penerapan teknologi tidak hanya ditentukan oleh kinerja alat, tetapi juga oleh keterlibatan pengguna dalam pengelolaan dan pemeliharannya. Ungureanu et al. (Ungureanu et al., 2020) menekankan bahwa keberlanjutan pengolahan air sangat dipengaruhi oleh kemampuan komunitas dalam memanfaatkan kembali air hasil olahan. Dalam konteks pesantren, tantangan ini dapat dijawab melalui pendekatan *Participatory Action Research* (PAR) yang mengintegrasikan proses teknologi dengan pembelajaran berbasis pengalaman.

Pesantren Zaadul Ma'ad Palembang merupakan salah satu pesantren yang menghadapi persoalan pengelolaan limbah domestik dengan karakteristik awal berupa DO rendah 3,85 mg/L, turbidity 49,3 NTU, TSS sekitar 50 mg/L, dan kadar amonia ± 30 mg/L. Nilai tersebut menunjukkan bahwa air limbah berada di atas ambang batas baku mutu yang ditetapkan pemerintah. Oleh karena itu, kegiatan pengabdian ini bertujuan untuk menerapkan teknologi *Jet Bubble Column* (JBC) sebagai solusi pengolahan air limbah domestik berbasis komunitas, meningkatkan kapasitas santri dalam pengelolaan kualitas air, serta menyusun model keberlanjutan yang dapat direplikasi pada lingkungan pesantren lainnya.

2. METODE

Kegiatan pengabdian masyarakat ini dilaksanakan menggunakan pendekatan *Participatory Action Research* (PAR) yang menekankan keterlibatan aktif peserta dalam seluruh rangkaian kegiatan, mulai dari perencanaan, pelaksanaan, hingga evaluasi. Pendekatan ini dipilih karena keberhasilan pengelolaan air limbah skala komunitas sangat dipengaruhi oleh kapasitas pengguna dalam mengoperasikan dan memelihara sistem secara berkelanjutan (Brontowiyono et al., 2022; Ungureanu et al., 2020). Kegiatan dilaksanakan di Pesantren Zaadul Ma'ad, Kota Palembang, dengan melibatkan santri dan guru pembimbing sebagai pengelola utama sistem.

Teknologi yang diterapkan adalah *Jet Bubble Column* (JBC) yang dipadukan dengan unit filtrasi berlapis. Sistem JBC bekerja dengan memanfaatkan injeksi udara melalui venturi untuk menghasilkan mikrogelembung di dalam kolom reaktor, sehingga meningkatkan efisiensi transfer oksigen dan mempercepat proses *air stripping* amonia (Aprilia et al., 2025; Inkeri & Tynjälä, 2020; Majhool et al., 2023). Unit filtrasi menggunakan media pasir silika, karbon aktif, dan zeolit untuk menyaring padatan tersuspensi, menyerap senyawa organik terlarut, serta mengikat ion amonium.

Pelaksanaan kegiatan diawali dengan sosialisasi terkait kondisi air limbah dan prinsip kerja sistem JBC, kemudian dilanjutkan dengan pelatihan operasional pengukuran kualitas air. Parameter yang diukur meliputi pH, *dissolved oxygen* (DO), *total dissolved solids* (TDS), *turbidity*, *total suspended solids* (TSS), dan kadar amonia. Setelah sistem terpasang, dilakukan pendampingan melalui kegiatan monitoring rutin selama sistem beroperasi dengan waktu operasi rata-rata delapan jam per hari. Hasil pengukuran dianalisis dengan mengacu pada baku mutu air limbah domestik berdasarkan Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2025 (LHK, 2025).

Sebagai tahap akhir, disusun strategi keberlanjutan yang mencakup pembentukan tim pengelola internal, penyusunan prosedur operasional standar (SOP), serta pemanfaatan air hasil olahan untuk kebutuhan

non-konsumsi. Upaya ini sejalan dengan prinsip pemanfaatan kembali air hasil olahan sebagai bagian dari konservasi sumber daya air dan pengelolaan limbah berkelanjutan (Saif et al., 2021; Ungureanu et al., 2020).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan capaian utama dari penerapan teknologi *Jet Bubble Column* (JBC) dalam pengolahan air limbah domestik Pesantren Zaadul Ma'ad, dengan menganalisis hubungan antar tahapan metode *Participatory Action Research* (PAR)—mulai dari sosialisasi, pelatihan, instalasi teknologi, pendampingan, hingga evaluasi keberlanjutan. Setiap sub-bagian disusun secara terintegrasi untuk menunjukkan bagaimana perubahan teknis, sosial, dan manajerial saling memperkuat keberhasilan program. Seluruh data teknis merujuk pada hasil pengukuran lapangan dan dikaitkan dengan konsep ilmiah dari studi terbaru (Aghalari et al., 2020; Aprilia et al., 2025; Tolkou & Kyzas, 2024; Xiao & Xu, 2020).

