

Bioproses Penyisihan Amonia Pada Air Baku Instalasi Pengolahan Air Cilandak oleh Konsorsium Bakteri Endogenus dan Eksogenus (Skala Laboratorium)

Ibnu Hasan Sunandar^{1*}, Sandra Maddona², Nani Radiastuti³

¹Program Studi Penjamin Mutu Industri Pangan, Politeknik AKA Bogor, Jl Pangeran Sogiri No. 283, Tanah Baru, Bogor Utara, Jawa Barat, 16154, Indonesia

²Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie, Jl. H.R Rasuna Said Kav C-22, Jakarta Selatan, DKI Jakarta, 12920, Indonesia

³Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Jakarta, Jl. Lkr. Kampus 1, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

*E-mail: Ibnu.sunandar@kemenperin.go.id

(Received : 11 Mei 2024; Accepted: 10 April 2025; Published: 31 Juli 2025)

Abstrak

Pencemaran amonia di Sungai Krukut, yang menjadi sumber air baku Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAL) Cilandak, menimbulkan tantangan besar dalam menjaga kualitas air. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi penyisihan amonia menggunakan konsorsium bakteri endogenus dari Sungai Krukut dan bakteri eksogenus dari koleksi Sekolah Ilmu Teknologi Hayati ITB. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan dua perlakuan utama selama 72 jam. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan dengan bakteri eksogenus menghasilkan efisiensi penyisihan amonia tertinggi, yaitu 20,17%, sedangkan konsorsium bakteri endogenus mencapai efisiensi 7,9%. Analisis statistik menunjukkan bahwa perbedaan antara kedua perlakuan tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$). Kedua konsorsium bakteri mampu tumbuh dalam lingkungan air baku dengan parameter kualitas air yang masih melebihi baku mutu yang ditetapkan. Temuan ini menggarisbawahi potensi penggunaan konsorsium bakteri, terutama bakteri eksogenus, untuk meningkatkan kualitas air baku melalui penyisihan amonia secara biologis. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pengolahan air yang ramah lingkungan dan efektif untuk mengatasi pencemaran amonia di sumber air baku.

Kata kunci: Amonia; Bioproses; Instalansi Pengolahan Air; Nitrifikasi; Sungai Krukut

Abstract

Ammonia pollution in the Krukut River, which serves as the source of raw water for the Cilandak Drinking Water Treatment Plant (IPAL), presents a significant challenge in maintaining water quality. This research aims to evaluate the efficiency of ammonia removal using an endogenous bacterial consortium from the Krukut River and an exogenous bacterial consortium from the collection of the School of Life Sciences and Technology, Bandung Institute of Technology (ITB). The research was conducted on a laboratory scale with two main treatments over a 72-hour period. The results showed that treatment with exogenous bacteria produced the highest ammonia removal efficiency at 20.17%, while the endogenous bacterial consortium achieved an efficiency of 7.9%. Statistical analysis indicated that the difference between the two treatments was not statistically significant ($p > 0.05$). Both bacterial consortia were able to grow in the raw water environment with water quality parameters that still exceeded the established quality standards. These findings underscore the potential of using bacterial consortia, particularly exogenous bacteria, to improve raw water quality through biological ammonia removal. This research contributes to the development of environmentally friendly and effective water treatment methods to address ammonia pollution in raw water sources.

Keywords: Amonia; Bioprocess; Installation of Water Drinking Processing; Nitrification; Krukut River

PENDAHULUAN

Kualitas air baku yang digunakan untuk instalasi pengolahan air minum di daerah perkotaan menghadapi tantangan yang semakin kompleks. Di Jakarta, data menunjukkan bahwa kualitas air baku yang masuk ke Instalasi Pengolahan Air Cilandak mengalami penurunan signifikan, menyebabkan peningkatan biaya produksi air bersih (Said et al., 2001). Berbagai metode pengolahan air telah dikembangkan untuk mengatasi masalah penurunan kualitas air, namun pendekatan biologis semakin mendapat perhatian karena sifatnya yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Zhang et al. (2022) menunjukkan bahwa pendekatan biologis menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi dan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional.

Salah satu kontaminan yang menjadi perhatian utama adalah amonia. Berdasarkan hasil pemantauan yang dilakukan oleh PDAM PALYJA Jakarta pada September 2020, konsentrasi amonia di air baku Instalasi Pengolahan Air Cilandak telah mencapai 2,0 mg/L. Angka ini jauh melampaui ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001, yang menetapkan batas maksimum amonia untuk air baku air minum sebesar 0,05 mg/L. Tingginya konsentrasi amonia ini menimbulkan kekhawatiran serius karena penelitian Wang et al. (2020) membuktikan bahwa amonia dalam air minum berpotensi membentuk senyawa disinfeksi yang bersifat karsinogenik.

Studi terkini mengenai penyisihan amonia secara biologis menunjukkan perkembangan yang signifikan. Liu et al. (2023) membuktikan bahwa bioproses nitrifikasi dengan konsorsium bakteri dapat mencapai efisiensi penyisihan amonia hingga 78% dalam kondisi operasional yang optimal. Keerthana dan Ganesan (2021) membandingkan kemampuan *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. dalam mengoksidasi amonia, menemukan bahwa kombinasi kedua bakteri tersebut menghasilkan efisiensi penyisihan yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan masing-masing bakteri secara terpisah.

Huang et al. (2021) mengidentifikasi bahwa *Nitrosomonas europaea* memiliki kapasitas yang tinggi dalam mengoksidasi amonia menjadi nitrit, dengan efisiensi mencapai 85% pada kondisi pH 7,5-8,0 dan suhu 28-32°C. Singh dan Gulati (2022) melakukan penelitian mendalam tentang mekanisme asimilasi amonia pada berbagai jenis bakteri dan menemukan bahwa efektivitas proses nitrifikasi sangat dipengaruhi oleh ketersediaan oksigen, suhu, dan pH.

Tian dan Xin (2021) mempelajari signifikansi proses nitrifikasi dalam siklus biogeokimia nitrogen, menekankan pentingnya pemahaman mendalam tentang dinamika populasi bakteri nitrifikasi dalam sistem pengolahan air. Studi terbaru oleh Garcia-Jimenez et al. (2023) mendemonstrasikan bahwa konsorsium bakteri

alami (endogenus) yang diaklimatisasi dengan kondisi lingkungan spesifik dapat menunjukkan performa yang sebanding dengan konsorsium bakteri yang dikembangkan di laboratorium (eksogenus).

Meskipun sejumlah penelitian telah dilakukan terkait pengolahan air secara biologis, masih terdapat kesenjangan pengetahuan mengenai efektivitas perbandingan antara konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus, terutama dalam konteks spesifik air baku di Indonesia. Optimalisasi kondisi lingkungan, durasi pengolahan, dan aplikasi praktis di lapangan masih memerlukan kajian lebih lanjut. Pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan bioproses sangat penting untuk mengembangkan solusi yang efektif dan ekonomis dalam mengatasi masalah pencemaran amonia.

