BUKU REFERENSI LANJUT · BAGIAN 7/7 · EDISI 1

Integrasi instalasi, hidraulika, lumpur, dan keandalan

Memeriksa seluruh aliran dan kondisi operasi sebelum hasil dibawa ke model, CFD, dan DED.



Ilustrasi konseptual · Higgsfield

Tujuan dan hasil akhir bagian 1–7

Ukuran unit yang terlihat wajar belum tentu membentuk instalasi yang dapat bekerja. Integrasi memeriksa apakah air dapat mengalir, lumpur dapat dikendalikan, beban samping tertangani, alat memiliki kapasitas nyata, dan pengelola dapat merespons gangguan. Bagian ini menyatukan Griya Asri menjadi paket pra-rancangan dengan temuan terbuka yang dapat ditelusuri.

Hasil akhirnya meliputi diagram alir proses dan padatan, neraca air/massa, profil hidraulis, daftar utilitas, matriks operasi normal–gangguan, serta register verifikasi. Paket tersebut menjadi dasar tahap berikutnya: model proses yang dikalibrasi, kajian CFD pada persoalan aliran yang jelas, dan DED yang diperiksa. Buku bagian 1–7 tidak mengklaim menyelesaikan ketiga tahap lanjut itu secara otomatis.

7.1 Diagram proses dan penomoran aliran

Rangkaian utama adalah **SR → PM → BP → PA → AE → PK → DS → BU → penerima**. Jalur lumpur berasal dari PA dan WAS pada sistem AE–PK menuju pengentalan/penanganan yang ditentukan, lalu PL. RAS dari PK kembali ke AE. Filtrat PL dikumpulkan untuk pengembalian terkendali. Sampah saringan serta scum/lemak mempunyai jalur terpisah dari lumpur biologis.

Aliran	Asal–tujuan	Data yang harus diketahui
F01	Rumah/jaringan → inlet	Q, beban, variasi, kondisi hujan
F02	Primer → aerasi	BOD/COD/TSS terukur/hasil neraca
F03	Aerasi → clarifier	Q + RAS dan konsentrasi mixed liquor
F04	Clarifier → aerasi (RAS)	Debit, konsentrasi, kendali blanket
F05	WAS → pengelolaan lumpur	Massa kering, volume, jadwal
F06	Primer → pengelolaan lumpur	Massa, konsentrasi, frekuensi kuras
F07	Filtrat → inlet yang dipilih	Q sesaat, COD/N, jadwal
F08	Pengolahan akhir → titik penaatan	Q, mutu, residu disinfektan

Nomor aliran membantu memeriksa apakah satu cabang terlupakan atau dihitung dua kali. Bedakan aliran kontinu dari batch. Mengembalikan filtrat selama satu jam dapat menimbulkan beban sesaat jauh lebih besar daripada pembagian rata-rata 24 jam. Neraca rata-rata saja tidak menangkap dampak ini.

7.2 Menutup neraca air

Pada batas seluruh instalasi, RAS hilang dari persamaan karena internal. Air lumpur yang keluar, air layanan, hujan yang benar-benar masuk proses, serta penguapan yang signifikan tetap harus dicatat. Untuk pra-rancangan, suatu komponen boleh diabaikan jika alasan dan besarnya dinyatakan; bukan karena tidak terlihat pada diagram.

$$Q_{\text{raw}} + Q_{\text{external}} = Q_e + Q_{\text{sludge,out}} + Q_{\text{other,out}} + \frac{dV}{dt}$$

Contoh sederhana dengan lumpur primer dan WAS total 45 kg DS/hari pada kadar 2%: Q mentah 150 m³/hari, lumpur basah keluar 2,25 m³/hari, tidak ada aliran eksternal lain, perubahan simpanan/penguapan diabaikan. Debit efluen bersih sekitar **147,75 m³/hari**. Ini contoh ekspor lumpur basah sebelum pengeringan. Jika lumpur ditiriskan dan sebagian filtrat kembali, hitung keluaran akhir sistem berdasarkan cake dan air yang benar-benar meninggalkan batas; jangan mengurangi volume basah lalu sekaligus mengurangkan filtrat internal.

Perhitungan mutu pada aplikasi dapat memakai pendekatan debit tetap 150 m³/hari. Untuk membandingkan dengan buku, sebutkan penyederhanaan ini. Neraca lanjutan boleh lebih rinci, tetapi hasilnya tidak harus dipaksa identik dengan model yang mengabaikan aliran kecil. Yang harus sama adalah data, definisi, dan jejak alasannya.