3.1 Sosialisasi Program dan Pembentukan Kesadaran Lingkungan

Keberhasilan peningkatan kualitas air limbah tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga pada aspek lingkungan dan sosial pesantren. Dengan meningkatnya kejernihan air dan hilangnya bau, lingkungan pesantren menjadi lebih sehat dan nyaman. Selain itu, air hasil olahan dapat dimanfaatkan kembali untuk kebutuhan non-konsumsi, yang secara langsung mendukung efisiensi penggunaan air bersih. Hal ini sejalan dengan konsep *wastewater reuse* sebagai bagian dari strategi konservasi air (Ungureanu et al., 2020).

Dari sisi keberlanjutan, hasil kegiatan ini memperkuat bahwa sistem JBC tidak hanya layak diterapkan secara teknis, tetapi juga potensial direplikasi pada lingkungan sejenis. Integrasi teknologi kolom gelembung dengan pendekatan partisipatif menghasilkan model pengelolaan air limbah domestik yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.



Gambar 1. Sosialisai peran teknologi Jet Bubble Column (JBC) dalam pengolahan air limbah domestik

Kegiatan sosialisasi yang ditampilkan pada Gambar 1 menjadi tahap awal pembentukan pemahaman bersama mengenai kondisi eksisting air limbah domestik di Pesantren Zaadul Ma'ad. Data awal menunjukkan bahwa limbah memiliki nilai dissolved oxygen (DO) sebesar 3,85 mg/L, turbidity 49,3 NTU, total suspended solids (TSS) sekitar 50 mg/L, dan kadar amonia ± 30 mg/L. Nilai tersebut menunjukkan kondisi yang belum stabil secara aerob dan berpotensi menimbulkan bau serta gangguan sanitasi.

Kondisi tersebut identik dengan karakter limbah pasif yang tidak mengalami aerasi (Brontowiyono et al., 2022). Pemahaman ini penting karena PAR mengharuskan peserta menjadi *co-researcher*, bukan sekadar penerima teknologi. Pada tahap ini, komitmen awal terbentuk dan menjadi landasan untuk pelatihan teknis berikutnya.

Pemaparan kondisi awal ini menjadi dasar logis penerapan teknologi aerasi mikrogelembung. Dalam diskusi, dijelaskan bahwa rendahnya DO berkorelasi dengan dominasi proses anaerob yang menghasilkan senyawa volatil seperti amonia dan gas berbau. Pendekatan ini memperkuat pemahaman bahwa teknologi yang dipasang bukan sekadar alat tambahan, melainkan solusi berbasis mekanisme ilmiah yang terukur.

3.2 Pelatihan dan Transfer Pengetahuan Operasional

Pelatihan merupakan fase transformasi pengetahuan yang secara eksplisit mengalihkan *expert knowledge* menjadi *lay user knowledge*. Pada tahap ini, santri tidak lagi diposisikan sebagai penerima manfaat pasif, melainkan sebagai calon operator teknologi yang memahami mekanisme kerja sistem secara substantif. Pelatihan dilaksanakan selama dua hari dengan tiga fokus utama, yaitu pengukuran kualitas air, pemahaman sistem filtrasi berlapis, serta perawatan dan pemeliharaan instalasi.

Pada sesi pengukuran kualitas air, santri dilatih menggunakan perangkat portabel seperti DO meter, TDS meter, *turbidity* meter, *ammonia strip reagent*, dan pH meter digital. Berbeda dengan pendekatan teoretis yang hanya menjelaskan definisi parameter, pelatihan ini menekankan kesadaran numerik, yakni pemahaman bahwa setiap nilai yang terbaca memiliki konsekuensi mekanistik terhadap kondisi air. Sebagai contoh, nilai dissolved oxygen (DO) di bawah 4 mg/L mengindikasikan bahwa bakteri aerob tidak dapat tumbuh secara optimal, sehingga proses degradasi organik menjadi tidak efektif. Nilai *turbidity* di atas 20 NTU menunjukkan probabilitas tinggi adanya partikel organik tersuspensi yang berpotensi membentuk endapan, sedangkan kadar amonia melebihi 20 mg/L meningkatkan risiko toksisitas secara signifikan. Santri diminta membandingkan hasil pengukuran *in situ* dengan standar baku mutu yang berlaku, sehingga terbentuk *situational awareness* berbasis data, bukan sekadar kepatuhan terhadap instruksi teknis. Sesi berikutnya membahas sistem filtrasi berlapis. Santri diperkenalkan pada prinsip adsorpsi ion amonium oleh zeolit.

