

Bedah Lanjutan Aplikasi Sikturah: Anatomi Simulator, Rumus 24 Indikator, dan Dua Aspek Perancangan NSGA-II

Dokumen pendamping diskusi teknis — 28 Agustus 2026 (mengacu implementasi aplikasi v0.5.0; pelengkap dokumen Metodologi)

Djoko Soeprijadi

Program Doktor Ilmu Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada

1. Anatomi Simulator — Matriks demi Matriks

Simulator adalah jantung aplikasi: setiap kandidat rencana (kromosom) diterjemahkan menjadi sembilan matriks berukuran N petak $\times$ 30 tahun, dibangun dalam urutan ketergantungan yang ketat. Urutan ini penting dipahami karena setiap matriks hanya bergantung pada matriks-matriks sebelumnya — sifat yang membuat seluruh proses dapat divektorisasi dan diuji per lapisan.

1. **cut_years** — hasil dekoding aturan W : bila tegakan awal sudah matang ($\text{umur} \geq \text{umur minimum opsi}$) atau petak berstatus FD, $W_1 = Y_1$; bila belum, $W_1 = (m - \text{umur awal}) + Y_1$; slot berikutnya berdurasi $D = m + Y$ karena tegakan baru mulai dari umur nol.
2. **cut** — matriks biner: bernilai 1 tepat pada tahun-tahun W yang berada dalam horizon 30 tahun; tebang yang jatuh melewati horizon tidak dieksekusi.
3. **option** — opsi MUK yang berjalan: opsi slot 1 berlaku sampai dan TERMASUK tahun tebangnya; opsi slot berikutnya mulai berlaku tahun SETELAH tebang.
4. **age** — umur tegakan: tahun 1 = umur awal; $\text{age}[t] = 1$ bila tahun sebelumnya ditebang, selainnya bertambah satu. Konsekuensinya tegakan tercatat pada UMUR PENUH di tahun tebang, dan baru menjadi umur 1 pada tahun berikutnya.
5. **cut_area / stock_area** — pada tahun tebang seluruh luas petak menjadi luas tebang dan luas berdiri nol; selainnya sebaliknya. Invarian $\text{cut} + \text{stock} = \text{luas petak}$ dijaga dan diuji otomatis.
6. **rdi** — kerapatan relatif: sebelum tebangan perdana memakai RDI lapangan dari data petak; setelah setiap tebangan memakai RDI pola dari opsi yang baru terpasang.
7. **stand_vol** — volume tegakan berdiri: kurva Chapman-Richards $V(u) \times \text{faktor bonita } f(SI) \times \text{luas} \times \text{RDI}$ (RDI "memotong" volume teoritis tegakan penuh).
8. **harvest_vol** — volume panen, hanya terisi di tahun tebang: $\text{volume pada umur penuh} \times \text{luas} \times \text{RDI}$.
9. **carbon** — stok karbon atas tanah dari $\text{volume berdiri} \times \text{kerapatan kayu} \times \text{BEF} \times \text{fraksi karbon}$ (parameter per jenis).

Anatomi Simulator Sikturah dan Rantai Penilaian - urutan pembangunan 9 matriks (N petak x 30 tahun)



Gambar 1. Anatomi simulator (kolom kiri, matriks 1–9) dan rantai penilaian (kolom kanan) hingga bermuara ke evaluasi BOCR/objektif pilar. Berkas Visio (.vsdx) yang dapat diedit disertakan terpisah.

1.1 Mengapa Konvensinya Harus Meniru Excel

1. **Alasan metodologis** — workbook Sikturah AlgGen adalah acuan yang divalidasi penulis dan promotor. Klaim "program menghitung sama dengan spreadsheet" tidak cukup dinyatakan, harus dibuktikan: golden test membekukan kromosom pada salinan workbook, membiarkan Excel menghitung penuh, lalu menuntut seluruh blok hasil (tahun tebang, keputusan tebang, umur, RDI — 6 petak $\times$ 30 tahun) direproduksi Python sel demi sel. Status saat ini: 100% identik.
2. **Proteksi regresi** — setiap perubahan simulator di masa depan langsung ketahuan bila menggeser satu sel pun dari data emas; uji dapat dijalankan ulang kapan saja.
3. **Konsekuensi numerik nyata** — titik paling halus ada pada konvensi umur: bila reset umur digeser satu tahun saja (reset di tahun tebang, bukan setelahnya), volume panen berubah sebesar riap pada umur daur — kesalahan sistematis yang menjalar ke karbon, pendapatan, seluruh skor indikator, dan akhirnya peringkat skenario. "Hampir sama" tidak cukup untuk disertasi.