Berdasarkan kesenjangan pengetahuan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi bioproses dalam penyisihan amonia pada air baku Instalasi Pengolahan Air Minum Cilandak dengan menggunakan dua jenis konsorsium bakteri: konsorsium bakteri endogenus dari Sungai Krukut dan konsorsium bakteri eksogenus yang terdiri dari *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. Melalui pendekatan eksperimental dalam skala laboratorium dengan durasi inkubasi 72 jam, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan data komprehensif tentang efisiensi penyisihan amonia dan kondisi lingkungan optimal bagi pertumbuhan bakteri nitrifikasi. Temuan ini akan memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi pengolahan air yang lebih efektif, berkelanjutan, dan ekonomis untuk mengatasi permasalahan pencemaran amonia di sumber air baku.

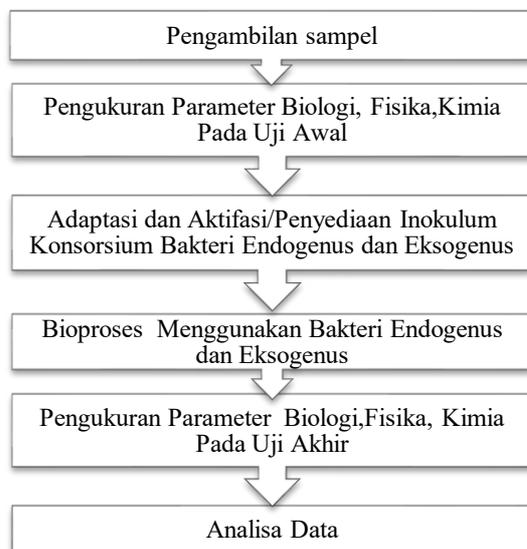
METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mikrobiologi PDAM PAM JAYA selama periode Agustus hingga September 2022. Pengambilan sampel air baku dilakukan di Instalasi Pengolahan Air Cilandak PDAM PAM JAYA. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi efektivitas dua jenis konsorsium bakteri dalam proses penyisihan amonia.

Alat yang digunakan diantaranya autoklaf (Gilson P200), *incubator* (Mammert), *coolbox* (kotak es), thermometer, 3 erlenmeyer 500 ml, botol sampel air, pipet makro otomatis Socorex 0,5-5 ml, pipet mikro eppendorf 50-100 ml, *hot plate* dan *stirrer* (Nuova), timbangan analitik, gelas ukur 10 ml, gelas beaker 100 ml, 30 cawan petri, 8 tabung reaksi pyrex bertutup ulir, 12 botol *winkler* dan spektrofotometer UV-VIS Shimadzu Ultraviolet-Visible Spectrophotometer UV1280 Ipc, DO meter (Lutron D-100) dan turbidimeter (HACH 2100 N).

Penelitian ini memanfaatkan dua jenis konsorsium bakteri yang berbeda. Konsorsium pertama adalah bakteri endogenus yang diisolasi langsung dari air Sungai Krukut, yang terdiri dari beragam bakteri indigenous termasuk *Nitrosomonas* sp., *Nitrobacter* sp., *E. coli*, *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris*, dan *Clostridium tetani*. Konsorsium kedua adalah bakteri eksogenus yang diperoleh dari koleksi Laboratorium Mikrobiologi Institut Teknologi Bandung, yang secara spesifik terdiri dari bakteri nitrifikasi *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. Kombinasi spesies yang tepat dari kedua genus ini sering digunakan dalam aplikasi pengolahan air limbah untuk mencapai nitrifikasi yang optimal, dengan mempertimbangkan faktor-faktor lingkungan seperti konsentrasi amonia, pH, dan suhu. Pemilihan kedua konsorsium ini didasarkan pada kemampuan spesifik mereka dalam proses nitrifikasi dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan lokal. Media bakteri NA dan NB, larutan induk ammonium, larutan fenol, natrium sulfat. Larutan Fenol, Larutan Natrium Nitroprusida, Larutan Pengoksidasi, Parafin K₂Cr₂O₇ (Kalium Dikromat), Reagen AgSO₄-H₂SO₄ (Perak Sulfat - Asam Sulfat), Indikator Feroin Larutan Fe(NH₄)₂(SO₄)₂ (Ferro Amonium Sulfat).

Tahap-tahap penelitian ini digambarkan pada diagram alir sebagai berikut ini:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pengambilan Sampel (SNI-06-2412.1991)

Pengambilan sampel air baku dilakukan secara langsung komposit yaitu dengan cara mengambil beberapa sampel air baku secara langsung dari *raw sampling* Instalasi Pengolahan Air Cilandak dengan menggunakan botol *winkler* di beberapa 4 titik sampel pada kedalaman yang berbeda.

Adaptasi dan Aktivasi

Sebelum menguji kemampuan penyisihan amonia pada perlakuan penambahan konsorsium

bakteri endogenus dan eksogenus, bakteri tersebut perlu diaktivasi dan diadaptasi terlebih dahulu pada medium pertumbuhan. Medium pertumbuhan dimulai dengan Inokulum bakteri endogenus dibuat dengan air baku yang berasal dari sungai krukut 0,75 ml ke dalam 75 ml medium NB steril, kemudian dishaker dengan kecepatan 180 rpm diinkubasi selama 24 jam pada suhu kamar. Sementara itu itu inokulum bakteri eksogenus dibuat dengan inokulasi 0,75 ml konsorsium bakteri eksogenus yang berasal Sekolah Ilmu Teknologi Hayati ITB kedalam 75 ml, kemudian dishaker dengan kecepatan 180 rpm diinkubasi selama 24 jam suhu kamar.

Bioproses Penyisihan Amonia oleh Konsorsium Bakteri Endogenus dan Eksogenus

Bioproses penyisihan amonia dilakukan menggunakan konsorsium bakteri endogenus (K.BEN) dan eksogenus (K.BEK) dalam dua erlenmeyer. Inokulan 1% dari setiap konsorsium ditambahkan ke dalam erlenmeyer, lalu dishaker pada 180 rpm selama 72 jam untuk memastikan distribusi oksigen dan nutrisi yang optimal bagi pertumbuhan bakteri.

Sampel dari setiap erlenmeyer kemudian diinokulasikan ke media Nutrient Agar (NA) dalam cawan petri dan diinkubasi pada suhu kamar selama 24 jam. Populasi bakteri dihitung menggunakan metode Total Plate Count (TPC) yang meliputi pengenceran sampel secara seri, penyebaran pada media NA, inkubasi, dan penghitungan koloni yang terbentuk. Jumlah koloni dinyatakan sebagai Colony Forming Units (CFU) per ml atau gram sampel.

