BUKU REFERENSI LANJUT · BAGIAN 3/7 · EDISI 1

# Karakterisasi air limbah dan kebutuhan pengolahan

Menghubungkan konsentrasi, fraksi zat, beban, dan sasaran efluen.



Ilustrasi konseptual · Higgsfield

## Tujuan dan hubungan antarbagian

Bagian 2 menetapkan berapa air yang masuk. Bagian ini menjawab apa yang dibawa air tersebut dan mekanisme apa yang diperlukan untuk mengolahnya. Tujuan akhirnya bukan tabel efisiensi tunggal, melainkan daftar kebutuhan: bahan organik yang harus dioksidasi atau dipisahkan, padatan yang harus ditangkap, nitrogen yang harus dikonversi, dan residu yang harus dikelola. Daftar ini menjadi dasar pemilihan proses pada Bagian 4.

Setelah membaca, Anda dapat menghitung beban pada basis yang konsisten, menjelaskan mengapa BOD dan COD tidak dapat saling menggantikan, membedakan amoniak dari nitrogen total, serta merencanakan karakterisasi lanjutan. Komposisi harus mengikuti titik sampel: limbah mentah, setelah pengendap primer, atau umpan biologi adalah tiga kondisi berbeda.

## 3.1 Konsentrasi bukan beban

Konsentrasi menyatakan massa per volume. Beban menyatakan massa per waktu. Beban harian rata-rata dari sampel yang berubah terhadap waktu membutuhkan integrasi debit dan konsentrasi secara berpasangan. Hasil kali rata-rata aritmetika keduanya tidak selalu sama dengan rata-rata hasil kali. Sampling komposit berbobot aliran dapat membantu mewakili beban, tetapi kesesuaian metode tetap bergantung parameter, pengawetan, dan tujuan uji.

$$L = \frac{QC}{1000}, \qquad \overline{L} = \frac{1}{1000T}\int_0^T Q(t)C(t)\,dt$$

| Parameter | Masukan Griya Asri | Beban pada 150 m³/hari | Massa efluen pada target kasus |
|---|---|---|---|
| $BOD_5$ | 400 mg/L | 60 kg/hari | 4,5 kg/hari pada 30 mg/L |
| COD | 800 mg/L | 120 kg/hari | 15 kg/hari pada 100 mg/L |
| TSS | 300 mg/L | 45 kg/hari | 4,5 kg/hari pada 30 mg/L |
| $NH_3$-N | 40 mg/L | 6 kg N/hari | 1,5 kg N/hari pada 10 mg/L |
| Minyak dan lemak | 25 mg/L | 3,75 kg/hari | 0,75 kg/hari pada 5 mg/L |

Kolom terakhir hanya perbandingan pada debit sama, tidak memperhitungkan air lumpur dan aliran samping. Selisih BOD adalah 55,5 kg/hari, COD 105, TSS 40,5, dan amoniak 4,5 kg N/hari. Selisih tersebut bukan semuanya menjadi lumpur. Bahan organik dapat berubah menjadi biomassa, $CO_2$, $CH_4$ pada proses anaerobik, atau zat terlarut lain. Sebaliknya TSS yang ditangkap berpindah ke jalur lumpur; ia belum hilang dari lingkungan.

## 3.2 BOD, COD, dan fraksi yang dapat diolah

$BOD_5$ merupakan pengukuran kebutuhan oksigen biologis pada kondisi uji dan periode lima hari. COD mengukur ekuivalen oksigen dari oksidasi kimia sesuai metode. Keduanya mempunyai basis dan respons berbeda. Rasio kasus $BOD_5$/COD = 0,50 dapat menjadi petunjuk awal adanya bagian yang dapat diolah biologis, tetapi tidak memberi komposisi rinci dan tidak membuktikan tidak ada inhibisi.

Karakterisasi model yang lebih rinci membagi COD menjadi bagian mudah terurai, lambat terurai, inert terlarut, dan inert partikulat. Fraksi inert terlarut tidak dapat dihilangkan hanya dengan memperbesar waktu aerasi. Fraksi partikulat dapat ditangkap tetapi ikut membentuk lumpur. Ketika menggunakan model biologis dinamis, fraksi dan kinetika membutuhkan data yang sesuai; memasukkan COD total sebagai seluruh substrat mudah terurai akan melebihkan kecepatan respons.

$$COD_{\text{total}} = S_S + S_I + X_S + X_I$$

Simbol di sini adalah penyederhanaan pengelompokan untuk mengajar, bukan set komponen lengkap semua model activated sludge. Biomassa dan produk metabolik dapat mempunyai kompartemen tersendiri. Jika memakai model tertentu, gunakan definisi, basis satuan, dan neraca model itu secara utuh.

Sebagai contoh sensitivitas, andaikan COD inert terlarut mencapai 120 mg/L. Sasaran COD 100 mg/L tidak mungkin dibuktikan dengan pengolahan biologis saja tanpa mekanisme tambahan atau koreksi data karakterisasi. Ini bukan prediksi bahwa Griya Asri mempunyai 120 mg/L inert. Contoh menunjukkan mengapa target tidak boleh diturunkan hanya dari persentase penyisihan rata-rata.

