

Metodologi dan Tahapan Analisis Sikturah: Simulasi Dinamika Tegakan, Penilaian BOCR Dinamis, dan Optimasi Penjadwalan Multi Usaha Kehutanan dengan Constrained NSGA-II

Dokumen teknis pendamping disertasi — versi 1.0, 26 Agustus 2026 (mengacu implementasi aplikasi v0.4.0)

Djoko Soeprijadi

Program Doktor Ilmu Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada

1. Pendahuluan dan Kedudukan dalam Disertasi

Dokumen ini menguraikan secara lengkap dan terstruktur metodologi analisis **Sikturah** (Simulasi–Optimasi Penjadwalan Multi Usaha Kehutanan), yaitu mesin komputasi Studi 3 disertasi, dari tahap penyiapan data mentah sampai keluaran akhir analisis NSGA-II. Sikturah berdiri di puncak pipeline tiga studi: **Studi 1** menghasilkan 24 indikator strong sustainability beserta bobot hibrida ISM-MICMAC + AHP ($\alpha = 0,6$) dan ambang operasionalnya; **Studi 2** membangun model simulasi–MCDA dengan penilaian BOCR dinamis; **Studi 3** memakai fungsi evaluasi dinamis tersebut sebagai objektif optimasi penjadwalan opsi MUK per petak dengan constrained NSGA-II (Deb dkk., 2002).

Seluruh uraian mengikuti implementasi yang sudah berjalan (aplikasi web + API v0.4.0, teruji 18 uji otomatis, termasuk uji paritas penuh terhadap workbook Excel acuan). Nilai parameter yang masih default auto-generated ditandai; semuanya dapat diganti melalui template kalibrasi tanpa mengubah struktur model.

2. Gambaran Umum Alur Analisis

Analisis berjalan dalam sembilan tahap berurutan. Tahap 1–2 adalah penyiapan data; tahap 3–6 adalah mesin evaluasi (simulasi + penilaian); tahap 7–8 adalah optimasi; tahap 9 adalah keluaran dan interpretasi.

1. **Penyiapan data** — pengisian template Excel (data petak, katalog 100 opsi MUK, matriks kesesuaian, proyeksi permintaan).
2. **Kalibrasi** — pengisian template kalibrasi (tabel tegakan → fit Chapman-Richards, harga/biaya, parameter karbon, ambang indikator).
3. **Pembacaan dan validasi data** — parsing workbook menjadi struktur data model.
4. **Representasi keputusan** — pengkodean kromosom (X, Y) per petak.
5. **Simulasi dinamika tegakan** — dekoding kromosom menjadi jadwal tebang, lalu proyeksi tahunan 30 tahun (opsi, umur, luas, RDI, volume, karbon, arus kas).
6. **Penilaian** — 24 indikator → skor 1–5 berjangkar ambang → BOCR dinamis empat merit (DScore, WScore, TVC) dan agregat tiga pilar.
7. **Optimasi NSGA-II** — pencarian populasi jadwal Pareto-optimal tiga objektif dengan kendala kesesuaian tapak dan (opsional) ambang TVC.
8. **Seleksi solusi** — pemeriksaan front Pareto, TVC per solusi, dan jadwal per petak.

9. **Pelaporan** — workbook hasil, tabel/grafik aplikasi, dan bahan analisis lanjutan.

3. Tahap 1–2: Data Masukan, Template, dan Kalibrasi

3.1 Template data (Sikturah AlgGen terkoreksi)

Data masukan dihimpun dalam satu workbook Excel yang sekaligus menjadi antarmuka pengguna dan acuan verifikasi (golden standard). Sheet inti:

Sheet	Isi	Peran dalam model
Existing SDH	Petak: kode, luas (ha), jenis, umur awal, kelas bonita/SI, status produktif (P/FD), opsi eksisting	Kondisi awal tiap unit kelola
MUK Opt Description	Katalog 100 opsi MUK = 10 pola $\times$ 10 jenis; kode = (pola-1) $\times$ 10 + jenis; daur, umur tebang minimum, RDI pola, kelas SI minimum, deskripsi	Ruang keputusan gen X
EstimatorTegakan	Parameter estimator per opsi (100 baris)	Parameter pertumbuhan/hasil per opsi
Suitability	Matriks kesesuaian petak $\times$ opsi (kelas 1–3)	Kendala kelayakan tapak
DemandProjection	Proyeksi permintaan per komoditas per tahun	Lintasan indikator permintaan (semi-dinamis)
MUK Dynamic	Mesin simulasi 30 tahun per petak (kromosom, jadwal, umur, luas, RDI)	Acuan paritas simulator (golden test)