7.3 Menutup neraca padatan dan menetapkan WAS

Ambil contoh inventori MLSS aerasi 540 kg dan SRT target **asumsi** 20 hari. Laju padatan keluar total yang diperlukan menurut neraca inventori adalah 27 kg/hari. Bila padatan efluen diambil 4,5 kg/hari sebagai pendekatan, WAS harus 22,5 kg/hari pada basis yang sama. Untuk konsentrasi WAS 8 kg/m³, debit WAS sekitar 2,8125 m³/hari.

$$P_{\text{out}} = \frac{M_X}{\theta_c}, \qquad Q_w = \frac{M_X/\theta_c - Q_e X_e}{X_w}$$

Pendekatan memakai Qe 150 m³/hari untuk memperoleh 4,5 kg/hari sengaja dinyatakan. Pada neraca akhir dengan Qe berbeda, perbarui hasilnya. Jika pembilang menjadi negatif, asumsi inventori/SRT/efluen tidak konsisten untuk WAS positif. Jangan mengganti hasil negatif dengan nol tanpa mendiagnosis sebabnya.

Produksi lumpur biologis perlu diperiksa terpisah dari laju pembuangan yang diinginkan. Pada pendekatan sederhana, produksi bersih dapat dihubungkan dengan yield, substrat tersisih, dan peluruhan; padatan inert/residu harus ditambah pada basis yang tepat. Bila produksi tidak seimbang dengan pembuangan, inventori berubah dan keadaan tunak tidak tercapai [R2, Bab 2.9].

Untuk kapasitas pengering pada contoh yang sama, lumpur primer 22,5 kg DS/hari ditambah WAS 22,5 kg DS/hari menghasilkan **45 kg DS/hari**. Padatan efluen 4,5 kg/hari keluar melalui jalur air, sehingga tidak dijumlahkan lagi ke pengering. Desain final perlu memverifikasi produksi padatan terhadap pembuangan tersebut sebelum menganggap inventori tunak.

Dengan beban areal latihan 150 kg DS/m²/tahun, luas pengering matematis 109,5 m². Jika dipilih cadangan kapasitas 10%, massa desain menjadi 49,5 kg DS/hari dan luas 120,45 m². Cadangan ini adalah keputusan desain yang dinyatakan terpisah, bukan tambahan produksi lumpur yang tiba-tiba muncul pada neraca. Nilai pembulatan dan kapasitas sel saat pemeliharaan juga harus dicatat.

7.4 Beban balik dari pengolahan lumpur

Filtrat dapat membawa nitrogen amoniakal dan COD terlarut. Total beban menuju biologi merupakan beban dari aliran utama ditambah beban samping pada batas yang tepat. Resirkulasi internal tidak menciptakan massa baru pada batas seluruh instalasi, tetapi dapat mengubah bentuk zat dan menumpuk beban pada unit tertentu.

$$L_{\text{bio,in}} = \frac{Q_m C_m + Q_s C_s}{1000}$$

Contoh aliran samping **buatan** 2 m³/hari dengan NH_3-N 200 mg/L membawa 0,4 kg N/hari. Dibanding amoniak mentah 6 kg N/hari, tambahan lokal itu 6,67%. Bila seluruh 2 m³ dikembalikan selama satu jam, debit samping 2 m³/jam dan beban N 0,4 kg/jam dapat memberi gangguan sesaat. Penyimpanan dan pengaturan laju pengembalian layak dibandingkan sebelum memperbesar semua unit.

Jangan menambah 0,4 kg/hari pada neraca seluruh instalasi jika nitrogen tersebut berasal dari lumpur instalasi yang sama; ia adalah pengembalian internal. Pada neraca spesies, amonifikasi dapat mengubah nitrogen organik menjadi amoniak, sehingga bentuk nitrogen yang kembali berbeda dari yang meninggalkan jalur air.

7.5 Profil hidraulis pada keadaan kritis

Mulai dari kondisi batas hilir yang relevan, lalu telusuri kebutuhan elevasi ke hulu: penerima banjir, outlet terendam atau bebas, ambang, pipa, unit proses, saringan bersih/kotor, dan inlet. Gunakan satu datum. Elevasi invert pipa +6,40 m bukan otomatis muka air inlet +6,40 m; kedalaman dan energi kecepatan perlu ditambahkan sesuai kondisi.