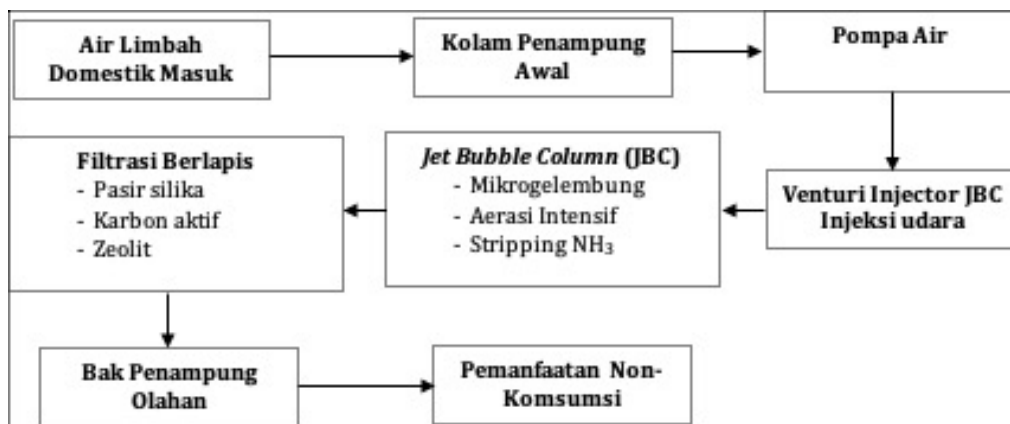
3.3 Instalasi Teknologi JBC dan Penjelasan Teknis Sistem

Instalasi sistem *Jet Bubble Column* (JBC) dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan karakteristik hidrolis kolam penampungan limbah domestik yang memiliki kapasitas $\pm 600 \text{ m}^3$. Sistem dirancang sebagai unit sirkulasi tertutup (*recirculation loop*) yang memanfaatkan pompa sentrifugal berdaya 0,5–0,75 HP untuk menarik air limbah dari kolam penampung awal menuju unit reaktor aerasi. Pompa dipilih berdasarkan kebutuhan *head total* dan debit sirkulasi agar mampu menghasilkan kecepatan alir yang cukup tinggi pada *venturi injector*.

Pada bagian inlet sistem dipasang venturi injector sebagai komponen inti pembentuk mikrogelembung. Venturi terdiri atas bagian *converging section*, *throat*, dan *diverging section*. Ketika air dipompa melewati throat dengan kecepatan tinggi, tekanan statik menurun secara signifikan sehingga terbentuk zona tekanan negatif. Perbedaan tekanan ini menyebabkan udara dari atmosfer terhisap secara otomatis melalui saluran udara yang terhubung pada bagian *throat* tanpa memerlukan *blower* tambahan. Udara yang terhisap kemudian terfragmentasi menjadi mikrogelembung akibat gaya geser tinggi di dalam aliran turbulen.

Reaktor kolom JBC menggunakan pipa PVC vertikal berdiameter 2–3 inci dengan panjang efektif 1,5–2 meter. Konfigurasi vertikal ini dipilih untuk memperpanjang waktu tinggal gelembung (*bubble residence time*) sebelum mencapai permukaan. Berdasarkan karakteristik mikrogelembung berukuran $< 200 \mu\text{m}$, waktu tinggal dalam fase cair berkisar 8–10 detik, jauh lebih lama dibanding gelembung konvensional berdiameter 1–5 mm. Kondisi ini meningkatkan luas permukaan kontak gas-cair dan koefisien transfer massa ($K_{L,a}$), sehingga difusi oksigen berlangsung lebih efisien (Li et al., 2024; Xiao & Xu, 2020).

Air yang telah melalui kolom JBC kemudian dialirkan menuju unit filtrasi berlapis. Integrasi ini memastikan bahwa proses aerasi intensif diikuti oleh tahap pemisahan partikulat dan adsorpsi kimia. Konfigurasi sistem secara keseluruhan ditampilkan pada Gambar 2, yang menunjukkan alur mulai dari kolam penampung awal, pompa, venturi injector, reaktor JBC, filtrasi berlapis, hingga bak penampung air olahan.



