BUKU REFERENSI LANJUT · BAGIAN 2/7 · EDISI 1

Data, debit, dan ketidakpastian

Mengubah survei dan neraca air menjadi basis desain yang dapat ditelusuri.



Ilustrasi konseptual · Higgsfield

Tujuan dan jalur pendalaman

Debit menentukan ukuran saluran, waktu tinggal, kebutuhan pompa, dan tekanan pada pemisahan padatan. Namun satu angka rata-rata tidak mewakili kondisi awal operasi, puncak jam, musim hujan, ataupun aliran balik. Bagian ini menggabungkan tiga materi yang sudah tersedia: Pemakaian air, Faktor pengembalian, serta Faktor puncak. Ketiganya tetap mempunyai halaman, PDF, latihan, dan tautan sumber asli sendiri.

Di sini ketiga besaran dikerjakan sebagai satu neraca. Setelah membaca, Anda dapat merancang survei, membedakan jenis debit, menghitung variasi, dan menilai ketidakpastian tanpa memberikan ketelitian semu. Keluaran berupa lembar basis debit beserta hidrograf, sumber data, skenario, dan daftar kebutuhan pengukuran.

2.1 Hierarki data dan rancangan survei

Mulai dari pertanyaan desain, baru tentukan alat ukur. Data meter air bulanan berguna untuk total pemakaian, tetapi tidak langsung memberi debit puncak per jam. Sensor tinggi air tanpa hubungan tinggi–debit yang dikalibrasi juga belum menjadi data aliran. Laporan laboratorium menunjukkan konsentrasi pada sampel yang diterima; beban harian memerlukan hubungan waktu antara konsentrasi dengan debit.

Susun kamus data: nama variabel, simbol, satuan, lokasi, batas sistem, interval, metode, status kalibrasi, waktu, penanggung jawab, dan perlakuan terhadap data hilang. Catat pula sambungan yang belum aktif. Populasi administrasi, penghuni aktual, dan pengguna pada jam tertentu dapat berbeda. Rata-rata lima penghuni per SR merupakan asumsi kasus, sehingga survei rumah tangga perlu memeriksa sebarannya.

Data	Cara memperoleh	Pemeriksaan mutu
Volume pemakaian	Meter induk dan rumah; periode seragam	Kebocoran sebelum/sesudah meter, pelanggan nonrumah
Aliran ke IPAL	Pengukur debit/struktur ukur terkalibrasi	Kondisi terendam, endapan, rentang alat, pencatatan waktu
Variasi harian	Rekaman interval cukup pendek	Hari kerja/libur, hujan, listrik mati, anomali

Data	Cara memperoleh	Pemeriksaan mutu
Konsentrasi	Rencana sampling sesuai tujuan parameter	Pengawetan, waktu simpan, lab, grab/komposit
Elevasi dan banjir	Survei datum dan catatan penerima	Datum sama, kondisi ekstrem, ketidakpastian ukur

Contoh rencana awal adalah kampanye tujuh hari kontinu pada kondisi kering dan kampanye pembanding saat hujan, dengan pencatatan 15 menit. Ini **rancangan latihan**, bukan pernyataan bahwa tujuh hari cukup untuk semua proyek. Lama kampanye harus menangkap musim, variasi hunian, kegiatan nonrutin, dan kebutuhan ketentuan setempat. Jangan menghapus lonjakan hanya karena menyulitkan rancangan; periksa apakah lonjakan adalah kesalahan alat atau kejadian nyata.

2.2 Pemakaian air: total dan batas pengukuran

Pemakaian dalam bangunan berbeda dari total produksi sistem air minum. Kehilangan jaringan sebelum meter rumah tidak otomatis mencapai IPAL. Penyiraman taman dan pencucian kendaraan dapat memakai air tetapi sebagian tidak kembali ke saluran. Sebaliknya, sumur mandiri dapat menghasilkan limbah walaupun tidak muncul pada rekening penyedia air.