Metode TPC memungkinkan penentuan jumlah bakteri yang berperan dalam proses penyisihan amonia dan evaluasi efektivitas konsorsium bakteri. Meski memiliki keterbatasan, TPC merupakan metode yang umum dan dapat diandalkan untuk menghitung populasi bakteri dalam pengolahan air limbah.

Hasil TPC dapat memberikan informasi tentang dinamika pertumbuhan bakteri, efektivitas konsorsium, dan digunakan untuk optimasi proses penyisihan amonia. Bioproses ini berpotensi menjadi alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis dalam pengolahan air limbah, namun memerlukan pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan aktivitas konsorsium bakteri, serta pemantauan berkala menggunakan metode yang tepat.

Jumlah Populasi Bakteri

Menghitung jumlah populasi konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus dengan

menggunakan metode pengenceran dan *plate count.*, lalu dinkubasi selama 24 jam pada suhu kamar. Setelah 24 jam koloni dihitung untuk mengetahui jumlah sel perkoloni/ml pada jam ke 0 jam, 24 jam, 48 jam dan 72 jam.

Analisis Parameter Kimia

Amonia (SNI 06-6989.30.2005)

Analisa amonia digunakan untuk mengetahui konsentrasi amonia dalam sampel air baku. Sampel air baku sebanyak 25 ml ke dalam erlenmeyer 25 ml. Kemudian ditambahkan 1 ml larutan Fenol ditambahkan ke dalam erlenmeyer selanjutnya ditambahkan ke dalam 1 ml larutan natrium nitroprusida dan dihomogenkan kembali larutan pengoksidasi ditambahkan 2,5 ml dihomogenkan. Selanjutnya dengan cara menutup Erlenmeyer dengan paraffin. Setelah itu dibiarkan selama 1 jam untuk membentuk warna biru. Absorbansi diukur pada spektrofotometer dengan panjang gelombang 640 nm. Kemudian dihitung efisiensi penurunan amonia sesuai dengan rumus dibawah ini :

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{kadar awal} - \text{kadar akhir}}{\text{kadar awal}} \quad (1)$$

BOD₅ (SNI 6989.72.2009)

Analisis BOD (Biochemical Oxygen Demand) digunakan untuk menentukan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam air. Prosedur penentuan BOD meliputi pengenceran sampel air jika diperlukan, pengisian botol BOD dengan sampel yang telah diencerkan, pengukuran oksigen terlarut pada hari ke-0, inkubasi botol pada suhu 20°C selama 5 hari tanpa cahaya, dan pengukuran oksigen terlarut kembali pada hari ke-5.

Nilai BOD dihitung berdasarkan selisih konsentrasi oksigen terlarut awal dan akhir, dengan memperhitungkan faktor pengenceran dan koreksi dari blanko. Larutan standar glukosa-asam glutamat digunakan sebagai kontrol untuk memastikan validitas hasil pengukuran.

BOD menunjukkan banyaknya oksigen yang dikonsumsi mikroorganisme untuk mendegradasi bahan organik dalam sampel selama periode 5 hari pada kondisi yang terkontrol. Semakin tinggi nilai BOD, semakin besar beban bahan organik dalam air dan semakin rendah kualitas air tersebut.

COD (SNI 6989.72.2009)

Analisis Chemical Oxygen Demand (COD) dilakukan melalui metode titrasi dengan prosedur sebagai berikut: Sejumlah 20,0 mL air sampel dipipet dan dimasukkan ke dalam labu refluks. Kemudian ditambahkan 10,0 mL K₂Cr₂O₇ dan dicampurkan dengan reagen Ag₂SO₄-H₂SO₄. Campuran larutan dikocok menggunakan vorteks, selanjutnya dilakukan proses refluks selama 1,5 jam. Setelah proses refluks selesai, sampel ditambahkan indikator ferroin dan dititrasi dengan

larutan Fe(NH₄)₂(SO₄)₂ hingga terjadi perubahan warna dari biru kehijauan menjadi merah bata.

DO (SNI 6869.72.2009)

Analisa oksigen terlarut dilakukan dengan menggunakan alat DO meter. Pengukuran oksigen terlarut dimulai dengan mencelupkan elektroda kedalam sampel air baku. Pembacaan nilai DO diambil setelah angka digital muncul dalam keadaan stabil.

pH (SNI 06-6989.11.2004)

Analisa pH dilakukan dengan menggunakan alat pH meter untuk mengukur keasaman pada sampel air. Pengukuran pH dimulai dengan mencelupkan Elektroda ke dalam sampel sampai tergenang elektrodanya. Pembacaan nilai pH diambil setelah angka digital muncul dalam keadaan stabil

Analisis Parameter Fisika

Analisis Kekeruhan (SNI 06-6989.23.2005)

Analisa kekeruhan dilakukan menggunakan alat turbidimeter (HACH 2100 N). Sampel dimasukkan ke dalam kuvet kemudian diukur dengan turbidimeter. Pembacaan nilai turbiditas diambil setelah angka digital muncul dalam keadaan yang stabil).

Analisis Temperatur (SNI 06-6989.23.2005)

Suhu air diukur dengan termometer dengan mencelupkan termometer ke dalam sampel pada ke dalam 10 cm selama 2 menit dan catat sesuai dengan angka yang tertera pada termometer. Suhu air di ukur setiap 3 kali pada waktu 0 jam, 24 jam, 48 jam, 72 jam.

Analisa Data

Analisis statistik dilakukan menggunakan software SPSS versi 17 dengan metode uji t independen pada tingkat signifikansi $\alpha = 5\%$. Analisis ini diterapkan pada seluruh parameter yang diukur untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan antara kedua perlakuan konsorsium bakteri. Data yang diperoleh dianalisis secara komprehensif untuk menilai efektivitas masing-masing konsorsium dalam proses penyisihan amonia serta pengaruhnya terhadap parameter kualitas air lainnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bioproses Penyisihan Amonia

Bioproses penyisihan amonia dalam penelitian ini dilakukan selama 72 jam dengan 2 perlakuan yaitu penambahan konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus. Konsorsium bakteri endogenus yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sungai krukut. Penelitian Said *et al.* (2014), Penelitian yang tentang Penghilangan Amonia di dalam Air Baku Air Minum dengan Proses Biofilter Tercelep Menggunakan Media Plastik Sarang Tawon berhasil mengisolasi dan mengidentifikasi konsorsium bakteri endogenus yang berasal dari

Sungai Krukut. Konsorsium bakteri tersebut terdiri dari beberapa jenis, yaitu *Nitrosomonas* sp.,

Nitrobacter sp., *E. coli*, *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris*, dan *Clostridium tetani*.