Gambar 2. Flow chart sistem jet bubble column (JBC)

Secara mekanistik, instalasi JBC bekerja melalui tiga proses simultan, yaitu aerasi mikrogelembung, *stripping*

amonia, dan turbulensi hidrodinamika. Aerasi mikrogelembung meningkatkan kadar *dissolved oxygen* (DO) secara cepat karena luas permukaan kontak gas-cair yang tinggi. Peningkatan DO dari 3,85 mg/L menjadi >5 mg/L menunjukkan pergeseran dari kondisi anaerob menuju aerob stabil, yang memungkinkan mikroorganisme aerob bekerja lebih efektif dalam menguraikan bahan organik.

Selain itu, turbulensi vertikal dalam kolom menciptakan proses *air stripping* terhadap senyawa volatil seperti amonia (NH_3). Pada pH 7,1–7,3, fraksi amonia bebas meningkat sehingga volatilitasnya lebih tinggi. Mikrogelembung berfungsi sebagai media transport gas yang membawa NH_3 keluar dari fase cair menuju fase gas. Mekanisme ini menjelaskan penurunan kadar amonia hingga 80–90% sebagaimana tercantum pada Tabel 1, dan konsisten dengan temuan Aprillia et al. (2025). Turbulensi dalam kolom juga menyebabkan fragmentasi flok organik besar menjadi agregat mikro yang lebih mudah disaring pada unit filtrasi. Dengan demikian, instalasi JBC tidak hanya meningkatkan oksigenasi, tetapi juga meningkatkan efisiensi tahap filtrasi berikutnya

Penerapan teknologi kolom gelembung pancaran merupakan inti dari program pengabdian ini karena tahap ini menentukan efektivitas peningkatan kualitas air limbah secara langsung. Proses implementasi diawali dengan perakitan unit kolom gelembung pancaran sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Unit dirakit menggunakan pipa PVC vertikal yang dirancang sebagai reaktor aerasi, dilengkapi dengan pompa, *nozzle*, serta venturi injector dengan variasi ukuran yang sebelumnya telah diuji secara eksperimental oleh Aprillia et al. (2025). Pemilihan konfigurasi tersebut didasarkan pada pertimbangan efisiensi pembentukan mikrogelembung dan kemampuan transfer massa oksigen. Desain alat juga disesuaikan dengan kapasitas kolam penampung limbah domestik pesantren yang mencapai $\pm 600 \text{ m}^3$, sehingga sistem mampu beroperasi tanpa memerlukan perubahan struktur utama kolam.



Gambar 3. Instalasi dan Uji trial and error unit kolom gelembung pancaran

Setelah unit terpasang, dilakukan tahap uji coba operasional (*trial and error*) untuk menentukan kondisi kerja yang paling optimal. Pengujian dilakukan dengan variasi laju alir udara yang berbeda guna mengevaluasi respons sistem terhadap peningkatan suplai oksigen. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan laju alir udara berbanding lurus dengan kenaikan nilai *dissolved oxygen* (DO) dalam fase cair. Namun demikian, apabila laju alir udara terlalu tinggi, stabilitas pembentukan mikrogelembung terganggu dan menghasilkan gelembung berukuran lebih besar yang cenderung naik lebih cepat ke permukaan sehingga menurunkan efisiensi transfer massa. Temuan ini konsisten dengan analisis hidrodinamika kolom gelembung yang dijelaskan oleh Nugroho (2025), di mana stabilitas ukuran gelembung menjadi faktor kunci dalam menentukan efektivitas aerasi.

Setelah diperoleh kondisi operasi yang stabil, sistem aerasi diintegrasikan dengan unit filtrasi berlapis yang terdiri atas pasir silika, zeolit, dan karbon aktif. Air yang telah mengalami proses aerasi intensif dialirkan menuju unit filtrasi sebagai tahap pemolesan akhir. Pasir silika berfungsi sebagai penyaring awal partikel tersuspensi, zeolit berperan dalam pertukaran ion khususnya untuk penyerapan amonium, sedangkan karbon aktif mengadsorpsi senyawa organik terlarut yang masih tersisa. Integrasi antara aerasi mikrogelembung dan filtrasi berlapis ini terbukti efektif menurunkan *total suspended solids* (TSS) dan tingkat kekeruhan secara signifikan. Kombinasi kedua proses tersebut menunjukkan pendekatan yang relatif sederhana namun efisien dan ekonomis untuk pengolahan air limbah domestik skala komunitas.