Materi pemakaian air menelaah USEPA *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual* (2002), Bab 3, Tabel 3-1. Data Amerika Serikat di sana membantu memahami variasi dan batas penggunaan; bukan standar kebutuhan air Indonesia. Pemakaian Griya Asri tetap 125 L/jiwa/hari sebagai asumsi. Nilai itu dipilih sebelum faktor pengembalian, sehingga tidak boleh langsung disebut produksi air limbah per kapita.

$$V_{\text{water}} = Pq = 1500(125) = 187500\ \text{L/d} = 187.5\ \text{m}^3/\text{d}$$

Bandingkan dengan data meter pada periode yang sama. Bila volume meter 5.625 m³ dalam 30 hari dan penduduk 1.500 jiwa, pemakaian rata-rata tepat 125 L/jiwa/hari. Jika 10% sambungan kosong, pemakaian per penghuni aktual menjadi lebih tinggi daripada pembagian dengan populasi administrasi. Perubahan penyebut itu perlu dijelaskan sebelum menarik kesimpulan tentang perilaku konsumsi.

2.3 Faktor pengembalian dan neraca air

Faktor pengembalian f menyatakan bagian air yang menjadi air limbah pada batas tertentu. Nilai 0,80 sering digunakan sebagai estimasi perencanaan, tetapi bukan konstanta fisik. Materi pendamping memeriksa pernyataan estimasi 80% pada dokumen resmi Pemerintah India tahun 2023. Pernyataan itu menunjukkan asal sebuah estimasi, tidak membuktikan angka tersebut berlaku untuk semua rumah atau menjadi aturan Indonesia.

$$Q_{\text{san}} = f V_{\text{water}} = 0.80(187.5) = 150\ \text{m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{inlet}} = Q_{\text{san}} + Q_{\text{inf}} + Q_{\text{inflow}} + Q_{\text{other}}$$

Infiltrasi adalah masuknya air tanah melalui celah jaringan; inflow adalah masuknya aliran langsung seperti sambungan drainase. Keduanya perlu ditaksir dari data dan kondisi jaringan. Jangan menambahkan persentase infiltrasi ke nilai f yang ternyata sudah diturunkan dari pengukuran inlet saat hujan, karena komponen yang sama dapat terhitung dua kali.

Dalam contoh tambahan, air taman 18,75 m³/hari, penguapan/konsumsi 9,375, dan penggunaan yang tidak menuju jaringan 9,375 menghasilkan selisih 37,5 m³/hari. Sisa 150 m³/hari sama dengan faktor 0,80. Pembagian komponen ini **ilustrasi neraca**, bukan pengukuran Griya Asri. Jika infiltrasi independen terukur 15 m³/hari, inlet menjadi 165. Faktor kembali rumah tetap 0,80; rasio inlet terhadap air termeter kini 0,88.

Untuk pengolahan biologis, air tambahan mungkin mengencerkan konsentrasi tanpa menambah BOD secara proporsional. Karena itu skenario infiltrasi sebaiknya menyimpan beban sanitasi dan menghitung konsentrasi hasil pencampuran, bukan menaikkan Q sambil mempertahankan semua konsentrasi tanpa alasan.

2.4 Rata-rata, maksimum harian, dan puncak jam

Definisikan periode pada setiap faktor. Faktor maksimum harian membandingkan volume hari maksimum dengan rata-rata harian. Faktor puncak jam membandingkan laju pada jam puncak dengan laju rata-rata. Keduanya tidak dapat dipertukarkan. Q puncak 375

m³/hari pada kasus berarti **laju ekuivalen**, sama dengan 15,625 m³/jam; bukan bukti bahwa volume 375 m³ masuk setiap hari.

$$Q_{\text{avg,h}} = 150/24 = 6.25\ \text{m}^3/\text{h}, \qquad Q_{\text{peak,h}} = 2.5(6.25) = 15.625\ \text{m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\text{peak}} = \frac{15.625(1000)}{3600} = 4.34028\ \text{L/s}$$

Materi faktor puncak menelaah tabel T-5 EPD Hong Kong (2005) dan rumus Harmon dalam dokumen Middlesex Centre (2018). Metode berbeda dapat memberi faktor berbeda karena cakupan populasi, fasilitas, dan kondisi jaringan berbeda. Gunakan satu metode pada batas yang sesuai; jangan mengalikan faktor jam, faktor harian, dan koefisien lokal secara otomatis.