3.2 Template kalibrasi

Parameter biologi-ekonomi dipisahkan dari struktur model melalui workbook kalibrasi tersendiri dengan lima sheet isian: **YieldTable** (titik tabel tegakan Perhutani per jenis; kurva Chapman-Richards difit otomatis, lihat §5.2), **ParamTumbuh** (alternatif: parameter V_{max} , k , p langsung), **HargaBiaya** (harga kayu per jenis; biaya tanam per ha; pendapatan agroforestri per ha per tahun; overhead per ha per tahun), **Karbon** (kerapatan kayu, BEF, fraksi karbon per jenis), dan **Ambang** (τ , aspirasi, batas gagal, bobot, dan merit BOCR untuk 24 indikator). Prioritas parameter tumbuh: YieldTable > ParamTumbuh > default. Baris contoh dan sheet yang tidak diubah diabaikan dengan aman.

4. Tahap 3–4: Struktur Data dan Representasi Kromosom

4.1 Notasi

Misalkan N = jumlah petak ($i = 1 \dots N$), P = horizon perencanaan (30 tahun; $t = 1 \dots P$), S = jumlah slot rotasi per petak (4). Tiap petak i memiliki luas A_i , jenis awal, umur awal u_i^0 , kelas bonita SI_i , status stocking (P/FD), RDI awal, dan opsi eksisting E_i . Tiap opsi MUK j memiliki jenis, daur, umur tebang/panen minimum $m(j)$, dan RDI pola $r(j)$.

4.2 Kromosom

Satu solusi (individu) dikodekan sebagai pasangan matriks integer (X, Y) berdimensi $N \times S$:

- $X[i, s]$ = kode opsi MUK yang dijalankan petak i pada slot rotasi ke- s ($1 \dots 100$). **Gen $X[i, 1]$ dikunci ke opsi eksisting E_i** — slot pertama merepresentasikan tegakan yang sudah ada di lapangan dan tidak dapat diganti sebelum ditebang; konversi ke opsi baru terjadi mulai slot 2, sehingga transisi selalu bertahap mengikuti daur. Variabel bebas per petak hanya $X[i, 2..S]$.
- $Y[i, s]$ = penundaan (tahun) tebang/panen slot ke- s SETELAH umur tebang minimum opsi tercapai ($1 \dots Y_maks$; default $Y_maks = 20$). Gen ini memberi optimizer keleluasaan mengatur waktu panen untuk meratakan hasil, memenuhi ambang, atau menunggu nilai tegakan.

Dimensi ruang keputusan per individu = $N \times (S-1)$ gen opsi + $N \times S$ gen penundaan. Untuk 6 petak: $18 + 24 = 42$ variabel integer; untuk KPH riil dengan ratusan petak, dimensi tumbuh linear.

4.3 Dekoding kromosom → jadwal tebang (aturan W terkoreksi)

Tahun tebang perdana slot 1 mengikuti aturan terkoreksi (memperbaiki bug $W = S + O$ pada prototipe): bila tegakan awal sudah mencapai umur minimum ($u^0_i \geq m(X[i, 1])$) atau petak berstatus FD, maka $W[i, 1] = Y[i, 1]$; bila belum, $W[i, 1] = (m(X[i, 1]) - u^0_i) + Y[i, 1]$ — menunggu tegakan matang dahulu, baru menghitung penundaan. (1)

Durasi slot berikutnya ($s \geq 2$): $D[i, s] = m(X[i, s]) + Y[i, s]$, karena tegakan slot s dimulai dari umur 0 setelah tebang slot sebelumnya. (2)

Tahun tebang kumulatif: $W[i, s] = W[i, 1] + \sum_{k=2..s} D[i, k]$. Tebang yang jatuh melewati horizon ($W > P$) tidak dieksekusi. (3)

