BUKU REFERENSI LANJUT · BAGIAN 5/7 · EDISI 1

Neraca, hidraulika, kinetika, dan transfer oksigen

Menurunkan persamaan penghubung sebelum menggunakannya pada ukuran unit.



Ilustrasi konseptual · Higgsfield

Tujuan dan peta persamaan

Empat kelompok persamaan menyatukan desain IPAL: konservasi massa, aliran dan energi, laju reaksi, serta transfer antarfase. Menetapkan volume dari waktu tinggal saja mengabaikan sebagian kelompok tersebut. Bagian ini menurunkan hubungan dasarnya, memperlihatkan contoh Griya Asri, dan menjelaskan kapan model sederhana tidak memadai.

Keluaran yang diharapkan berupa lembar model: batas sistem, variabel keadaan, masukan, persamaan, parameter, satuan, asumsi, dan cara memeriksa hasil. Ini menjadi jembatan menuju pemodelan dinamis serta CFD kelak, tanpa menyebut perhitungan lumped-parameter sebagai simulasi medan aliran tiga dimensi.

5.1 Neraca massa umum

Untuk zat tertentu, perubahan massa di dalam volume kontrol sama dengan masuk dikurangi keluar, ditambah pembentukan bersih akibat proses. Konsentrasi harus didefinisikan: substrat, amoniak, biomassa, atau padatan total memerlukan persamaan yang berbeda. Padatan yang mengendap bukan hilang dari neraca seluruh instalasi; ia berpindah ke kompartemen lumpur.

$$\frac{d(VC)}{dt} = \sum Q_i C_i - \sum Q_o C_o + rV$$

Jika V dalam m³, Q m³/hari, dan C kg/m³, setiap suku mempunyai satuan kg/hari. Bila C memakai mg/L, konsistenkan semua suku sebelum mengubah hasil menjadi kg. Untuk volume tidak tetap, turunan d(VC)/dt = V dC/dt + C dV/dt; mengabaikan suku kedua saat level berubah dapat menghasilkan kesalahan.

Untuk reaktor tercampur sempurna, konsentrasi keluar sama dengan konsentrasi di reaktor. Ini asumsi hidrodinamika, bukan sifat yang selalu dipenuhi oleh bak nyata. Zona mati, aliran pintas, dan stratifikasi dapat membuat waktu kontak efektif jauh berbeda dari V/Q [R1, Bab 8].

5.2 HRT dan model reaksi orde satu

Waktu tinggal hidraulis nominal adalah volume efektif dibagi debit yang dinyatakan pada batas tersebut. HRT dapat memakai debit bersih atau total dengan resirkulasi, sehingga definisi harus menyertai angka. Bagi lintasan keseluruhan proses dengan resirkulasi, jangan menyamakan waktu satu lintasan dengan umur molekul air sebelum keluar dari sistem.

$$\theta = \frac{V}{Q}$$

Contoh V 37,5 m³ pada Q 6,25 m³/jam memberi HRT 6 jam. Jika debit puncak 15,625 m³/jam melewati volume sama, HRT nominal sesaat turun menjadi 2,4 jam. Efisiensi saat puncak tidak dapat diperkirakan hanya dengan mempertahankan persentase yang dihitung pada rata-rata.

Untuk reaksi hilangnya substrat orde satu r = −kC pada keadaan tunak, neraca CSTR memberi hubungan berikut. Model plug flow ideal mempunyai bentuk eksponensial berbeda.

$$C_{\mathrm{CSTR}} = \frac{C_0}{1 + k\theta}, \qquad C_{\mathrm{PFR}} = C_0 e^{-k\theta}$$

Misalkan k = 2 hari⁻¹ dan θ = 0,5 hari, dipilih hanya untuk ilustrasi. CSTR menyisakan 50% konsentrasi awal, PFR ideal 36,79%. Tidak berarti bak bersekat pasti mencapai hasil PFR; dispersi, pencampuran, distribusi inlet, dan kondisi reaksi harus diperiksa. Model N tangki CSTR identik seri mempunyai $C/C_0 = (1 + k\theta/N)^{-N}$, mendekati PFR saat N sangat besar pada total θ tetap.