Tabel 1. Penyisihan konsentrasi amonia pada masing-masing perlakuan Penambahan konsorsium Bakteri endogenus (K.BEN) dan eksogenus (K.BEK) selama bioproses

Parameter	Sebelum	K.BEN	K.BEK	Baku Mutu
Amonia (mg/L)	11,30	10,04	9,0	0,05
Populasi Bakteri (sel/mL)	57 x 10 ⁴	250 x 10 ⁴	290 x 10 ⁴	-
pH	7,5	6,2	6,1	6-9
DO (mg/L)	11,20	6,57	6,97	6
COD (mg/L)	383,2	186,66	147,88	10
BOD (mg/L)	58	12,23	13,21	2
Suhu (°C)	26,1	28,49	32,79	deviasi 3
Turbidity (NTU)	55,6	36,3	27	-

Pada Tabel 1 menunjukkan telah terjadi penurunan amonia yang diikuti oleh kenaikan pertumbuhan jumlah populasi bakteri pada konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus. Kenaikan pertumbuhan jumlah bakteri ini disebabkan bakteri yang ada pada media uji telah menggunakan amonia sebagai sumber energi. Menurut penelitian Singh *et al.* (2022). Amonia merupakan sumber nitrogen yang penting bagi pertumbuhan bakteri, termasuk bakteri nitrifikasi, yang menggunakan amonia sebagai sumber energi dalam proses metabolismenya. Pertumbuhan jumlah populasi bakteri pada konsorsium endogenus dan eksogenus ini juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan bakteri tersebut. Dalam penelitian terjadi dengan penurunan nilai parameter pH dan DO serta peningkatan suhu pada masing-masing perlakuan.

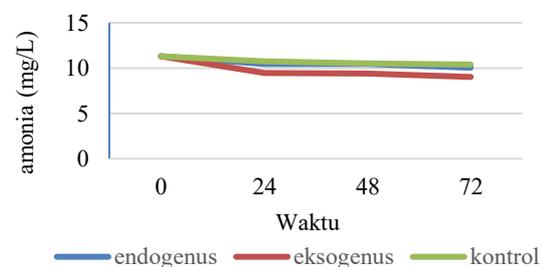
Penelitian Bertrand *et al.* (2019) menunjukkan bahwa aktivitas metabolisme bakteri dalam sistem akuatik dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara beberapa parameter lingkungan, termasuk oksigen terlarut (DO), pH, ketersediaan nutrisi, dan suhu. Penurunan konsentrasi DO dapat meningkatkan aktivitas bakteri anaerobik, sementara pH yang optimal mendukung pertumbuhan dan fungsi enzim bakteri. Ketersediaan nutrisi, terutama sumber karbon dan nitrogen, sangat penting untuk metabolisme dan pertumbuhan bakteri. Selain itu, peningkatan suhu dalam kisaran tertentu dapat mempercepat reaksi biokimia dan meningkatkan laju metabolisme bakteri. Namun, efek gabungan dari perubahan parameter ini pada aktivitas bakteri dapat bervariasi tergantung pada jenis bakteri dan kondisi lingkungan spesifik.

Penyisihan Amonia dan Pertumbuhan Jumlah Populasi Bakteri

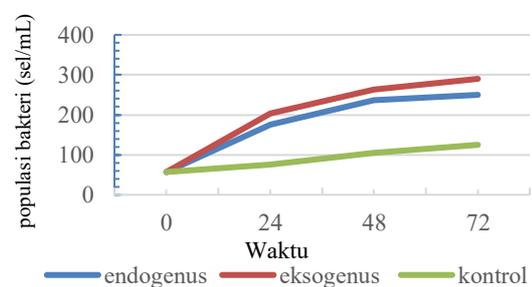
Konsentrasi rata-rata amonia sebelum perlakuan sebesar 11,30 mg/L dan jumlah rata-rata populasi bakteri sebesar 57 x 10⁴ (Tabel 1). Selama bioproses pada perlakuan penambahan konsorsium endogenus dan eksogenus maupun kontrol mengalami penurunan konsentrasi amonia dan meningkatnya jumlah populasi bakteri. Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukan

telah terjadinya bioproses selama 72 jam pada penelitian ini. Menurut Fatma *et al.* (2023), yang menyatakan hasil bahwa bakteri nitrifikasi *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. memiliki efektivitas yang signifikan dalam menurunkan kadar amonia, dengan kemampuan optimal dalam proses penyisihan amonia selama periode 72 jam.

Penyisihan konsentrasi amonia pada perlakuan penambahan konsorsium endogenus dan eksogenus disebabkan oleh adanya aktivitas bakteri nitrifikasi didalam sampel air baku yang dapat menguraikan amonia. Menurut Liu *et al.* (2023), Bakteri nitrifikasi mampu mengkonversi amonia dalam air baku menjadi nitrit dan nitrat melalui proses nitrifikasi, di mana amonia digunakan sebagai sumber energi untuk pertumbuhan dan aktivitas metabolisme bakteri tersebut.



Gambar 2. Amonia Selama Bioproses



Gambar 3. Populasi Bakteri Rata-Rata Selama Bioproses

Gambar 2 diketahui pada akhir pengamatan bioproses jam ke-72 terjadi penyisihan rata-rata amonia terjadi paling besar pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenus yaitu sebesar 9,02 mg/L sedangkan pada perlakuan

konsorsium bakteri endogenus sebesar 10,04 mg/L. Hal ini dikarenakan amonia dimanfaatkan sebagai sumber energi lebih tinggi pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenus yang mayoritasnya terdiri bakteri *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. Menurut Keerthana *et al.* (2021) bakteri *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. menunjukkan kemampuan yang lebih tinggi dalam memanfaatkan amonia sebagai sumber energi dibandingkan dengan jenis bakteri nitrifikasi lainnya. Namun, perbedaan jumlah populasi antara kedua jenis bakteri ini seringkali tidak signifikan dalam berbagai kondisi lingkungan.

Perbedaan nilai konsentrasi amonia akhir pada akhir pengamatan pada semua perlakuan masih melebihi baku mutu PP No 82 Tahun 2001 tentang kualitas dan pengendalian pencemaran air yaitu sebesar 0,05 mg/L. Hal ini dikarenakan waktu pengamatan yang singkat.