5. Tahap 5: Simulator Dinamika Tegakan (Modul M1–M8)

5.1 Mesin transisi tahunan

Simulator memproyeksikan keadaan tiap petak per tahun dengan **konvensi umur paritas Excel** (dibuktikan identik melalui golden test, §9): umur pada tahun 1 = umur awal; pada tahun tebang, tegakan tercatat pada umur penuhnya; umur di-reset menjadi 1 pada tahun SETELAH tebang:

1. $age[i, 1] = u^0_i$; untuk $t \geq 2$: $age[i, t] = 1$ jika $cut[i, t-1] = 1$, selainnya $age[i, t-1] + 1$. (4)
2. $cut[i, t] = 1$ tepat pada tahun-tahun $W[i, s]$ yang berada dalam horizon; opsi berjalan $option[i, t]$ berganti ke slot berikutnya setelah tebang.
3. Luas: pada tahun tebang, luas tebang $cut_area[i, t] = A_i$ dan luas berdiri $stock_area[i, t] = 0$; selainnya sebaliknya — kesetimbangan $cut_area + stock_area = A_i$ dijaga (diuji otomatis).
4. RDI: $rdi[i, t]$ mengikuti RDI pola opsi berjalan; tahun-tahun sebelum tebang perdana memakai RDI awal petak (carry dari data lapangan).

5.2 Pertumbuhan volume (M1) — Chapman-Richards

Volume tegakan berdiri per hektar mengikuti kurva Chapman-Richards yang dimodulasi kelas bonita: $V(u) = V_{max} \cdot f(SI) \cdot (1 - e^{-(k \cdot u)})^p$, dengan $f(SI) = 1 + 0,125 \cdot (SI - 3)$. (5)

Parameter ($V_{\max}$, k , p) per jenis di-fit dari tabel tegakan Perhutani melalui kuadrat terkecil dua-putaran (grid kasar $25 \times 30 \times 21$ titik pada rentang $V_{\max} \in [\text{maks } V, 3 \cdot \text{maks } V]$, $k \in [0,01; 0,6]$ (geometrik), $p \in [1; 3]$, lalu penghalusan lokal di sekitar optimum). Titik data dinormalkan dulu ke SI 3 (dibagi $f(\text{SI})$). Uji sintetis menunjukkan kurva hasil fit menempel data $< 3\%$ deviasi maksimum.

5.3 Volume panen, karbon, dan ekonomi-lite (M5)

- Volume panen: $\text{harvest_vol}[i, t] = V(\text{age}[i, t]) \cdot A_i \cdot \text{rdi}[i, t]$ pada tahun tebang (tegakan dipanen pada umur penuh). (6)
- Stok karbon atas tanah: $C(u) = V(u) \cdot \rho \cdot \text{BEF} \cdot \text{CF}$ per jenis (default $\rho = 0,60$; $\text{BEF} = 1,4$; $\text{CF} = 0,47$ — kalibrasi per jenis lewat sheet Karbon). (7)
- Pendapatan tahunan = $\sum_i \text{harvest_vol} \cdot \text{harga}(\text{jenis}) + \text{luas agroforestri} \times \text{pendapatan AF/ha}$; Biaya tahunan = $\text{luas tebang} \times \text{biaya tanam/ha} + \text{luas total} \times \text{overhead/ha}$. Rasio pendapatan/biaya kumulatif menjadi indikator kapasitas finansial I36. (8)

6. Tahap 6: Dari Indikator ke Skor — BOCR Dinamis

6.1 Nilai indikator per tahun

24 indikator strong Studi 1 dihitung per tahun dalam tiga golongan: **dinamis** (10 — langsung dari trajektori simulasi, mis. tutupan hutan, karbon, kondisi tegakan, kesesuaian opsi berjalan, kontribusi pangan), **semi-dinamis** (9 — lintasan eksogen/ramp kapasitas, mis. permintaan pasar, SDM, kelembagaan), dan **statik** (5 — skor Studi 1 konstan menunggu data per KPH). Rumus tiap indikator terdokumentasi dalam kode beserta catatan kalibrasinya.