3.4 Analisis Perubahan Parametrik Kualitas Air

Monitoring kualitas air merupakan tahapan kunci dalam evaluasi keberhasilan implementasi teknologi *Jet Bubble Column* (JBC). Dalam pendekatan PAR, monitoring tidak hanya berfungsi sebagai kegiatan pengukuran rutin, tetapi juga sarana pembelajaran bagi santri untuk memahami keterkaitan antara parameter fisikokimia limbah domestik dengan performa sistem aerasi dan filtrasi. Proses monitoring dilakukan secara periodik selama empat minggu, dengan jadwal operasi JBC 8 jam per hari secara intermiten. Hal ini ditujukan untuk menjaga kestabilan transfer massa oksigen dan menghindari penumpukan gas inert akibat aerasi berlebihan.

Pengukuran dilakukan secara *in situ* pada titik sampling kolam penampungan utama. Parameter yang diukur meliputi pH, *Total Dissolved Solid* (TDS), *Dissolved Oxygen* (DO), amonia (NH₃), *Total Suspended Solid* (TSS), dan *turbidity*. Pemilihan parameter ini mengikuti standar pengolahan air limbah domestik berbasis *indicator-driven approach*, sebagaimana dianjurkan oleh KLHK (2025), karena keenam parameter tersebut mewakili kondisi kimia, fisik, biologis, dan keberhasilan filtrasi simultan.

Hasil monitoring perbandingan kondisi eksisting dan setelah treatment air menunjukkan perbaikan signifikan yang dapat ditampilkan pada Tabel 1:

Table 1: Tabel 1. Perbandingan Kondisi Eksisting dan Setelah Treatment

Parameter	Satuan	Kondisi Eksisting (Sebelum)	Setelah Treatment JBC	Baku Mutu*
pH	-	6,8-7,0	7,1-7,3	6-9
<i>Dissolved Oxygen</i> (DO)	mg/L	3,85	>5,0	≥4
<i>Total Dissolved Solid</i> (TDS)	mg/L	267	<233	-
Amonia (NH ₃)	mg/L	±30	☑ 80-90%	≤10
<i>Total Suspended Solid</i> (TSS)	mg/L	±50	☑ >50%	≤30
<i>Turbidity</i>	NTU	49,3	<1	≤5
Bau	-	Menyengat	Tidak berbau	-
Warna Visual	-	Keruh	Jernih	-

Hasil monitoring yang ditampilkan pada Tabel 1 menunjukkan peningkatan kualitas air yang signifikan. Nilai DO meningkat dari 3,85 mg/L menjadi lebih dari 5 mg/L, yang menandakan transisi dari kondisi anaerob menuju kondisi aerob stabil. Peningkatan ini memungkinkan aktivitas mikroorganisme aerob yang lebih efektif dalam menguraikan residu organik (Li et al., 2024).

Kadar amonia mengalami penurunan sebesar 80–90%. Penurunan ini terjadi melalui dua mekanisme utama, yaitu air stripping akibat turbulensi mikrogelembung dan adsorpsi ion amonium oleh zeolit. Pada pH 7,1–7,3, fraksi NH₃ bebas meningkat sehingga volatilitasnya lebih tinggi. Efektivitas ini sejalan dengan hasil penelitian Aprillia et al. (2025) mengenai kolom gelembung pancaran.

Nilai TSS menurun lebih dari 50% dan *turbidity* turun hingga kurang dari 1 NTU. Turbulensi vertikal dalam kolom menyebabkan pecahnya flok organik besar menjadi partikel mikro yang lebih mudah disaring pada media filtrasi. Kombinasi aerasi dan filtrasi ini sesuai dengan konsep pengolahan bertingkat yang dijelaskan oleh Tolkou dan Kyzas (2024).



Gambar 4. Visualisasi perbedaan warna air limbah domestik sebelum dan sesudah pengolahan

Secara visual, perbedaan warna air sebelum dan sesudah pengolahan terlihat jelas pada Gambar 4. Air yang

awalnya keruh pekat berubah menjadi jernih tanpa bau menyengat. Visualisasi ini memperkuat data kuantitatif dan memberikan validasi empiris terhadap efektivitas sistem.