Kasus tepi yang ditangani eksplisit: petak FD (tidak produktif) tidak menunggu umur minimum ($W_1 = Y_1$); tebang melewati tahun 30 tidak dieksekusi sehingga petak berdiri terus sampai akhir horizon; slot yang tidak pernah tercapai tidak berpengaruh pada hasil.

2. Rumus Mentah 24 Indikator dan Status Kalibrasinya

Kejujuran model menuntut tiap indikator dinyatakan terbuka: apa rumus implementasinya sekarang, dan apakah ia sudah riil, masih proxy, atau menunggu data. Tabel berikut adalah pemetaan lengkapnya.

Kode	Rumus nilai per tahun (implementasi)	Status
I1 Tutupan hutan	luas berdiri total / luas total	RIIL dari simulasi
I2 Karbon (tC/ha)	total karbon / luas total	RIIL; ambang sementara 60 (Artikel 120) s.d. kalibrasi tumbuh+karbon
I3 Keanekaragaman	jumlah jenis terpasang / 10	PROXY kasar
I4 Kualitas air DAS	1 – pangsa luas tebang tahunan	PROXY
I6 Areal HL & KPS	konstanta 0,30	STATIK — menunggu data tata ruang KPH
I24 Intensitas ekstraksi HHBK	konstanta 0,50	STATIK — data sadapan menyusul
I25 Mortalitas sumber HHBK	konstanta 0,04	STATIK — data PSP menyusul
I30 Tajuk pohon utama AF	RDI tertimbang areal agroforestri (0,6 bila tanpa AF)	PROXY dinamis
I32 Erosi/SOC	(1 – pangsa berdiri) + 0,2 $\times$ pangsa pola intensif	PROXY indeks lahan terbuka
I33 Kondisi tegakan tinggal	RDI tertimbang luas berdiri	RIIL dari simulasi
I34 Kesesuaian opsi berjalan	pangsa luas dengan kelas kesesuaian ≥ 2	RIIL dari simulasi

Kode	Rumus nilai per tahun (implementasi)	Status
I45 Potensi gangguan	$0,15 + 0,5 \cdot \text{wisata} + 0,3 \cdot \text{tebangan} + 0,2 \cdot \text{intensif}$	PROXY komposit
I36 Kapasitas finansial	$\min(\text{pendapatan kumulatif} / \text{biaya kumulatif}; 2)$	RIIL strukturnya; harga/biaya default kalibrasi
I40 Permintaan HHBK	konstanta 0,70	SEMI — ganti DemandProjection riil
I41 Permintaan wisata	$0,50 + \text{pangsa areal wisata}$	SEMI proxy
I42 Permintaan karbon	konstanta 0,60	SEMI — IDX Carbon menyusul
I18 Kepatuhan RKUPH	konstanta 0,85	STATIK (= ambang)
I22 Adaptasi iklim	konstanta 0,75	STATIK (= ambang)
I35 SDM operasional	ramp 0,60 → 1,00 dalam 5 tahun	SEMI — lintasan kapasitas skenario
I37 Teknologi & alat	ramp 0,50 → 0,90	SEMI
I38 Infrastruktur	ramp 0,50 → 0,90	SEMI
I39 Kelembagaan	ramp 0,60 → 0,90	SEMI
I43 Keselarasan lintas sektor	konstanta 0,80	STATIK (= ambang)
I44 Kontribusi pangan	pangsa areal pola agroforestri pangan	PROXY areal (target Artikel: ≥ 1 ton/ha tumpangsari)

Tabel 1. Rumus implementasi dan status 24 indikator strong.