6.2 Penskalaan berjangkar ambang

Nilai mentah $v(i, t)$ dipetakan ke skor 1–5 dengan jangkar tiga titik dari Studi 1: skor 3 tepat di ambang τ , skor 5 di target aspiratif, skor 1 di batas gagal, interpolasi linear di antaranya, terpotong pada $[1, 5]$; indikator berarah turun dinegasikan lebih dahulu. (9)

6.3 Empat merit BOCR terpisah

Setiap indikator diberi merit BOCR utama (penugasan default di bawah — ditinjau/disahkan penulis), bobot dinormalkan di dalam merit, dan tiap merit dihitung dengan semantiknya sendiri (jendela pandang $L = 5$ tahun):

Merit	Semantik	Rumus komponen	Indikator (default)
B — Benefits	Manfaat berjalan	skor $s(i, t)$ periode berjalan	12: I1, I2, I3, I4, I6, I30, I33, I34, I36, I18, I43, I44
O — Opportunities	Prospek/peluang	rata-rata $s(i, t \dots t+L)$ jendela ke depan	8: I40, I41, I42, I22, I35, I37, I38, I39
C — Costs	Beban berjalan	$6 - s(i, t)$ periode berjalan	2: I24 (intensitas ekstraksi), I32 (erosi)
R — Risks	Potensi kerugian	$6 - \min s(i, t \dots t+L)$ jendela ke depan	2: I25 (mortalitas HHBK), I45 (gangguan hutan)

Skor gabungan per periode: $\text{Score}(t) = w_B \cdot B(t) + w_O \cdot O(t) - w_C \cdot C(t) - w_R \cdot R(t)$, dengan bobot strategik Studi 1 (w_B, w_O, w_C, w_R) = (0,38; 0,27; 0,18; 0,17). (10)

6.4 Tiga metrik agregasi horizon

1. **DScore** = $\sum_t \beta^t \cdot \text{Score}(t) / \sum_t \beta^t$ — skor terdiskonto ($\beta = 0,95$; uji sensitivitas), menghargai kinerja lebih awal. (11)
2. **WScore** = $\min_t \text{Score}(t)$ — periode terburuk (metrik kehati-hatian).
3. **TVC** = $\sum_i \sum_t 1[v(i, t) \text{ melanggar } \tau_i]$ — jumlah kejadian pelanggaran ambang strong sepanjang horizon; pembeda utama terhadap penilaian statik dan basis kendala optimasi. (12)

6.5 Objektif tiga pilar untuk optimasi

Untuk NSGA-II, indikator diagregasi per pilar — **ECO** (4 indikator), **ENV** (12), **SOC** (8) — dengan bobot AHP dinormalkan hanya DI DALAM pilar, lalu didiskonto β sepanjang horizon. Bobot antar-pilar sengaja TIDAK dipakai: pertukaran antar pilar diserahkan kepada dominasi Pareto, sehingga preferensi pengambil keputusan tidak mendahului analisis (selaras keputusan metodologis proposal REVISI2). (13)

7. Tahap 7: Formulasi Optimasi

Masalah optimasi penjadwalan MUK dirumuskan:

1. Maksimumkan $F(X, Y) = (f_ECO, f_ENV, f_SOC)$ — tiga objektif pilar persamaan (13) — secara simultan (dicari himpunan Pareto, bukan satu solusi).
2. Terhadap variabel integer $X[i, 2..S] \in \{1 \dots 100\}$ dan $Y[i, 1..S] \in \{1 \dots 20\}$, dengan $X[i, 1] = E_i$ (tetap).
3. Kendala g_1 (kesesuaian tapak): setiap opsi slot 2–4 wajib kelas kesesuaian ≥ 2 pada petaknya; jumlah gen yang melanggar dihitung sebagai besaran pelanggaran.
4. Kendala g_2 (ambang strong, opsional): $TVC \leq TVC_maks$. Default tidak mengikat ($TVC_maks = \emptyset$) — TVC tetap dihitung dan dilaporkan per solusi; kendala dikencangkan bertahap setelah estimator dan ambang terkalibrasi, sesuai strategi safeguard RKUPH.