3.5 Tahap Pendampingan dan Stabilitas Operasional

Tahap pendampingan dilakukan setelah sistem beroperasi secara penuh. Tim pengabdian dan santri bersama-sama memvalidasi hasil pengukuran, mendiskusikan dinamika operasional, dan menyusun strategi perbaikan. Dalam beberapa minggu awal, ditemukan hambatan seperti debit air berkurang akibat media filter mulai tersumbat. Bersama operator, dilakukan analisis dan tindakan *backwash* secara periodik setiap 10–14 hari. Praktik ini tidak diberikan sebagai instruksi luar, tetapi sebagai hasil refleksi bersama. Pendekatan ini merupakan prinsip inti PAR: komunitas bukan “penerima teknologi”, tetapi *co-researcher* yang memecahkan masalahnya sendiri.

Evaluasi juga menyentuh aspek disiplin operasional. Pada minggu pertama, santri lupa menghidupkan pompa sesuai jadwal. Hal tersebut menyebabkan fluktuasi DO harian. Masalah kemudian diselesaikan melalui pembagian tugas shift, pencatatan jam operasi, dan buku log kualitas air. Model ini selaras dengan temuan Li dan Zhang (Li et al., 2024) bahwa keberhasilan pengolahan air berbasis komunitas lebih bergantung pada konsistensi operasional dibanding kinerja perangkat.

Pendampingan juga menghasilkan perubahan perspektif. Santri mulai memandang kolam bukan sebagai limbah “tak bernilai”, tetapi sebagai sistem hidup yang memerlukan kontrol. Beberapa santri bahkan mengusulkan pemanfaatan air hasil olahan untuk penyiraman tanaman. Perubahan ini menandai meningkatnya *environmental ownership*, yaitu rasa memiliki terhadap teknologi dan dampaknya.

3.6 Integrasi Sosial dan Keberlanjutan

Tahap keberlanjutan merupakan fase paling strategis dalam keseluruhan program karena menentukan keberlangsungan sistem setelah proses pendampingan berakhir. Keberhasilan teknologi tidak hanya diukur dari peningkatan kualitas air, tetapi juga dari kemampuan komunitas mempertahankan fungsi sistem secara mandiri dalam jangka panjang. Model keberlanjutan dalam program ini dibangun melalui tiga mekanisme utama, yaitu pembentukan tim pengelola internal, penyusunan prosedur operasional standar (SOP), serta integrasi materi pengelolaan lingkungan ke dalam aktivitas pendidikan pesantren.

Tim pengelola internal dibentuk dengan melibatkan delapan hingga sepuluh santri yang didampingi oleh seorang guru pembimbing sebagai koordinator. Struktur organisasi ini dirancang menyerupai unit pengelola instalasi air skala kecil, sehingga setiap anggota memiliki peran dan tanggung jawab yang jelas. Pembagian fungsi mencakup operator unit JBC, petugas pengukuran parameter kualitas air, petugas perawatan media filtrasi, serta bagian dokumentasi dan pencatatan hasil monitoring. Struktur semacam ini penting untuk meminimalkan risiko hilangnya pengetahuan akibat rotasi santri setiap tahun. Dengan sistem pembagian tugas yang terdokumentasi, transfer pengetahuan dapat berlangsung secara berkelanjutan antar generasi santri, sejalan dengan temuan Li, Zhang, dan Chen (2021) yang menekankan bahwa keberhasilan teknologi berbasis komunitas sangat ditentukan oleh kesinambungan kapasitas pengelola.

Sebagai penguat sistem organisasi tersebut, disusun prosedur operasional standar yang rinci dan aplikatif. SOP mencakup ketentuan jam operasi JBC minimal delapan jam per hari, protokol pengukuran parameter kualitas air secara berkala, jadwal pencucian balik (*backwash*) media filtrasi setiap sepuluh hingga empat belas hari, prosedur penanganan anomali kualitas air apabila terjadi penyimpangan parameter, serta standar pencatatan dan pelaporan hasil monitoring. Dokumen ini berfungsi sebagai *institutional memory*, yang menjaga konsistensi operasional meskipun terjadi pergantian anggota tim pengelola. Dengan adanya SOP, sistem tidak bergantung pada individu tertentu, melainkan pada prosedur yang telah terstandar.