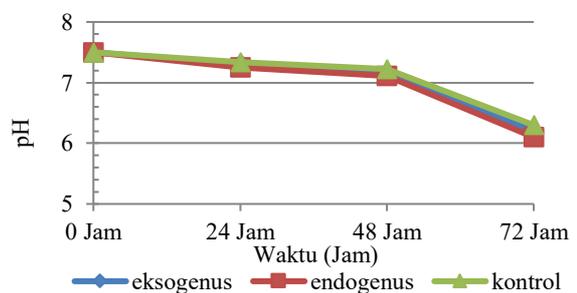
Penyisihan amonia selama bioproses diikuti oleh penambahan rata-rata jumlah populasi bakteri yang terlihat pada Gambar 3. Pada jam ke-24 pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus sebesar 176×10^4 sel/mL dan pada perlakuan konsorsium bakteri eksogenus 203×10^4 sel/mL. Pada kedua konsorsium bakteri terjadi kenaikan jumlah rata-rata populasi bakteri pada awal bioproses. Menurut Bertrand *et al.* (2019) Fenomena ini kemungkinan terjadi karena bakteri sedang mengalami fase lag, yaitu periode penyesuaian diri terhadap substrat baru dan kondisi lingkungan yang berbeda dari sebelumnya. Selama fase ini, bakteri melakukan adaptasi metabolisme dan fisiologis untuk mengoptimalkan pertumbuhan dan aktivitasnya dalam lingkungan yang baru. Pada akhir bioproses jam ke-72 masih terjadi penambahan rata-rata jumlah populasi bakteri sangat tajam oleh konsorsium bakteri endogenus sebesar 250×10^4 sel/mL dan oleh konsorsium bakteri eksogenus sebesar 290×10^4 sel/mL. Pada kedua konsorsium bakteri tersebut mengalami kenaikan jumlah populasi bakteri yang telah memasuki fase pertumbuhan logaritmik yang ditandai pertumbuhan yang cepat dan konstan. Penjelasan tersebut didukung penelitian keene *et al.* (2020) menunjukkan bahwa tingginya konsentrasi amonia dalam lingkungan dapat mempercepat pertumbuhan dan pembelahan sel pada berbagai jenis bakteri, terutama bakteri nitrifikasi yang mampu mengoksidasi amonia menjadi nitrit dan nitrat. Amonia berfungsi sebagai sumber energi dan nitrogen yang mudah diakses bagi bakteri ini, mendukung sintesis komponen seluler yang penting, seperti protein dan asam nukleat. Ketika amonia tersedia dalam jumlah yang melimpah, bakteri dapat mempertahankan laju pertumbuhan yang tinggi dan konstan sampai faktor pembatas lain seperti ketersediaan oksigen atau ruang, menjadi kendala.

Perbedaan efisiensi penyisihan amonia antara konsorsium bakteri eksogenus (20,17%) dan endogenus (7,9%) memerlukan interpretasi yang lebih komprehensif dalam konteks karakteristik mikroorganisme dan kondisi lingkungan eksperimen. Meskipun konsorsium bakteri eksogenus menunjukkan efisiensi penyisihan amonia yang secara numerik lebih tinggi, analisis statistik mengungkapkan bahwa perbedaan ini tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui beberapa perspektif teoretis dan praktis.

Pertama, komposisi konsorsium bakteri endogenus yang kompleks dan beragam perlu dipertimbangkan. Konsorsium bakteri endogenus dari Sungai Krukut tidak hanya terdiri dari bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp.) tetapi juga mengandung berbagai spesies bakteri lain seperti *E. coli*, *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris*, dan *Clostridium tetani*. Keberagaman ini menciptakan dinamika interaksi mikroorganisme yang kompleks, di mana beberapa spesies mungkin berkompetisi untuk substrat atau bahkan menghambat aktivitas bakteri nitrifikasi. Sementara itu, konsorsium bakteri eksogenus yang terdiri dari kultur murni *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. seharusnya secara teoretis lebih efisien dalam proses nitrifikasi karena kekhususan metabolismenya. Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa keunggulan ini tidak terwujud secara signifikan dalam kondisi eksperimental yang diterapkan.

Derajat Keasaman (pH)

Nilai pH pada masing-masing perlakuan selama bioproses mengalami penurunan. Pada pengamatan perlakuan penambahan konsorsium eksogenus, pH awal 7,5 turun hingga 6,1. Pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus, pH awal 7,5 mengalami penurunan hingga 6,2. Sementara itu, pH awal kontrol yang mulanya 7,5 mengalami penurunan hingga 6,3 (Gambar 4).



Gambar 4. pH Selama Bioproses

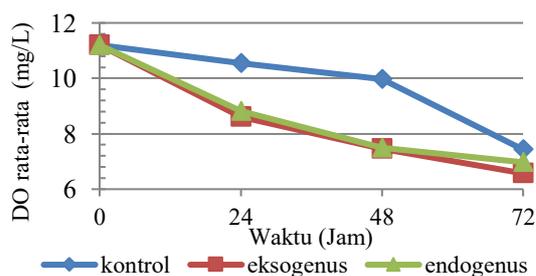
Penurunan nilai pH tersebut diduga terjadi karena adanya proses respirasi bakteri yang menghasilkan produk akhir yaitu CO_2 dan H_2O . Menurut penelitian Gua *et al.* (2022), reaksi antara karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O) akan menghasilkan asam karbonat (H_2CO_3), yang

merupakan molekul penting dalam sistem kesetimbangan karbonat di alam. Menurut Duarte *et al.* (2013). Penurunan nilai pH dalam air tidak hanya dipengaruhi oleh reaksi kimia, tetapi juga oleh berbagai faktor lingkungan dan biologis. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa suhu, keberadaan ion-ion terlarut, dan aktivitas metabolisme mikroorganisme, seperti respirasi, dapat memainkan peran penting dalam mengatur dinamika pH dalam sistem perairan. Penurunan pH pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenus lebih tinggi bila dibandingkan perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus. Setelah diujikan statistik diketahui bahwa perbedaan pH pada kedua perlakuan terjadi tidak signifikan. Analisa uji t dengan $\alpha = 5\%$ didapatkan tidak ada pH yang signifikan pada masing-masing (t kritis = $2,977 < t$ 3,182)

Dissolved Oxygen (DO)

Analisa DO dilakukan untuk mengetahui konsentrasi oksigen terlarut pada air sampel. Konsentrasi oksigen terlarut (DO) rata-rata sebelum penambahan konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus sebesar 11,20 mg/L. Konsentrasi DO selama bioproses pada masing-masing perlakuan mengalami penurunan selama bioproses (Gambar 5). Pada akhir bioproses jam ke-72 masih terjadi penurunan konsentrasi rata-rata DO yaitu pada perlakuan konsorsium bakteri eksogenus sebesar 6,57mg/L sedangkan konsentrasi DO rata-rata pada perlakuan konsorsium endogenus sebesar 6,97 mg/L.