## 3.3 Padatan, pengendapan, dan pembentukan lumpur

TSS mencakup padatan tersuspensi yang tertangkap metode penyaringan. VSS merupakan bagian volatil pada prosedur pembakaran tertentu; ia sering dipakai sebagai pendekatan bahan organik/biomassa, tetapi bukan pengukuran langsung seluruh sel hidup. MLSS dan MLVSS adalah konsentrasi padatan mixed liquor, bukan padatan limbah mentah.

Dengan penyisihan primer **asumsi latihan** 50% TSS dan 30% BOD, pengendap primer menangkap 22,5 kg TSS/hari dan menurunkan BOD menuju biologi menjadi 42 kg/hari atau 280 mg/L. Dua persentase tidak harus sama karena komposisi partikel dan zat terlarut berbeda. Angka tersebut digunakan untuk menelusuri neraca; pemilihan rancangan harus didukung data pengendapan serta kondisi operasi.

$$L_{\mathrm{BOD,bio}} = 60(1 - 0.30) = 42\ \mathrm{kg/d}, \qquad L_{\mathrm{TSS,primary}} = 45(0.50) = 22.5\ \mathrm{kg/d}$$

Padatan sekunder mencakup biomassa tumbuh, residu peluruhan, dan padatan inert yang terbawa. Menjumlahkan 45 kg/hari TSS inlet dengan semua “BOD tersisih” sebagai lumpur akan menghitung sebagian bahan dua kali dan mengabaikan konversi gas. Bagian 7 memperkenalkan neraca lumpur kering dengan batas proses yang dinyatakan.

## 3.4 Amoniak, TKN, dan nitrifikasi

$NH_3$-N menyatakan amoniak pada basis massa nitrogen. Istilah laboratorium dapat mencakup total ammoniacal nitrogen sesuai metode; $NH_3$ bebas dan $NH_4^+$ berada dalam kesetimbangan yang dipengaruhi pH serta suhu. TKN mencakup nitrogen organik dan amoniakal, tidak termasuk nitrat/nitrit. Karena data kasus hanya $NH_3$-N 40 mg/L, **nitrogen total belum diketahui**. Jangan menuliskan 6 kg N/hari sebagai seluruh nitrogen masuk.

Nitrifikasi mengoksidasi nitrogen amoniakal menjadi nitrit lalu nitrat. Proses ini membutuhkan biomassa nitrifier, oksigen, umur lumpur cukup, suhu yang sesuai, dan alkalinitas. Ia menurunkan amoniak, tetapi tidak otomatis mengurangi nitrogen total; nitrogen dapat tetap berada sebagai nitrat. Denitrifikasi membutuhkan kondisi anoksik dan donor elektron, dengan konfigurasi serta neraca karbon yang sesuai [R2, Bab 6–7].

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$$

Dari stoikiometri ideal tanpa sintesis sel, 64/14 = 4,571 kg $O_2$ diperlukan per kg N teroksidasi. Dua ekuivalen keasaman setara dengan 100/14 = 7,143 kg $CaCO_3$ per kg N. Faktor aktual dapat berbeda karena sintesis, denitrifikasi, dan definisi proses. Jangan menambahkan faktor ini ke rumus yang sudah memasukkan nitrifikasi tanpa memeriksa risiko penghitungan ganda.

Untuk menurunkan amoniak dari 40 menjadi 10 mg/L pada Q 150, selisih nitrogen 4,5 kg/hari. Kebutuhan ideal tambahannya sekitar **20,57 kg $O_2$/hari** dan **32,14 kg $CaCO_3$/hari**, setara konsumsi alkalinitas **214,29 mg/L sebagai $CaCO_3$**. Alkalinitas inlet belum tersedia. Jika diasumsikan hanya 200 mg/L, neraca tersebut sudah memberi peringatan bahkan sebelum mempertahankan alkalinitas residu. Penambahan alkali atau pemulihan melalui denitrifikasi perlu dianalisis; bukan diputuskan dari pH awal saja.

---

## 3.5 Fosfor, minyak, patogen, dan pengganggu

Fosfor diperlukan bagi pertumbuhan biomassa, tetapi juga dapat memerlukan pengendalian untuk penerima sensitif atau pemanfaatan tertentu. Data fosfor total kasus belum ada. Jangan menambahkan penghilangan fosfor biologis ke narasi R4 hanya karena prosesnya memakai aerasi. Penghilangan fosfor yang andal memerlukan konfigurasi dan kondisi yang dirancang, atau alternatif kimia dengan konsekuensi lumpur.

Minyak dan lemak perlu dilihat asalnya: rumah, dapur usaha, atau aliran lain. Pemisah gravitasi lebih efektif bagi fraksi yang dapat terpisah daripada emulsi stabil. Deterjen, suhu, dan pola pembersihan dapat mengubah perilakunya. Sampah saringan, lemak, dan lumpur harus mempunyai jalur pengambilan serta tujuan penanganan yang jelas.