5.3 Kinetika biomassa dan SRT

Pertumbuhan spesifik dapat dibatasi substrat, oksigen, suhu, pH, atau inhibitor. Bentuk Monod berikut menyatakan ketergantungan pada satu substrat pembatas. Bentuk ini tidak dengan sendirinya cukup untuk seluruh komunitas mikroba atau semua rentang limbah.

$$\mu = \mu_{\max}\frac{S}{K_S + S}, \qquad \mu_{\mathrm{net}} = \mu - b$$

$$\theta_c = \frac{\sum V_i X_i}{Q_w X_w + Q_e X_e}$$

SRT memperhitungkan lumpur buang dan padatan efluen; RAS bukan keluaran akhir sistem. Pada pendekatan tunak sederhana untuk populasi yang bersangkutan, syarat retensinya berhubungan dengan 1/θc = μnet. Nilai minimum teoritis tidak langsung menjadi SRT desain: variasi suhu/beban, ketidakpastian parameter, dan keselamatan operasi memerlukan margin yang dijelaskan [R2, Bab 2 dan 6].

Contoh inventori 180 m³ × 3 kg/m³ = 540 kg MLSS. Bila lumpur keluar bersih 27 kg/hari pada basis padatan yang sama, SRT = 20 hari. Jika 4,5 kg/hari padatan efluen sebelumnya terlupakan dan WAS tetap 27, SRT sebenarnya 540/31,5 = 17,14 hari. Ini dapat relevan bagi nitrifier yang membutuhkan retensi lebih tinggi daripada penghilangan karbon pada kondisi tertentu.

F/M memakai beban makanan dan massa biomassa dengan basis yang dinyatakan. Menggunakan MLSS 3.000 mg/L ketika kriteria sebenarnya berbasis MLVSS akan mengubah hasil. Untuk beban BOD ke biologi 42 kg/hari, V 180 m³, dan **asumsi** MLVSS 2,25 kg/m³, F/M = 42/(180 × 2,25) = 0,1037 kg BOD/(kg MLVSS·hari). Angka itu adalah pemeriksaan contoh, bukan pengganti desain nitrifikasi.

$$F/M = \frac{Q S_0}{V X_v}$$

5.4 Suhu dan parameter hasil kalibrasi

Hubungan empiris koreksi suhu sering ditulis kT = k20 θT−20. Koefisien θ di sini faktor koreksi suhu, berbeda dari simbol HRT. Gunakan subskrip atau kamus simbol agar pembaca tidak keliru. Parameter harus berasal dari proses dan rentang suhu yang sesuai; jangan menyalin satu koefisien bagi nitrifikasi, pertumbuhan heterotrof, dan transfer oksigen sekaligus.

$$k_T = k_{20}\,\vartheta^{T-20}$$

Suhu kasus 27 °C bukan bukti suhu minimum sepanjang tahun. Desain ketahanan nitrifikasi perlu kondisi dingin yang relevan, beban, dan strategi operasi. Kalibrasi memilih parameter agar model cocok dengan data; validasi menguji kemampuan model pada data lain yang tidak digunakan untuk kalibrasi. Mengubah parameter sampai satu hasil sesuai target bukan validasi.

5.5 Transfer oksigen dan kebutuhan udara

Oksigen yang diperlukan reaksi tidak sama dengan oksigen yang ditiupkan blower. Sebagian oksigen dalam gelembung tidak pindah ke air. Laju perpindahan bergantung driving force, ukuran gelembung, kedalaman, karakter air, konsentrasi DO, serta kondisi alat.

$$\frac{dC_O}{dt} = k_L a(C_O^* - C_O) - OUR$$

kLa bersatuan waktu⁻¹; C* adalah konsentrasi kesetimbangan pada kondisi yang dinyatakan; OUR merupakan laju konsumsi oksigen per volume. Pengujian air bersih dan lapangan limbah memerlukan koreksi yang sesuai. Faktor alpha, beta, suhu, elevasi, fouling, dan konsentrasi DO tidak dapat disatukan menjadi klaim efisiensi tetap tanpa konteks [R1, Bab 11].

Contoh sederhana memakai beban oksigen karbon **asumsi latihan** 1,10 kg O_2 per kg BOD dihilangkan pada biologi. Bila BOD biologis dihilangkan dari 42 menjadi 4,5 kg/hari, kebutuhan karbon 41,25 kg O_2/hari. Tambahan nitrifikasi ideal dari Bagian 3 adalah 20,57, sehingga total contoh 61,82 kg O_2/hari. Pendekatan berbasis yield dan peluruhan bisa memberi nilai berbeda dan lebih terurai; jangan menambahkan kedua pendekatan karbon sekaligus.

