BUKU REFERENSI LANJUT · BAGIAN 4/7 · EDISI 1

Pemilihan proses dan keputusan yang dapat diuji

Menyaring alternatif secara teknis, lalu membandingkan lahan, energi, biaya, dan operasi.



Ilustrasi konseptual · Higgsfield

Tujuan dan urutan keputusan

Pemilihan proses bukan lomba mencari efisiensi terbesar pada satu kolom. Alternatif harus sanggup mencapai sasaran, cocok dengan tapak, mempunyai jalur residu, dan dapat dijalankan pengelola. Bagian ini memakai lima rangkaian pada Studio IPAL untuk mengajarkan keputusan bertahap. Keluaran utamanya ialah alasan pemilihan R4, kondisi yang dapat menggugurkan pilihan tersebut, dan kebutuhan pembuktian yang dibawa ke desain unit.

Urutan yang digunakan adalah **saring kelayakan → samakan lingkup → bandingkan kinerja dan biaya → uji sensitivitas → dokumentasikan keputusan**. Metode multi-kriteria membantu menata preferensi, tetapi tidak mengubah alternatif yang gagal baku mutu menjadi layak hanya karena biaya atau lahannya lebih rendah.

4.1 Lima rangkaian pada satu basis kasus

Alternatif Studio IPAL	Fungsi utama yang dipelajari	Persoalan yang perlu diperiksa
R1: ABR–filter anaerobik	Retensi biomassa anaerobik dan penyisihan karbon	Amoniak, patogen, gas/bau, kebutuhan polishing
R2: septik–filter anaerobik	Pengendapan, penyimpanan lumpur, biofilm anaerobik	Pengurasan, akses, keterbatasan nitrifikasi
R3: biofilter	Biofilm dan transfer oksigen	Jenis media, distribusi, aerasi, lepasnya biofilm
R4: lumpur aktif	Aerasi, RAS/WAS, pemisahan biomassa	SRT, nitrifikasi, listrik, settleability, operator
R5: ABR–lahan basah	Kombinasi anaerobik dan media/tanaman	Lahan, hidraulika media, penyumbatan, nitrogen

Nama rangkaian adalah penunjuk konfigurasi aplikasi; kualitas keluaran tetap harus diperiksa dari unit dan asumsi yang dipakai. Pada proses anaerobik, bahan organik berubah antara lain menjadi gas dan biomassa. Penyisihan amoniak umumnya membutuhkan proses lain yang sesuai. Lahan basah juga tidak otomatis memberi nitrifikasi yang cukup hanya karena ditanami. Jenis aliran, ketersediaan oksigen, beban, dan media menentukan mekanismenya [R1, Bab 23–29].

Untuk membandingkan, tahan jumlah penghuni, batas aliran, karakteristik masukan, sasaran efluen, umur analisis, harga dasar, dan lingkup fasilitas tetap sama. Jika suatu alternatif membutuhkan polishing tambahan, biaya dan lahannya harus masuk. Membandingkan R4 lengkap dengan ABR tanpa disinfeksi dan tanpa jalur lumpur akan memberi hasil yang menyesatkan.

4.2 Gerbang kelayakan sebelum pembobotan

Bangun matriks kelayakan dengan status memenuhi, belum terbukti, atau gagal. “Belum terbukti” berbeda dari memenuhi. Misalnya, tidak adanya data daya listrik tidak membuktikan pasokan cukup; tidak adanya alkalinitas tidak membuktikan nitrifikasi dapat bertahan. Catat bukti yang diperlukan agar status berubah.

Gerbang	Pertanyaan Griya Asri	Konsekuensi keputusan
Mutu	Ada mekanisme untuk BOD, TSS, amoniak dan mikroba?	Tambah proses atau gugurkan konfigurasi
Hidraulis	Bisa lewat pada puncak dan banjir penerima?	Revisi elevasi, penampang, atau pompa
Ruang	Semua unit, akses, utilitas dan cadangan muat?	Jangan memakai luas air bak saja
Operasi	Operator, listrik, bahan, suku cadang tersedia?	Ubah teknologi atau tingkatkan kapasitas pengelola
Residu	Ada tempat pengambilan dan tujuan lumpur/lemak?	Rangkaian belum lengkap bila residu tak tertangani

R4 dipertahankan sebagai contoh buku karena memungkinkan pembelajaran keterkaitan proses yang kaya. Pilihan ini **bersyarat**, terutama terhadap pasokan listrik, operator, pengendalian lumpur, dan verifikasi amoniak. Jangan menurunkan NH_3-N inlet dari 40 mg/L agar indikator model menjadi hijau; tindakan itu mengganti masalah yang hendak diselesaikan.