Penurunan konsentrasi DO untuk perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenus lebih tinggi bila dibandingkan perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus. Hal ini dikarenakan jumlah bakteri nitrifikasi pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenus lebih banyak oksigen yang lebih banyak. Penjelasan tersebut didukung oleh pernyataan. Penelitian Tian *et al.* (2021) menunjukkan bahwa penghilangan oksigen terlarut dalam air terutama disebabkan oleh dua proses utama: nitrifikasi, yaitu oksidasi amonia menjadi nitrit dan nitrat oleh bakteri nitrifikasi, serta dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme heterotrofik. Kedua proses ini mengonsumsi oksigen terlarut dan dapat menyebabkan deplesi oksigen dalam sistem perairan jika laju konsumsi melebihi laju reaksi.



Gambar 5. DO Rata-Rata Selama Bioproses

Perbedaan konsentrasi DO tidak terjadi signifikan pada masing-masing perlakuan penambahan konsorsium bakteri. Hasil analisa uji t dengan $\alpha = 5\%$.

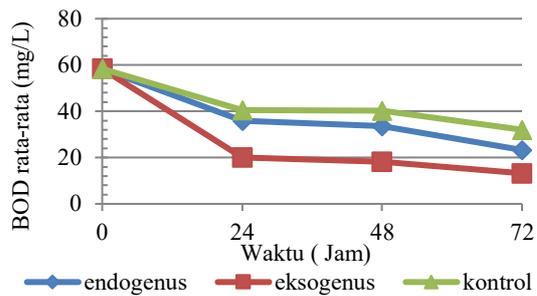
Biochemical Oxygen Demand (BOD)

Analisa BOD dilakukan untuk mengetahui banyak jumlah oksigen terlarut oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik. Konsentrasi BOD rata-rata sebelum penambahan konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus sebesar 58,34 mg/L. Konsentrasi BOD selama bioproses pada masing-masing perlakuan mengalami penurunan (Gambar 6). Pada akhir bioproses jam ke-72 terjadi penurunan konsentrasi BOD rata-rata hingga 23,27 mg/L pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus sedangkan penurunan konsentrasi BOD rata-rata sangat tinggi terjadi pada perlakuan konsorsium bakteri eksogenus sebesar 13,21 mg/L.

Penurunan konsentrasi BOD untuk perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenus lebih tinggi bila dibandingkan perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus. Hal ini dikarenakan pada perlakuan penurunan konsorsium bakteri eksogenus yang terdiri dari *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. memerlukan oksigen lebih banyak terjadi lebih banyak dalam penguraian BOD. Hal ini sesuai dengan Penelitian Huang *et al.* (2021) menunjukkan bahwa bakteri nitrifikasi, seperti *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp., membutuhkan konsentrasi oksigen terlarut minimal 1,5-2 mg/L untuk melakukan proses nitrifikasi secara optimal. Ketersediaan oksigen yang cukup penting untuk mendukung aktivitas metabolisme bakteri nitrifikasi dalam mengoksidasi amonia menjadi nitrit dan nitrat, sehingga membantu mengurangi beban BOD dalam sistem pengolahan air limbah.

Penurunan konsentrasi BOD ini diduga adanya penguraian oleh bakteri aerob memerlukan oksigen terlarut yang digunakan untuk menguraikan bahan organik sehingga berkurang kadar oksigen terlarut didalam air. Penguraian organik yang memerlukan oksigen terlarut yang digunakan untuk meningkatkan aktivitas bakteri yang menyebabkan pertumbuhan bakteri meningkat.

Penelitian Riedel *et al.* (2021) memperkuat pemahaman kita tentang pentingnya oksigen terlarut bagi pertumbuhan dan aktivitas metabolisme bakteri aerob. Ketersediaan oksigen yang cukup memungkinkan bakteri untuk melakukan respirasi aerobik secara efisien, menghasilkan energi yang diperlukan untuk sintesis komponen seluler, pembelahan sel, dan peningkatan laju pertumbuhan populasi. Oleh karena itu, menjaga konsentrasi oksigen terlarut yang optimal dalam sistem mikroba sangatlah penting untuk mendukung pertumbuhan dan fungsi komunitas bakteri yang sehat.



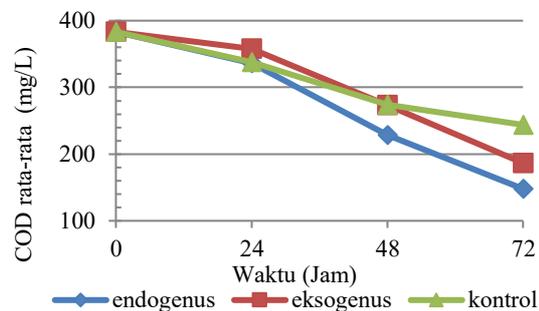
Gambar 6. BOD Selama Bioproses

Penurunan konsentrasi BOD ini diduga adanya penguraian oleh bakteri aerob memerlukan oksigen terlarut yang digunakan untuk menguraikan bahan organik sehingga berkurang kadar oksigen terlarut didalam air. Penguraian organik yang memerlukan oksigen terlarut yang digunakan untuk meningkatkan aktivitas bakteri yang menyebabkan pertumbuhan bakteri meningkat. Penelitian Okabe *et al* (2020) menunjukkan bahwa oksigen terlarut memainkan peran penting dalam metabolisme dan pertumbuhan berbagai jenis bakteri aerob. Bakteri ini menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron terminal dalam respirasi aerobik, yang menghasilkan energi (ATP) untuk mendukung aktivitas metabolisme, sintesis biomolekul, dan pembelahan sel. Oleh karena itu, ketersediaan oksigen terlarut yang cukup sangat penting untuk meningkatkan laju pertumbuhan populasi bakteri aerob dalam lingkungan akuatik. Perlakuan penambahan konsorsium bakteri terjadi tidak signifikan. Nilai akhir BOD pada akhir pengamatan masih melebihi baku mutu PP No. 82 Tahun 2001 tentang kualitas dan pengendalian pencemaran air yaitu sebesar 2 mg/L. Hal ini dikarenakan oleh pencemaran organik yang sangat tinggi di sungai krukut sehingga perlu memperpanjang waktu bioproses dalam menurunkan zat organik.

Chemical Oxygen Demand (COD)

Analisa COD dilakukan untuk mengetahui kebutuhan oksigen kimia untuk mendegradasi dari senyawa kimia pada sampel air. Pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenous, konsorsium bakteri endogenous, maupun kontrol mengalami penurunan yaitu berturut-turut yaitu pada perlakuan konsorsium bakteri eksogenous mulai 383,2 mg/L mengalami penurunan hingga 186,66 mg/L sedangkan pada perlakuan endogenous mulai 383,2 mg/L mengalami hingga 147,88 mg/L (Gambar 7). Penurunan COD selama bioproses ini disebabkan adanya penguraian pada bahan organik yang bisa diuraikan oleh bakteri aerob.. Penelitian riedel *et al* (2021) menunjukkan bahwa oksigen terlarut memainkan peran penting dalam metabolisme dan pertumbuhan berbagai jenis bakteri aerob. Bakteri ini menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron terminal dalam respirasi aerobik, yang menghasilkan energi (ATP) untuk

mendukung aktivitas metabolisme, sintesis biomolekul, dan pembelahan sel. Oleh karena itu, ketersediaan oksigen terlarut yang cukup sangat penting untuk meningkatkan laju pertumbuhan populasi bakteri aerob dalam lingkungan akuatik.