Sebagai pembanding metode, persamaan Harmon dapat ditulis berikut, dengan P dalam **ribuan penduduk**:

$$F_H = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}}, \qquad P = 1.5 \ \Rightarrow \ F_H \approx 3.680$$

Hasil 3,680 tidak mengganti 2,50 secara diam-diam. Ia menghasilkan skenario pembanding 23,00 m³/jam. Penyesuaian lokal 0,8 pada salah satu dokumen sumber merupakan bagian metode lokal tersebut; berbeda pengertian dengan faktor pengembalian rumah 0,80. Kesamaan angka bukan kesamaan konsep.

2.5 Ekualisasi: gunakan kurva kumulatif

Bak pengumpul untuk puluhan menit tidak otomatis meratakan siklus 24 jam. Untuk ekualisasi, tetapkan pola debit masuk dan strategi pelepasan. Dengan keluaran konstan, perubahan simpanan tiap interval merupakan selisih volume masuk dan keluar. Kapasitas aktif minimum berasal dari rentang maksimum–minimum kurva kumulatif. Tambahkan kemudian ruang operasi, endapan, cadangan yang beralasan, serta freeboard secara terpisah.

$$\Delta V_i = (Q_{\text{in},i} - Q_{\text{out},i})\Delta t_i, \qquad V_{\text{eq,min}} = \max C_i - \min C_i, \quad C_i = \sum_{j=1}^{i} \Delta V_j$$

Interval latihan	Lama	Debit masuk	Selisih volume terhadap keluar 6,25 m³/jam	Kumulatif
00–06	6 jam	2,5 m³/jam	−22,5 m³	−22,5 m³
06–10	4 jam	10,0 m³/jam	+15,0 m³	−7,5 m³
10–18	8 jam	5,0 m³/jam	−10,0 m³	−17,5 m³
18–22	4 jam	12,5 m³/jam	+25,0 m³	+7,5 m³
22–24	2 jam	2,5 m³/jam	−7,5 m³	0 m³

Jumlah masuk 150 m³/hari dan jumlah keluar 150 m³/hari. Rentang kurva 7,5 − (−22,5) = **30 m³**. Agar tidak negatif, simpanan awal dapat digeser 22,5 m³; hasil selama hari berkisar 0–30 m³. Hidrograf ini buatan untuk latihan dan mempunyai puncak 12,5 m³/jam, bukan puncak desain 15,625. Puncak sesaat dapat lebih besar daripada rata-rata blok empat jam. Resolusi data karena itu memengaruhi desain.

Bak juga perlu pencampuran, pencegahan endapan/bau, kendali level, dan penanganan kegagalan pompa. Jika aliran keluar mengikuti jadwal berbeda, ulangi perhitungan kumulatif. Penambahan “HRT enam jam” tanpa hidrograf bisa terlalu besar maupun terlalu kecil.

2.6 Ketidakpastian dan sensitivitas

Pada Q = Pqf/1.000, setiap faktor memengaruhi hasil secara proporsional. Analisis skenario pertama dapat menahan P = 1.500, memberi q = 100–150 L/jiwa/hari dan f = 0,70–0,90. Batas kombinasi adalah 105–202,5 m³/hari. Ini rentang skenario, **bukan interval kepercayaan statistik**, karena tidak ada distribusi probabilitas hasil survei yang mendasarinya.