Data kasus tanah +7,00 m, invert masuk +6,40 m, dan banjir penerima +4,60 m memberikan gambaran awal ruang elevasi, tetapi belum menetapkan seluruh HGL. Margin perlu dihitung pada debit puncak dan kondisi buruk yang masuk akal. Periksa pula debit rendah, kemungkinan siphon/air lock, dan kebutuhan isolasi untuk pemeliharaan.

Kondisi	Perubahan yang diperiksa	Temuan yang dicari
Normal	Q rata-rata, alat bersih	Aliran stabil dan volume efektif
Puncak	Q puncak, RAS aktif	Kenaikan muka air, ambang, headloss
Saringan kotor	Bukaan efektif turun	Risiko luapan hulu dan alarm
Penerima banjir	Muka air hilir naik	Backwater, submergence, kebutuhan pompa
Satu jalur diisolasi	Luas/volume aktif berkurang	Kapasitas sisa dan prosedur pembatasan

Perubahan geometri pada gambar harus kembali ke lembar hitung: lebar saluran, bukaan baffle, elevasi pipa, tinggi ambang dan level kontrol saling memengaruhi. CFD dapat menelaah distribusi waktu tinggal atau arus lokal pada unit terpilih, tetapi kondisi batasnya

harus berasal dari neraca dan profil yang konsisten. Gambar panah atau animasi tanpa penyelesaian persamaan aliran tidak boleh disebut bukti CFD.

7.6 Lahan, utilitas, energi, dan akses

Luas tapak 756 m² harus mencakup struktur luar, akses operator, ruang angkat alat, gudang bahan, panel, blower, kendaraan lumpur, drainase hujan, dan kebutuhan ekspansi. Menjumlah luas permukaan air lalu membandingkannya dengan 756 dapat melebihkan ruang yang tersedia. Periksa panjang dan lebar secara terpisah: luas cukup tidak menjamin konfigurasi muat pada tapak sempit.

Untuk pompa, daya hidraulis berhubungan dengan debit dan total dynamic head. Gunakan debit dalam m³/s, densitas kg/m³, dan head m; hasil dibagi efisiensi untuk daya masukan. Motor dipilih dari kurva dan kondisi operasi, bukan dari pembulatan daya teoritis saja.

$$P_{\mathrm{in}} = \frac{\rho g Q H}{\eta_p \eta_m}, \qquad E_{\mathrm{day}} = \sum P_i t_i$$

Contoh pompa Q 0,00434028 m³/s, head 5 m dan efisiensi gabungan 0,50 memberi sekitar 0,426 kW masukan teoritis. Ini tidak menentukan ukuran motor komersial final atau kemampuan menangani padatan. Untuk blower, hubungan termodinamika serta kompresi memerlukan pendekatan berbeda; jangan memakai rumus pompa air tersebut langsung.

Energi spesifik dapat dilaporkan kWh/m³ dan kWh/kg BOD tersisih, dengan periode serta lingkup alat yang sama. Bila blower 2 kW berjalan 24 jam dan pompa 0,75 kW 8 jam, energi contoh 54 kWh/hari atau 0,36 kWh/m³ pada Q 150. Angka ini bukan hasil pemilihan alat Griya Asri; ia menunjukkan cara membangun neraca energi dari jadwal yang dapat diperiksa.

7.7 Keandalan dan pengendalian operasi

Redundansi perlu dinyatakan sebagai fungsi yang tetap tersedia saat satu komponen gagal. Dua pompa masing-masing 50% kapasitas tidak sama dengan satu kerja dan satu cadangan 100%. Dua bak yang selalu dipakai bersama tidak otomatis menyediakan

kapasitas penuh ketika salah satu dikuras. Analisis kapasitas sisa harus mempertimbangkan beban yang masih datang dan durasi pemulihan.

Kejadian	Respons yang direncanakan	Bukti/pengujian
Listrik padam	Alarm, sumber daya cadangan/penyimpanan sesuai analisis	Uji perpindahan dan lama ketahanan
Blower gagal	Alat/jalur cadangan, kendali beban dan pemulihan	Kapasitas udara pada tekanan aktual
RAS berhenti	Alarm, pemantauan blanket, prosedur pemulihan	Uji pompa dan pengendalian level
BOD tinggi	Cek sumber, OUR, DO, SRT dan kapasitas	Data berpasangan sebelum/sesudah
Amoniak tinggi	Cek suhu, SRT, DO, alkalinitas dan inhibisi	Uji nitrogen dan penelusuran proses
Lumpur tak terangkut	Ruang penyimpanan dan kontrak/rute penanganan	Kapasitas simpan, jadwal, tujuan sah

Tidak ada baris yang menjadikan bypass air mentah sebagai penyelesaian rutin. Tindakan darurat harus mengikuti kewajiban lingkungan dan rencana penanganan yang sesuai. Untuk kegiatan belajar, jelaskan konsekuensi teknis dan informasi yang perlu diketahui operator, tanpa memberi kesan bahwa label “darurat” meniadakan persyaratan.