Fecal coliform dinyatakan sebagai jumlah per 100 mL, bukan mg/L. Model pengurangan mikroba lazim menggunakan log reduction. Penurunan dari $10^7$ menjadi $10^3$ MPN/100 mL adalah empat log atau 99,99%. Itu tidak berarti seluruh patogen, virus, atau telur cacing mempunyai perilaku sama. Disinfeksi memerlukan kekeruhan/TSS terkendali, waktu kontak efektif, dosis/residu atau UV yang sesuai, dan verifikasi mikrobiologi.

Toksisitas dari bahan pembersih, garam, logam, serta limbah usaha dapat mengganggu biologi walaupun BOD/COD tampak wajar. Survei sambungan dan sumber spesifik sama pentingnya dengan daftar analisis rutin. Perubahan warna atau bau adalah petunjuk inspeksi; keduanya tidak menggantikan pengukuran.

## 3.6 Menetapkan program karakterisasi

Program lanjutan Griya Asri minimal menjawab empat ketidakpastian keputusan. Pertama, apakah beban dan variasi inlet sesuai asumsi. Kedua, apakah nitrogen dapat diolah pada suhu minimum dan alkalinitas aktual. Ketiga, apakah padatan mengendap cukup baik untuk memenuhi TSS. Keempat, apakah disinfeksi dapat mencapai target pada efluen biologis yang sebenarnya.

| Kelompok | Data lanjutan | Keputusan yang didukung |
|---|---|---|
| Aliran dan organik | Q berpasangan dengan BOD/COD; variasi harian | Beban dan kapasitas biologis |
| Fraksi dan inhibisi | COD terlarut/partikulat, uji biodegradasi sesuai kebutuhan | Pemilihan model dan kemungkinan pengolahan lanjut |
| Nitrogen dan buffer | TKN, $NH_3$-N, $NO_2$-N, $NO_3$-N, alkalinitas, pH, suhu | Nitrifikasi/denitrifikasi dan kebutuhan alkali |
| Padatan | TSS/VSS, uji pengendapan, SVI saat biologi beroperasi | Clarifier dan kendali lumpur |
| Akhir proses | Mikroba, TSS/kekeruhan, uji kebutuhan disinfektan | Waktu kontak/dosis dan pembuktian efluen |

Standar sampling, metode analisis, laboratorium, serta rencana kendali mutu harus disesuaikan dengan tujuan pembuktian dan ketentuan proyek. Buku ini menyusun kebutuhan data; tidak menggantikan prosedur sampling resmi atau jaminan kompetensi laboratorium.

## 3.7 Latihan dan pembahasan

### BR03-01 · Menguji klaim amoniak

BOD efluen sudah 20 mg/L. Apakah amoniak otomatis di bawah 10 mg/L?

▼ Lihat pembahasan

Tidak. Penyisihan karbon dapat berlangsung tanpa nitrifikasi memadai. Periksa SRT efektif, DO, suhu, pH/alkalinitas, inhibisi, dan beban nitrogen. Ukur amoniak keluar. Warna indikator BOD tidak boleh dipakai untuk menggantikan indikator nitrogen.

### BR03-02 · Alkalinitas nitrifikasi

Berapa konsumsi ideal alkalinitas untuk mengoksidasi 30 mg N/L, tanpa denitrifikasi dan tanpa memperhitungkan sintesis?

▼ Lihat pembahasan

30 × 100/14 = 214,29 mg/L sebagai $CaCO_3$. Pada 150 $m^3$/hari setara 32,14 kg/hari. Konsumsi tersebut bukan dosis bahan kimia murni yang langsung dapat dipesan; perlu alkalinitas masuk, residu yang dituju, kemurnian, bentuk bahan, dan proses pemulihan alkalinitas.

**Tugas keluaran:** buat tabel beban masuk, beban menuju biologi, sasaran keluar, jalur perpindahan zat, serta data yang belum ada. Jangan memberi efisiensi proses sebelum mekanisme dan basis datanya ditentukan.

## Referensi bagian ini


- **[R1]** Von Sperling & Chernicharo (2005), *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*, Volume One. Bab 2.2 (hlm. 30–78), Bab 5.2–5.4 (248–256), dan Bab 9 (367–420). PDF koleksi. Digunakan untuk karakteristik limbah, neraca dan pengelompokan padatan; tidak menyalin tabel buku sebagai data lapangan kasus.
- **[R2]** Von Sperling, M. (2007). *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*, Biological Wastewater Treatment Series, Volume Five. IWA Publishing. Bab 6 (biological nitrogen removal) dan 7 (continuous-flow nutrient removal). PDF koleksi pemilik. Identitas edisi diperiksa dari halaman judul, bukan nama berkas.
- **[R4]** Permen LH/BPLH 11/2025, Lampiran I. Sasaran tabel kasus mengikuti kategori yang dijelaskan pada Bagian 1, bukan angka universal semua pembuangan atau pemanfaatan.


Edisi 1 · 14 November 2026. Perhitungan oksigen dan alkalinitas pada naskah merupakan derivasi stoikiometri ideal yang ditunjukkan secara terbuka.