Jika galat relatif kecil, tidak berkorelasi, dan simpangan baku masing-masing diketahui, pendekatan propagasi berikut dapat dipakai. Korelasi antarfaktor membutuhkan suku kovarians dan tidak boleh diabaikan hanya agar rumus lebih sederhana.

$$\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 \approx \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2$$

Misalkan ketidakpastian relatif standar P 5%, q 10%, dan f 5%. Kombinasinya sekitar 12,25%, atau 18,37 m³/hari pada Q 150. Ini contoh perhitungan statistik bersyarat; angka persentase tersebut bukan hasil survei. Keputusan volume bak masih membutuhkan pemeriksaan beban, ekstrem musiman, dan konsekuensi gagal.

Pengukuran tambahan paling bermanfaat bila mengurangi ketidakpastian keputusan. Jika risiko utama adalah luapan pada hujan, pengukuran aliran dan sumber inflow lebih mendesak daripada menambah digit konsentrasi BOD rata-rata. Jika masalahnya amoniak, data suhu minimum, TKN, alkalinitas, dan umur lumpur menjadi prioritas.

2.7 Latihan dan pembahasan

BR02-01 · Menambah infiltrasi

Dengan beban BOD tetap 60 kg/hari, infiltrasi bersih 15 m³/hari menaikkan Q dari 150 menjadi 165 m³/hari. Berapa konsentrasi campurannya?

▼ Lihat pembahasan

S = 1.000 L/Q = 1.000 × 60 / 165 = 363,64 mg/L. Mempertahankan 400 mg/L akan menghasilkan 66 kg/hari dan secara tidak sengaja menambahkan 6 kg/hari BOD. Untuk infiltrasi yang memang tercemar, tambahkan beban terukurnya secara eksplisit.

BR02-02 · Volume dan puncak

Apakah 2,5 × 150 = 375 m³/hari berarti semua bak harus menerima volume 375 m³ setiap hari?

▼ Lihat pembahasan

Tidak. Angka itu laju puncak ekuivalen. Volume harian berasal dari integral hidrograf, sedangkan saluran, ambang, dan alat tertentu diperiksa pada laju puncak. Bioreaktor juga memerlukan beban dan variasi waktu, sehingga pemilihan debit harus mengikuti mekanisme pengendali.

Tugas keluaran: lengkapi tabel debit minimum, rata-rata, maksimum harian, puncak jam, kondisi basah, dan aliran balik. Pada tiap baris tuliskan sumber, periode, batas sistem, serta unit yang dikendalikan. Lampirkan kurva ekualisasi dan satu skenario ketidakpastian.

Referensi dan materi terintegrasi

- **[R1]** Von Sperling & Chernicharo (2005), *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*, Volume One, Bab 2.1, hlm. 11–29 (debit). Koleksi sumber.
- **[R3]** Ditjen Cipta Karya, Kementerian PUPR (2018), *Buku A: Panduan Perencanaan Teknik Terinci Sub-sistem Pelayanan dan Sub-sistem Pengumpulan*. Cakupan buku adalah pelayanan dan pengumpulan; tidak disebut sebagai panduan lengkap desain reaktor biologis. PDF koleksi pemilik.
- **[D1]** Pemakaian air: USEPA (2002), Bab 3, hlm. 3-2–3-3, Tabel 3-1. PDF sumber yang diperiksa. Nilai perumahan AS bukan standar kebutuhan air Indonesia.
- **[D2]** Faktor pengembalian: Pemerintah India (2023), jawaban Lok Sabha No. 1195, hlm. 1. Dokumen resmi. Dipakai untuk menelusuri pernyataan estimasi 80%, bukan untuk mengklaim seluruh manual CPHEEO telah diperiksa.
- **[D3]** Faktor puncak: EPD Hong Kong (2005), *GESF Version 1.0*, Tabel T-5 PDF; Middlesex Centre (2018), *Infrastructure Design Standards*, bagian peaking factor PDF. Konteks fasilitas dan metode lokal dijelaskan pada materi pendamping.

Edisi 1 · 14 November 2026. Semua contoh survei dan hidrograf pada bagian ini adalah konstruksi pembelajaran kecuali dinyatakan sebagai angka sumber.