Keberlanjutan juga diperkuat melalui integrasi isu lingkungan ke dalam pembelajaran pesantren. Materi mengenai aerasi, filtrasi, kualitas air, dan sanitasi mulai dimasukkan dalam kegiatan pendidikan sehingga teknologi yang terpasang tidak berdiri sendiri sebagai perangkat teknis, tetapi menjadi bagian dari proses pembelajaran nilai dan praktik lingkungan. Pendekatan ini memberikan dimensi edukatif yang memperpanjang usia manfaat program, karena intervensi teknologi yang terintegrasi dengan pendidikan cenderung lebih bertahan dibandingkan intervensi yang hanya berbasis instalasi perangkat.

Dari sisi ekonomi, keberlanjutan sistem didukung oleh efisiensi penggunaan air bersih yang menghasilkan penghematan biaya PAM sekitar enam puluh hingga tujuh puluh persen per bulan. Penghematan ini memberikan insentif praktis yang nyata bagi pesantren, sehingga keberlanjutan tidak hanya didorong oleh kesadaran lingkungan, tetapi juga oleh manfaat finansial yang terukur. Sebagai langkah strategis ke depan, disusun pula peta jalan replikasi program ke pesantren lain dengan tiga tingkat kesiapan, yaitu tahap pasif, aktif, dan mandiri. Tahap mandiri, yang mencakup instalasi teknologi, pelatihan operasional, penerapan SOP, serta integrasi dalam kurikulum pendidikan, terbukti paling stabil karena menggabungkan faktor teknis dan sosial secara simultan. Model ini menunjukkan bahwa keberlanjutan sistem pengolahan air limbah domestik tidak hanya bergantung pada performa alat, tetapi

juga pada kekuatan struktur organisasi dan budaya lingkungan yang dibangun di dalam komunitas.

4. SIMPULAN

Penerapan teknologi *Jet Bubble Column* (JBC) pada pengolahan air limbah domestik di Pesantren Zaadul Ma'ad terbukti mampu meningkatkan kualitas air secara signifikan. Hasil pengukuran menunjukkan adanya peningkatan *dissolved oxygen* (DO) dari 3,85 mg/L menjadi lebih dari 5,0 mg/L, penurunan kadar amonia hingga 80–90%, penurunan *total suspended solids* (TSS) lebih dari 50%, serta penurunan *turbidity* dari 49,3 NTU menjadi kurang dari 1 NTU. Perbaikan ini mengindikasikan terjadinya peralihan kondisi air limbah dari lingkungan anaerob menuju kondisi aerob yang lebih stabil, sekaligus menunjukkan efektivitas kombinasi proses aerasi intensif berbasis mikrogelembung dan filtrasi berlapis dalam menurunkan beban pencemar utama limbah domestik.

Keberhasilan sistem JBC dalam meningkatkan kualitas air tidak hanya ditentukan oleh kinerja teknis reaktor, tetapi juga oleh keterlibatan aktif komunitas pesantren melalui pendekatan *Participatory Action Research* (PAR). Pelibatan santri dalam proses sosialisasi, pelatihan operasional, instalasi sistem, serta monitoring kualitas air telah membentuk kapasitas pengelolaan internal yang berkelanjutan. Pembentukan tim operator internal dan penyusunan prosedur operasional standar (SOP) menjadi faktor penting dalam menjaga keberlangsungan operasional sistem setelah kegiatan pengabdian selesai dilaksanakan.

Dari aspek lingkungan dan pemanfaatan sumber daya, air hasil olahan dari sistem JBC dapat dimanfaatkan kembali untuk kebutuhan non-konsumsi, seperti penyiraman tanaman dan kebersihan lingkungan pesantren. Hal ini tidak hanya mendukung konservasi air bersih, tetapi juga memberikan nilai tambah ekonomi melalui pengurangan kebutuhan air dari sumber eksternal. Dengan demikian, sistem JBC tidak hanya berfungsi sebagai teknologi pengolahan limbah, tetapi juga sebagai bagian dari strategi pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan di lingkungan pesantren.

Secara keseluruhan, teknologi *Jet Bubble Column* (JBC) layak direkomendasikan sebagai solusi pengolahan air limbah domestik skala komunitas yang efektif, efisien, dan mudah dioperasikan. Model penerapan berbasis partisipatif yang dikembangkan dalam kegiatan ini juga berpotensi direplikasi pada pesantren dan institusi pendidikan berbasis asrama lainnya. Ke depan, pengembangan sistem dapat diarahkan pada optimasi desain reaktor, integrasi dengan proses biologis lanjutan, serta perluasan pemanfaatan air hasil olahan untuk mendukung konsep *circular water management* secara lebih luas.