2.1 Rekapitulasi

- **5 riil penuh dari simulasi:** I1, I2, I33, I34, dan I36 (strukturnya — seluruh harga/biaya masih default kalibrasi).
- **7 proxy dinamis** yang rumusnya perlu ditinjau/disahkan penulis: I3, I4, I30, I32, I45, I44, I41.
- **6 statik** menunggu data per KPH, sengaja dipatok tepat di ambangnya agar netral terhadap optimasi: I6, I24, I25, I18, I22, I43.
- **6 semi-dinamis** berupa lintasan/ramp yang preskripsinya per skenario: I35, I37, I38, I39, I40, I42.
- Semua dapat diganti TANPA menyentuh kode: konstanta dan ambang lewat sheet Ambang template kalibrasi; lintasan permintaan lewat DemandProjection; tiap rumus proxy adalah satu fungsi kecil pada satu modul.

3. Mengapa Bobot Antar-Pilar Sengaja Tidak Dipakai

1. Bila tiga pilar digabung dengan bobot (misal $0,4 \cdot \text{ECO} + 0,35 \cdot \text{ENV} + 0,25 \cdot \text{SOC}$), optimasi runtuh menjadi SATU objektif: hasilnya satu titik "terbaik", dan kurva pertukaran antar kelestarian — pertanyaan inti disertasi — justru tersembunyi.
2. Bobot antar-pilar adalah preferensi pengambil keputusan. Menanamnya SEBELUM optimasi berarti keputusan politik mendahului analisis — persis kritik yang dahulu memicu harmonisasi metodologi pada proposal REVISI2.

3. Solusinya artikulasi preferensi a-posteriori: NSGA-II menyajikan seluruh front Pareto lebih dulu, pengambil keputusan memilih belakangan, dibantu DScore, WScore, dan TVC per solusi. Bobot AHP tetap dipakai DI DALAM pilar karena di sana ia mewakili penilaian pakar atas kepentingan relatif indikator sejenis — bukan pertukaran antar pilar.
4. Bonus teknis: tiga objektif adalah wilayah kerja ideal NSGA-II — front masih dapat divisualisasikan dan crowding distance masih efektif; di atas 4–5 objektif crowding melemah dan literatur beralih ke NSGA-III.

4. Memilih Ukuran Populasi dan Generasi untuk KPH Riil

- Dimensi masalah tumbuh linear: $n_{\text{var}} = 7 \times \text{jumlah petak}$ (3 gen opsi + 4 gen tunda per petak). KPH riil beratus petak → ribuan variabel (300 petak = 2.100 gen).
- Pedoman praktis: populasi 100–200 untuk ratusan petak (populasi 60 kehabisan keragaman pada ruang sebesar itu); generasi 300–1.000; namun patokan sebenarnya adalah KONVERGENSI, bukan angka mati — hentikan bila komposisi front stabil selama puluhan generasi.
- Estimasi biaya dari baseline terukur: 6 petak $\pm$ 1.000 evaluasi/detik → 300 petak $\pm$ 20 evaluasi/detik → run $200 \times 500 = 100.000$ evaluasi $\pm$ 1,4 jam per KPH — layak untuk run riset, dapat dipercepat paralelisasi.
- Empat teknik yang disarankan saat data riil masuk: (a) warm start — sisipkan kromosom preset S1–S4 ke populasi awal; (b) kencangkan kendala TVC bertahap (longgar dulu, ketat setelah populasi layak); (c) ulangi 5–10 run dengan seed berbeda untuk menguji kestabilan front — tiap run tetap reproduksibel karena seed tercatat; (d) bila perlu, dekomposisi per bagian hutan (BH) lalu gabungkan.

5. Penutup

Dengan bedah ini, seluruh rantai teknis aplikasi telah dibuka tuntas: representasi keputusan dan dekodungnya, sembilan matriks simulator beserta alasan konvensi paritas-Excel, rumus mentah ke-24 indikator berikut status kejujurannya (riil / proxy / statik / semi), operasionalisasi empat merit BOCR, mekanika lengkap constrained NSGA-II, dan pedoman penskalaan menuju data KPH riil. Bagian yang masih menunggu penulis seluruhnya bersifat parameter — bukan struktur — dan semuanya dapat diisi melalui template kalibrasi tanpa mengubah kode.

Dokumen ini melengkapi (bukan menggantikan) dokumen Metodologi_Sikturah_NSII. Flowchart pendamping tersedia sebagai berkas Visio yang dapat diedit: Flowchart_Anatomi_Simulator_2026-08-28.vsd.