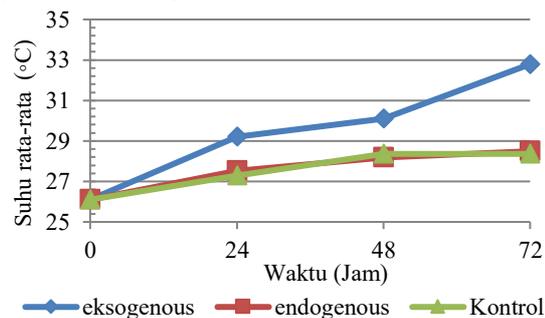


Gambar 7. Rata-rata COD Selama Bioproses

Penurunan konsentrasi COD pada masing-masing perlakuan penambahan konsorsium endogenous dan eksogenous tidak terjadi signifikan. Analisa statistik, diketahui tidak ada perbedaan signifikan dalam penurunan COD) pada masing-masing perlakuan penambahan konsorsium endogenous dan eksogenous ($t_{kritis} = 0,909 < t_{\alpha 5\%} = 3,182$) Pada akhir bioproses konsentrasi COD masih melampaui baku mutu PP No 82 Tahun 2001 tentang kualitas dan pengendalian pencemaran air yaitu sebesar 10 mg/L. Hal ini dikarenakan tinggi pencemaran organik dan anorganik pada sungai krukut, maka perlu diperpanjang waktu bioproses dalam menurunkan zat organik dan anorganik.

Suhu

Analisa suhu dilakukan untuk mengetahui suhu pada sampel air baku. Sebelum bioproses rata-rata suhu yaitu 26,1°C. Pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenous dan konsorsium bakteri eksogenous maupun kontrol mengalami peningkatan nilai suhu selama bioproses (Gambar 8). Ditunjukan dengan peningkatan tertinggi suhu untuk perlakuan konsorsium bakteri eksogenous yaitu dan 32,79°C dengan nilai deviasi 1,93 sedangkan pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenous yaitu 28,49°C dengan nilai deviasi 0,82. Selama bioproses nilai deviasi masih di dalam baku mutu mutu PP No 82 Tahun 2001 tentang kualitas dan pengendalian pencemaran air yaitu sebesar deviasi 3.



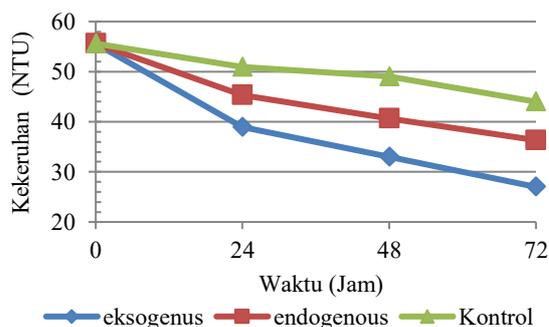
Gambar 8. Suhu Rata-Rata Selama Bioproses

Peningkatan suhu untuk perlakuan konsorsium bakteri endogenus dan bakteri eksogenus 26,1°C dengan nilai deviasi 0,82 masing-masing menjadi 28,49°C dengan deviasi 1,67 dan 32,79°C dengan nilai deviasi 1,93. Selama bioproses nilai deviasi masih di dalam baku mutu mutu PP No 82 Tahun 2001 tentang kualitas dan pengendalian pencemaran air yaitu sebesar deviasi 3.

Peningkatan suhu dalam bioproses ini diduga karena peningkatan reaksi metabolisme ini selama bioproses. Menurut penelitian *et al. labbe* (2021) menunjukkan bahwa peningkatan suhu air dapat menyebabkan penurunan konsentrasi oksigen terlarut (DO). Hal ini disebabkan oleh dua faktor utama: (1) penurunan kelarutan oksigen dalam air pada suhu yang lebih tinggi, dan (2) peningkatan laju reaksi kimia dan aktivitas metabolisme organisme akuatik, termasuk bakteri. Meskipun peningkatan suhu dapat mempercepat laju metabolisme bakteri, dampaknya terhadap populasi bakteri dalam sistem akuatik dapat bervariasi tergantung pada jenis bakteri dan kondisi lingkungan spesifik. Dalam studi perbandingan antara konsorsium bakteri eksogen dan endogen, perlakuan dengan konsorsium eksogen sering menunjukkan peningkatan suhu yang lebih tinggi, meskipun perbedaannya mungkin tidak signifikan secara statistik.

Kekeruhan (*Turbidity*)

Kekeruhan rata-rata sebelum penambahan konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus sebesar 55,6 NTU. Kekeruhan selama bioproses pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus dan eksogenus maupun kontrol mengalami penurunan (Gambar 9). Penurunan kekeruhan rata-rata mulai terjadi pada jam ke-24. Yaitu pada perlakuan terjadi pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus yaitu rata-rata sebesar 45,3 NTU sedangkan kekeruhan rata-rata pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri eksogenus yaitu sebesar 39 NTU. Pada akhir bioproses jam ke-72 terjadi penurunan kekeruhan pada perlakuan penambahan konsorsium bakteri endogenus hingga sebesar 36,3 NTU sedangkan konsentrasi kekeruhan rata-rata pada perlakuan konsorsium bakteri eksogenus sebesar 27 NTU.



Gambar 9. Kekeruhan Selama Bioproses

Penurunan kekeruhan ini dikarenakan oleh adanya pengendapan hasil dekomposisi bakteri. Penelitian Sheng, *et al.* (2010). menunjukkan bahwa ketika bakteri dalam sistem pengolahan air limbah mencapai fase stasioner, di mana laju pertumbuhan melambat karena keterbatasan nutrisi atau akumulasi produk limbah, mereka cenderung membentuk agregat atau flok. Proses pembentukan flok ini melibatkan produksi substansi polimer ekstraseluler (EPS) oleh bakteri, yang memungkinkan mereka untuk saling menempel dan membentuk struktur yang lebih besar. Pengendapan flok bakteri dapat secara signifikan mengurangi kekeruhan air dengan mengumpulkan partikel tersuspensi dan koloid. Dalam perbandingan antara konsorsium bakteri eksogenus dan endogenus, perlakuan dengan konsorsium eksogenus sering menghasilkan pembentukan flok dan pengendapan yang lebih ekstensif, yang tercermin dari akumulasi endapan yang lebih besar di dasar wadah reaksi

Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsorsium bakteri eksogenus mencapai efisiensi penyisihan amonia sebesar 20,17% dengan konsentrasi akhir 9,02 mg/L dan pertumbuhan populasi bakteri hingga 290×10^4 sel/mL, sedangkan konsorsium bakteri endogenus mencapai efisiensi 7,9% dengan konsentrasi akhir 10,04 mg/L dan pertumbuhan populasi 250×10^4 sel/mL. Meskipun secara numerik terdapat perbedaan, analisis statistik menunjukkan bahwa penambahan konsorsium bakteri eksogenus tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter kualitas air yang diuji ($p > 0,05$).