Penanganan kendala memakai **constrained-domination** (Deb dkk., 2002): (i) solusi layak selalu mendominasi solusi tak layak; (ii) antara dua solusi tak layak, yang total pelanggaranannya lebih kecil menang; (iii) antara dua solusi layak, berlaku dominasi Pareto biasa. Dengan demikian tekanan seleksi mengarah dulu ke kelayakan, lalu ke kualitas.

8. Tahap 8: Algoritma NSGA-II — Langkah demi Langkah

8.1 Parameter

Parameter	Nilai default	Keterangan
Ukuran populasi (μ)	60 (UI: 20–500)	menyesuaikan dimensi masalah
Jumlah generasi (G)	100 (UI: 10–2000)	kriteria henti berbasis generasi
Sampling awal	Integer random sampling	seragam pada $[x_l, x_u]$ per gen
Crossover	SBX, prob 0,9, $\eta_c = 15 + \text{rounding repair}$	simulated binary crossover, hasil dibulatkan ke integer

Parameter	Nilai default	Keterangan
Mutasi	Polynomial mutation, $\eta_m = 20 + \text{rounding}$ repair	per gen, probabilitas bawaan $1/n_{\text{var}}$
Eliminasi duplikat	aktif	menjaga keragaman populasi
Seed	1 (dapat diatur)	reproduktibilitas penuh
return_least_infeasible	aktif	bila tak ada solusi layak, solusi terdekat-layak tetap dilaporkan

8.2 Pseudokode alur utama

1. **Inisialisasi:** bangkitkan populasi P_0 berisi μ individu integer acak dalam batas gen; evaluasi semua individu (dekoding $\rightarrow$ simulasi $\rightarrow$ objektif F dan pelanggaran G).
2. **Peringkat awal:** fast non-dominated sorting dengan constrained-domination $\rightarrow$ front $F_1, F_2, \dots$; hitung crowding distance per front.
3. **Loop generasi** ($g = 1 \dots G$):
 4. — **Seleksi induk:** binary tournament; pemenang = peringkat front lebih baik, seri dipecah oleh crowding distance lebih besar (menjaga sebaran).
 5. — **Rekombinasi:** SBX antar pasangan induk (prob 0,9); nilai riil hasil crossover dibulatkan ke integer terdekat dalam batas (rounding repair).
 6. — **Mutasi:** polynomial mutation per gen, lalu rounding repair; duplikat dieliminasi.
 7. — **Evaluasi keturunan Q_g** (μ individu): dekode (X, Y) $\rightarrow$ simulasi 30 tahun $\rightarrow$ nilai 24 indikator $\rightarrow$ objektif pilar ($f_{\text{ECO}}, f_{\text{ENV}}, f_{\text{SOC}}$) dinegasikan (pymoo meminimalkan) $\rightarrow$ besaran pelanggaran (g_1, g_2).
 8. — **Elitisme** ($\mu + \lambda$): gabungkan $R_g = P_g \cup Q_g$ (2μ individu); fast non-dominated sorting + crowding distance pada R_g ; isi $P_{\{g+1\}}$ front demi front; front terakhir yang tidak muat dipotong berdasarkan crowding distance terbesar.
9. **Terminasi:** setelah G generasi, kembalikan front pertama populasi akhir (himpunan non-dominated); bila kosong (semua tak layak), kembalikan solusi dengan pelanggaran terkecil.
10. **Pasca-olah:** tiap solusi disimulasikan ulang untuk melampirkan TVC, rincian pelanggaran per indikator, dan jadwal per petak (petak, slot, kode opsi, nama, tahun terbang); daftar diurutkan agregat skor untuk penyajian.

8.3 Kompleksitas dan kinerja

Beban komputasi didominasi evaluasi: $\mu \times G$ simulasi per run (default 6.000). Simulator tervektorisasi NumPy menyelesaikan ± 1.000 evaluasi/detik pada data 6 petak (run mini $20 \times 10 \pm 1$ detik; run default $\pm 6-10$ detik). Sorting NSGA-II berkompleksitas $O(M \cdot \mu^2)$ per generasi ($M = 3$ objektif) — bukan hambatan pada ukuran populasi riset. Untuk KPH riil (ratusan petak), waktu evaluasi tumbuh linear terhadap N .