7.8 Verifikasi terpadu dan batas hasil simulator

Verifikasi menghitung apakah persamaan dan implementasi diselesaikan dengan benar; validasi menilai apakah model cukup mewakili kenyataan untuk tujuan tertentu. Lakukan hitungan manual untuk beberapa titik, uji konservasi, cek satuan, dan uji ekstrem yang masuk akal. Setelah data operasi tersedia, bandingkan prediksi dengan data yang tidak dipakai menyesuaikan parameter.

Model native Studio IPAL memakai hubungan dan efisiensi sederhana untuk pra-rancangan. Jika hasil amoniak masih di atas sasaran, catat sebagai **temuan desain**. Jangan mengubah target, konsentrasi inlet, atau efisiensi tanpa dasar hanya agar seluruh indikator lulus. Pengembangan berikutnya perlu menghubungkan SRT, suhu, oksigen, alkalinitas, dan pengendapan dengan kinerja nitrogen yang dapat diuji.

Tiga materi debit yang sudah ada kini menjadi pendalaman Bagian 2; paket e-learning dasar tetap menjadi jalur pengantar. Buku ini menambahkan penalaran dan pemeriksaan, bukan menggantikan seluruh materi dasar atau mengubah data proyek tersimpan. Progres bacaan buku dan Review Web memakai akun pusat kelas Studio IPAL. Masukan kualitas materi tetap berbeda dari penilaian jawaban mahasiswa.

7.9 Latihan dan pembahasan

BR07-01 · Beban balik internal

Filtrat internal membawa 0,4 kg N/hari kembali ke inlet. Apakah ini sumber nitrogen baru pada batas seluruh instalasi?

▼ Lihat pembahasan

Tidak jika berasal dari lumpur instalasi yang sama. Ia menambah beban pada unit yang menerima aliran kembali, tetapi hilang sebagai aliran internal dalam neraca seluruh instalasi. Spesies nitrogen dapat berubah, sehingga neraca amoniak perlu dibedakan dari neraca nitrogen total.

BR07-02 · Kapasitas saat satu jalur berhenti

Dua kompartemen aerasi 90 m³ bekerja bersama pada beban 42 kg BOD/hari dan MLVSS 2,25 kg/m³. Apa yang terjadi pada F/M jika satu kompartemen dikuras dan seluruh beban tetap masuk?

▼ Lihat pembahasan

Awalnya F/M = 42/(180 × 2,25) = 0,1037 hari^{-1}. Dengan satu kompartemen, menjadi 42/(90 × 2,25) = 0,2074 hari^{-1}. HRT bersih juga turun setengah. Dua kompartemen tersebut tidak membuktikan redundansi penuh; kinerja kondisi pemeliharaan harus diperiksa.

Tugas akhir bagian 1–7: serahkan mandat, basis data, tabel beban, matriks alternatif, lembar persamaan, sembilan lembar unit R4, diagram aliran, neraca terpadu, profil hidraulis dan register temuan. Tandai setiap keluaran: telah dihitung, perlu data, perlu validasi, atau perlu pemeriksaan desain. Jangan menyebut paket siap konstruksi sebelum persyaratan tahap DED dipenuhi.

Referensi bagian ini

- **[R1]** Von Sperling & Chernicharo (2005), *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*, Volume One, Bab 5 (hlm. 244–278), 8.3 (327–329), dan 11 (457–491). PDF koleksi. Dasar jalur lumpur, neraca dan transfer oksigen.
- **[R2]** Von Sperling (2007), *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*, Bab 2.8–2.10 (hlm. 34–54), 4 (77–103), 11–12 (223–264). PDF koleksi. RAS/WAS, pengendapan, kendali dan diagnosis gangguan.
- **[R4]** Permen LH/BPLH 11/2025, lampiran dan kategori sebagaimana dibahas pada Bagian 1. Pemenuhan mutu memerlukan pembuktian yang sesuai, bukan hanya hasil model.

Edisi 1 · 14 November 2026. Seluruh contoh operasi/alat merupakan konstruksi pembelajaran. Daftar temuan terbuka merupakan bagian hasil belajar, bukan kekurangan yang disembunyikan dari pembaca.