PERSANTUNAN

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset Dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, Dan Teknologi, atas dukungan pendanaan skema Pemberdayaan Berbasis Masyarakat, Politeknik Negeri Sriwijaya, serta Pesantren Zaadul Ma'ad Palembang atas kerja sama dalam pelaksanaan program ini.

Conflict of Interest

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam publikasi artikel ini.

PENDANAAN

Sumber pendanaan Direktorat Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset Dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, Dan Teknologi, atas dukungan pendanaan skema Pemberdayaan Berbasis Masyarakat.

REFERENSI

- Aghalari, Z., Dahms, H.-U., Sillanpää, M., Sosa-Hernandez, J. E., & Parra-Saldívar, R. (2020). Effectiveness of wastewater treatment systems in removing microbial agents: a systematic review. *Globalization and Health*, 16(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12992-020-0546-y>
- Aprilia, V., Muhammad Zaman, & Didiek Hari Nugroho. (2025). Pengurangan Kadar Amonia Dalam Limbah Cair Industri Menggunakan Kolom Gelembung Pncaran Dengan Penambahan Solvent KOH. *Jurnal Redoks*, 10(1), 39–48. <https://doi.org/10.31851/redoks.v10i1.16641>
- Brontowiyono, W., Boving, T., Asmara, A. A., Rahmawati, S., Yulianto, A., Wantoputri, N. I., Lathifah, A. N., & Andriansyah, Y. (2022). Communal Wastewater Treatment Plants' Effectiveness, Management, and Quality of Groundwater: A Case Study in Indonesia. *Water*, 14(19), 3047. <https://doi.org/10.3390/w14193047>
- Edokpayi, J. N., Odiyo, J. O., Popoola, O. E., & Msagati, T. A. M. (2021). Evaluation of contaminants removal by waste stabilization ponds: A case study of Siloam WSPs in Vhembe District, South Africa. *Heliyon*, 7(2), e06207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06207>
- Inkeri, E., & Tynjälä, T. (2020). Modeling of CO2 Capture with Water Bubble Column Reactor. *Energies*, 13(21), 5793. <https://doi.org/10.3390/en13215793>
- Li, X., Zhang, X., Zhao, M., Zheng, X., Wang, Z., & Fan, C. (2024). Application of Decentralized Wastewater Treatment Technology in Rural Domestic Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16(19), 8635. <https://doi.org/10.3390/su16198635>
- Majhool, A. K., Sukkar, K. A., Alsaffar, M. A., & Majdi, H. S. (2023). Integrated Process for High Phenol Removal from Wastewater Employing a ZnO Nanocatalyst in an Ozonation Reaction in a Packed Bubble Column Reactor. *ChemEngineering*, 7(6), 112. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7060112>
- Nugroho, D. H. (2025). Teknologi Pengolahan Limbah Cair Industri. In Afridon (Ed.), *Teknologi Pengelolaan Lingkungan* (pp. 39–58). HEI Publishing.
- Papadaki, M., Ntougias, S., Frontistis, Z., & Mantzavinos, D. (2024). Photocatalytic Oxidation Process for Petroleum Wastewater Treatment and The Possibility of Using Tapered Bubble Column (TBC): A Review. *Global NEST Journal*. <https://doi.org/10.30955/gnj.005681>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan (Permen LHK), Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia 1 (2025).
- Saif, Y., Ali, M., Jones, I. M., & Ahmed, S. (2021). Performance Evaluation of a Field-Scale Anaerobic Baffled Reactor as an Economic and Sustainable Solution for Domestic Wastewater Treatment. *Sustainability*, 13(18), 10461. <https://doi.org/10.3390/su131810461>
- Tolkou, A. K., & Kyzas, G. Z. (2024). Advanced Technologies of Water and Wastewater Treatment. *Environments*, 11(12), 270. <https://doi.org/10.3390/environments11120270>
- Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Voicu, G. (2020). Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055. <https://doi.org/10.3390/su12219055>
- Xiao, W., & Xu, G. (2020). Mass transfer of nanobubble aeration and its effect on biofilm growth: Microbial activity and structural properties. *Science of The Total Environment*, 703, 134976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134976>
- Yulistyorini, A., Camargo-Valero, M., Sukarni, S., Suryoputro, N., Mujiyono, M., Santoso, H., & Tri Rahayu, E. (2019). Performance of Anaerobic Baffled Reactor for Decentralized Wastewater Treatment in Urban Malang, Indonesia. *Processes*, 7(4), 184. <https://doi.org/10.3390/pr7040184>