4.3 Membaca efisiensi rangkaian

Efisiensi berturut-turut bekerja pada fraksi yang masih tersisa. Dua unit yang masing-masing menyisihkan 50% tidak memberi 100%, melainkan 75% total. Model sederhana ini berguna untuk penelusuran, tetapi tidak memperhitungkan perubahan biodegradabilitas, variasi beban, hambatan, ataupun pertumbuhan padatan biologis kecuali ditambahkan secara eksplisit.

$$C_n = C_0 \prod_{i=1}^{n} (1 - \eta_i), \qquad \eta_{\text{total}} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - \eta_i)$$

Contoh: pengendap primer menyisihkan BOD 30% dan tahap biologis menyisihkan 90% dari BOD yang diterimanya. Hasilnya 400 × 0,70 × 0,10 = **28 mg/L**. Angka 28 tampak di bawah target 30, tetapi margin hanya 2 mg/L. BOD partikulat dari lolosnya biomassa dapat mengubah BOD total keluar. Model harus menyatakan apakah konsentrasi yang dihitung merupakan BOD terlarut atau total [R2, Bab 2.6].

Pada COD, fraksi inert dapat membatasi penyisihan. Pada TSS, proses biologis dapat menghasilkan padatan baru. Pada amoniak, nitrifikasi mengubah spesies nitrogen, bukan semata “menghilangkan zat”. Karena itu satu efisiensi universal yang dipakai untuk semua parameter tidak mempunyai dasar mekanistik.

4.4 Biaya sepanjang umur dan lingkup fasilitas

CAPEX mencakup konstruksi, alat, instrumentasi, utilitas, akses, engineering, dan cadangan sesuai definisi estimasi. OPEX mencakup listrik, operator, bahan, perawatan, pengujian, pengangkutan residu, dan biaya penggantian yang ditempatkan pada waktunya. Lingkup dan tahun harga harus sama. Nilai yang belum disurvei diberi status estimasi, bukan harga penawaran pemasok.

$$LCC = C_0 + \sum_{t=1}^{N} \frac{C_{\text{op},t} + C_{\text{rep},t}}{(1+r)^t} - \frac{S_N}{(1+r)^N}$$

Gunakan tingkat diskonto riil untuk arus biaya harga konstan, atau tingkat nominal untuk arus dengan inflasi yang konsisten. Mencampur keduanya membuat perbandingan tidak sah. Nyatakan pula apakah tanah dan pajak termasuk. Nilai sisa tidak otomatis sama dengan harga beli alat.

Contoh matematis, bukan estimasi harga Griya Asri: alternatif A mempunyai C_0 Rp1,2 miliar dan OPEX Rp180 juta/tahun; B mempunyai C_0 Rp1,6 miliar dan OPEX Rp120 juta/tahun. Untuk 20 tahun dan r 6%, faktor anuitas sekitar 11,470. Tanpa penggantian dan nilai sisa, LCC A ≈ Rp3,265 miliar dan B ≈ Rp2,976 miliar. Alternatif dengan harga awal lebih rendah dapat mempunyai biaya siklus hidup lebih besar. Lengkapi contoh dengan skenario kenaikan tarif energi, penggantian blower, dan pengangkutan lumpur sebelum mengambil keputusan nyata.

4.5 Pembobotan, AHP, dan TOPSIS

Kriteria dapat mencakup lahan, energi, LCC, kebutuhan operator, ketahanan gangguan, dan potensi perluasan. Hindari menghitung hal yang sama dua kali: listrik sudah masuk LCC, sehingga bobot energi terpisah sebaiknya mempunyai alasan tambahan, misalnya ketahanan terhadap keterbatasan pasokan atau sasaran energi. Definisikan arah manfaat/biaya dan satuan setiap kriteria.