Dengan **asumsi** udara mengandung 0,278 kg O_2 per m³ pada kondisi acuan yang dinyatakan dan efisiensi transfer lapangan 12%, debit udara rata-rata menjadi sekitar 77,22 m³/jam. Angka ini untuk pengajaran dan belum spesifikasi blower. Penentuan kondisi normal/aktual, tekanan hidrostatik, rugi pipa, kurva alat, pembagian diffuser, puncak OUR, turndown, dan cadangan alat tetap diperlukan.

$$Q_{\text{air}} = \frac{AOR}{24\,\rho_{O_2,\text{air}}\,E_{\text{field}}}$$

5.6 Hidraulika dan garis energi

Debit dalam pipa berhubungan dengan luas penampang dan kecepatan. Persamaan energi menghubungkan elevasi, tekanan, dan kecepatan dengan penambahan energi pompa serta kehilangan energi. Air mengalir sesuai beda energi dan kondisi batas; panah pada gambar tidak memaksa aliran melewati elevasi yang tidak tersedia.

$$Q = Av, \qquad H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

$$h_f = f_D \frac{L}{D}\frac{v^2}{2g}, \qquad h_m = \sum K \frac{v^2}{2g}$$

fD adalah faktor gesekan Darcy, bukan Fanning; beda konvensi memberi faktor empat. Nilai K bergantung fitting dan konfigurasi, bukan daftar angka yang dapat dipakai tanpa geometri. Pada aliran saluran terbuka, kemiringan, kekasaran, kedalaman, serta kemungkinan backwater perlu dianalisis dengan model yang sesuai; rumus pipa penuh tidak otomatis berlaku pada pipa sebagian terisi.

Sebagai contoh pipa penuh D = 0,10 m pada Q puncak 0,00434028 m³/s memberi v sekitar 0,553 m/s. Untuk L 20 m, fD 0,025 dan ΣK 5 sebagai asumsi, h mayor sekitar 0,078 m dan minor 0,078 m, total 0,156 m. Nilai tersebut belum mencakup kehilangan pada unit, ambang, saringan kotor, dan kondisi penerima. Diameter ini **contoh perhitungan**, bukan rekomendasi pipa final Griya Asri.

5.7 Pemeriksaan model dan latihan

BR05-01 · SRT dengan padatan efluen

Inventori padatan 540 kg, WAS 22,5 kg/hari, dan padatan efluen 4,5 kg/hari. Berapa SRT?

▼ Lihat pembahasan

SRT = 540/(22,5 + 4,5) = 20 hari. Mengabaikan padatan efluen memberi 24 hari dan melebihkan retensi. Pastikan semua massa memakai basis padatan yang sama dan inventori pada unit lain ditambahkan bila signifikan.

BR05-02 · HRT saat debit naik

Volume 180 m³ pada debit 150 m³/hari mempunyai HRT berapa? Apa yang terjadi jika Q naik 20% dan volume tetap?

▼ Lihat pembahasan

Awalnya 1,2 hari atau 28,8 jam. Sesudah Q menjadi 180 m³/hari, HRT menjadi 1 hari atau 24 jam. Jika konsentrasi masuk tetap, beban juga naik 20%; penilaian harus mencakup hidraulika dan biologi, bukan HRT saja.

Tugas keluaran: pilih satu unit dan tulis persamaan dengan semua satuan, kondisi batas, dan parameter. Periksa konservasi pada kondisi tunak, respons ketika Q nol/naik, serta batas model. Bandingkan dengan hitungan manual sebelum memakai hasil untuk dimensi.

Referensi bagian ini

- **[R1]** Von Sperling & Chernicharo (2005), *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*, Volume One, Bab 8 (hlm. 319–366), 9 (367–420), dan 11 (457–491). PDF koleksi. Neraca, hidraulika reaktor, kinetika dan aerasi.
- **[R2]** Von Sperling (2007), *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*, Bab 2.2–2.10 (hlm. 19–54), 3 (68–76), 6.3 (127–139), dan 11 (223–235). PDF koleksi. SRT, produksi lumpur, oksigen dan kendali proses.

Edisi 1 · 14 November 2026. Parameter numerik yang diberi label asumsi adalah contoh penulis; bukan kriteria wajib dari halaman sumber. Model aplikasi saat ini menggunakan penyederhanaan pra-rancangan dan bukan pengganti verifikasi model biologis dinamis atau CFD.