Kedua konsorsium bakteri memberikan kondisi lingkungan yang relatif serupa pada akhir proses, dengan pH berkisar 6,1-6,2, DO 6,57-6,97 mg/L, dan penurunan COD serta BOD yang substansial. Namun demikian, seluruh parameter masih belum mencapai baku mutu yang ditetapkan.

Penelitian ini memiliki keterbatasan utama pada durasi bioproses yang singkat (72 jam), dimana data menunjukkan bahwa kedua konsorsium masih berada dalam fase pertumbuhan logaritmik dan belum mencapai fase stasioner. Konsentrasi amonia awal yang tinggi (11,30 mg/L) juga menjadi tantangan tersendiri, sehingga meskipun terjadi penyisihan, konsentrasi akhir masih jauh di atas ambang batas yang diizinkan (0,05 mg/L).

Untuk aplikasi praktis, disarankan untuk memperpanjang waktu proses hingga minimal 7-14 hari guna memaksimalkan efisiensi penyisihan amonia. Pengembangan sistem pengolahan bertahap yang mengkombinasikan bioproses nitrifikasi dengan metode fisika-kimia dapat menjadi solusi untuk mengatasi konsentrasi amonia yang tinggi. Pengendalian parameter lingkungan seperti pH (pada rentang 7,5-8,0) dan oksigen terlarut (di atas 2 mg/L) juga sangat penting untuk

mengoptimalkan aktivitas bakteri nitrifikasi. Implementasi bioreaktor dengan bakteri terimobilisasi pada media pendukung dapat meningkatkan stabilitas proses dan retensi biomassa untuk aplikasi skala penuh. Sebelum implementasi, uji skala pilot dan analisis ekonomis perlu dilakukan untuk mendapatkan parameter desain yang akurat dan mengevaluasi efisiensi biaya dibandingkan metode konvensional. Pengembangan lebih lanjut dari pendekatan biologis ini diharapkan dapat menjadi solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk permasalahan pencemaran amonia di sumber air baku Instalasi Pengolahan Air Cilandak.

DAFTAR PUSTAKA

- Bertrand, R. L. (2019). Lag phase is a dynamic, organized, adaptive, and evolvable period that prepares bacteria for cell division. *Journal of Bacteriology*, 201(7), e00697-18. <https://doi.org/10.1128/JB.00697-18>
- Duarte, C. M., Hendriks, I. E., Moore, T. S., Olsen, Y. S., Steckbauer, A., Ramajo, L., & McCulloch, M. (2013). Is ocean acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH. *Estuaries and Coasts*, 36(2), 221-236.
- Fatma, Y. S., Lesmana, D., Handayani, L., Sulistyorini, E., Arrasyid, B., Soimin, M., & Marda, A. B. (2023). Mikrobiologi lingkungan. *Tohar Media*.
- García-Jiménez, B., de la Rosa, T., & Carrasco, J. (2023). Demonstrating the performance of natural bacterial consortia in environmental remediation applications. *Journal of Environmental Management*, 34(2), 223-226.
- Giarrizzo, J., Illig, K. J., & Flickinger, M. C. (2020). Nitrifying bacteria for ammonia removal in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 265, 129041. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129041>
- Guo, R., Zhao, L., Yao, Y., & Wang, S. (2021). Mechanisms and kinetics of CO₂ hydration and carbonic acid dissociation in aqueous solution: A comprehensive review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 294, 102473. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102473>
- Huang, X., Li, W., Zhang, D., & Qin, W. (2021). Ammonium removal by *Nitrosomonas europaea* in the presence of heavy metals: Performance, kinetics, and mechanism. *Bioresource Technology*, 320, 124298. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124298>
- Keene, D. L., Suescun, M. G., Shenoy, A. V., Giarrizzo, J., Illig, K. J., & Flickinger, M. C. (2020). Nitrifying bacteria for ammonia removal in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 265, 129041. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129041>
- Keerthana, S., & Ganesan, G. (2021). Comparative analysis of ammonia oxidation by *Nitrosomonas* and *Nitrobacter* species isolated from a wastewater treatment plant. *Journal of Environmental Management*, 289, 112538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112538>
- Labbé, J. I., Roslev, P., & Aamand, J. (2021). Quantifying temperature effects on the relative efficiency of sewage treatment by activated sludge and lagoon systems. *Water Research*, 190, 116737. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116737>
- Liu, Y., Wang, Q., & Zhang, Z. (2023). Nitrification performance and microbial community structure in a novel nitrifying bioreactor for ammonia removal from raw water. *Water Research*, 219, 118617. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118617>
- Okabe, S., Aoi, Y., Satoh, H., & Suwa, Y. (2020). Nitrification in wastewater treatment. In *Nitrification* (pp. 1-29). American Society of Microbiology. <https://doi.org/10.1128/9781683670438.ch1>
- Riedel, T., & Becker, B. (2021). Analysis of microbial population turnover and performance under fluctuating oxygen levels typical for activated sludge. *Water Research*, 203, 117517. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117517>
- Sheng, G. P., Yu, H. Q., & Li, X. Y. (2010). Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. *Biotechnology Advances*, 28(6), 882-894. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.001>
- Singh, R., & Gulati, A. (2022). Ammonia assimilation in bacteria: Mechanisms and regulation. *Current Opinion in Microbiology*, 67, 102140. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102140>
- SNI 06-6989.11.2004. Standar Nasional Air dan Air Limbah. Bagian 11. Cara Uji pH dengan menggunakan pH meter.
- SNI 06-6989.23.2005. Standar Nasional Air dan Air Limbah. Bagian 23. Cara Uji Suhu dengan Menggunakan Termometer.
- SNI 06-6989.30.2005. Standar Nasional Air dan Air Limbah. Bagian 30. Cara Uji Kadar Ammonia dengan menggunakan spektrometer.

SNI 06-6989.72.2005. Standar Nasional Air dan Air Limbah- Bagian 72. Cara Uji Kadar BOD dengan Metode Winkler.
Tian, X., & Xin, X. (2021). Nitrification and its significance in the biogeochemical

nitrogen cycle. *Frontiers in Microbiology*, 12, 1-15.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.711807>
[4-3](#)