AHP membantu menata perbandingan kepentingan. Bobot yang dihasilkan menyatakan preferensi, bukan parameter reaktor. Dalam pemeriksaan konsistensi, bentuk dasar indeksnya adalah:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \qquad CR = \frac{CI}{RI}$$

RI bergantung ukuran matriks dan konvensi tabel yang digunakan. Ambang CR yang dipakai harus dinyatakan bersama metode; lolos konsistensi tidak berarti penilaian didukung data. Jika preferensi lahan jauh lebih penting daripada biaya tetapi biaya dinilai jauh lebih penting daripada energi dan energi jauh lebih penting daripada lahan, periksa kembali alasan perbandingannya.

TOPSIS mengukur kedekatan terhadap titik ideal dalam ruang kriteria yang dinormalisasi dan dibobotkan. Untuk implementasi jarak Euclidean yang umum, nilai kedekatan adalah:

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Nilai terbesar hanya terbaik untuk alternatif, data, normalisasi, serta bobot yang dimasukkan. Bila seluruh jarak nol, hasil tidak terdefinisi dan perlu penanganan; jangan memberi peringkat semu. Perubahan himpunan alternatif juga dapat mengubah hasil normalisasi. Buku mengajarkan pembacaan keputusan, sedangkan kode dan pilihan implementasi pada menu pemilihan harus diperiksa bila akan dijadikan bukti proyek.

4.6 Sensitivitas dan register keputusan

Uji perubahan yang dapat terjadi: tarif energi naik 25%, lahan efektif berkurang 20%, operator hanya tersedia sebagian hari, atau target nitrogen menjadi lebih ketat. Jika perubahan kecil membalik peringkat, laporkan keputusan sebagai sensitif. Jika sebuah alternatif tidak dapat memenuhi gerbang mutu, pembobotan biaya tidak boleh menyembunyikannya.

Untuk R4, register awal berbunyi: “Dipakai sebagai jalur utama buku; perlu membuktikan SRT nitrifikasi, kebutuhan oksigen, pemisahan lumpur, operasi saat listrik gagal, dan kesesuaian tapak.” Bagian 5 memberi dasar persamaan, Bagian 6 menghitung unit, dan Bagian 7 memeriksa interaksi. Pilihan baru diterima setelah temuan tersebut mempunyai tindak lanjut.

4.7 Latihan dan pembahasan

BR04-01 · Peringkat dan kelayakan

Alternatif anaerobik mendapat skor biaya tertinggi tetapi belum mempunyai tahap yang terbukti menurunkan amoniak. Bolehkah langsung dipilih?

▼ **Lihat pembahasan**

Belum. Lengkapi alternatif dengan proses yang dapat memenuhi sasaran, lalu hitung ulang biaya, lahan dan operasi pada lingkup yang sama. Jika mekanisme atau bukti kelayakan tetap tidak tersedia, alternatif tidak masuk pemeringkatan akhir yang layak.

BR04-02 · Efisiensi seri

Untuk BOD 400 mg/L, tahap pertama menyisihkan 30% dan tahap kedua 90% dari masukannya. Berapa keluar dan penyisihan total?

▼ **Lihat pembahasan**

Keluar 400 × 0,70 × 0,10 = 28 mg/L; penyisihan total 93%. Menjumlahkan 30% dan 90% menghasilkan 120% yang tidak bermakna. Hasil 28 tetap bersyarat pada definisi BOD, kondisi efisiensi, dan padatan keluar.

Tugas keluaran: buat satu matriks gerbang, satu matriks pembandingan, satu skenario sensitivitas, dan satu keputusan tertulis. Bedakan nilai ukur, estimasi pemasok, hasil model, dan preferensi pengambil keputusan.

Referensi bagian ini

- **[R1]** Von Sperling & Chernicharo (2005), *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*, Volume One, Bab 4.7 (hlm. 217–243), Bab 23–29 (659–818). PDF koleksi. Dasar pemilihan proses dan keterbatasan anaerobik.
- **[R2]** Von Sperling (2007), *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*, Bab 1 (hlm. 1–16), 2.6 (27–30), dan 6 (121–158). PDF koleksi.
- **[M1]** Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. Identitas metode untuk penelusuran; contoh preferensi buku adalah konstruksi penulis, tidak menyalin tabel RI atau studi kasus sumber.
- **[M2]** Hwang, C.L. & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer. Penerbit/DOI. Identitas metode TOPSIS; tidak diklaim sebagai validasi kode pemilihan pada aplikasi.

Edisi 1 · 14 November 2026. Contoh biaya adalah angka demonstrasi dan tidak boleh disalin ke RAB pengadaan tanpa survei harga serta lingkup yang jelas.