9. Tahap 9: Keluaran, Verifikasi, dan Validasi

9.1 Keluaran analisis

- **Front Pareto** tiga objektif (tabel + tebar ECO-ENV) dengan TVC per solusi — pendukung keputusan memilih kompromi, bukan satu jawaban tunggal.
- **Jadwal per petak** solusi terpilih: opsi per slot dan tahun tebang — langsung dapat dibandingkan dengan RKUPH.
- **Workbook hasil** (unduh xls) dan riwayat run persisten (basis data) untuk reproduktibilitas.
- **Evaluasi skenario S1–S4** (preset BAU, Intensifikasi, Wisata-Jasling, Diversifikasi) sebagai pembanding kebijakan terhadap hasil optimasi.

9.2 Verifikasi teknis (sudah dijalankan, otomatis)

Uji	Kriteria	Status
Golden test paritas Excel	cut, age, RDI, tahun tebang identik dgn workbook acuan (6 petak × 30 th, kromosom dibekukan)	LULUS (identik 100%)
Keseimbangan luas	cut_area + stock_area = luas petak, semua t	LULUS
Aturan W terkoreksi	petak matang $W=Y$; belum matang $W=(m-u^0)+Y$	LULUS
Konvensi umur	umur penuh saat tebang; reset 1 tahun setelahnya	LULUS
Kondisi ekstrem	penundaan melebihi horizon → tanpa tebang	LULUS
Pemisahan merit	$O \neq B$, $R \neq C$; skor merit dalam [1, 5]	LULUS
Fit Chapman-Richards	kurva fit menempel data sintesis < 3%	LULUS
Kalibrasi ujung-ke-ujung	template terisi mengubah parameter model dengan benar	LULUS

9.3 Validasi (peran penulis)

1. Kalibrasi parameter tumbuh/harga/karbon dari tabel tegakan Perhutani dan laporan KPH (template kalibrasi §3.2); kembalikan ambang I2 ke 120 tC/ha setelahnya.
2. Pengesahan penugasan merit BOCR per indikator dan preskripsi kuantitatif skenario per KPH.
3. Reproduksi baseline: proyeksi S1 dibandingkan realisasi historis RPKH; face validation pakar.
4. Uji sensitivitas: β , bobot BOCR, Y_{maks} , ukuran populasi/generasi (seed tetap menjamin keterulangan).

10. Ringkasan Rantai Metodologis

Template Excel (data petak + katalog 100 opsi + kesesuaian) → kalibrasi (yield table di-fit Chapman-Richards; harga/biaya; ambang) → kromosom (X, Y) dengan slot 1 terkunci eksisting → dekoding aturan W terkoreksi → simulasi tahunan 30 tahun paritas Excel (umur, luas, RDI, volume, karbon, kas) → 24 indikator → skor berjangkar ambang → BOCR empat merit (DScore, WScore, TVC) dan tiga pilar → constrained NSGA-II (SBX + PM integer, constrained-domination, elitisme $\mu+\lambda$) → front Pareto + TVC +

jadwal per petak → workbook hasil dan pembandingan skenario S1–S4. Setiap mata rantai memiliki uji otomatisnya sendiri; klaim paritas terhadap spreadsheet acuan dibuktikan golden test yang dapat dijalankan ulang kapan saja.

Referensi Utama

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- Deb, K., & Agrawal, R. B. (1995). Simulated binary crossover for continuous search space. *Complex Systems*, 9(2), 115–148.
- Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290–301.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. *FAO Forestry Paper* 134.
- Chave, J., dkk. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190.
- Wijnmalen, D. J. D. (2007). Analysis of benefits, opportunities, costs, and risks (BOCR) with the AHP–ANP. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7–8), 892–905.
- Blank, J., & Deb, K. (2020). pymoo: Multi-objective optimization in Python. *IEEE Access*, 8, 89497–89509.
- Murray, A. T. (1999). Spatial restrictions in harvest scheduling. *Forest Science*, 45(1), 45–52.

Dokumen ini dihasilkan dari implementasi berjalan; persamaan (1)–(13) merujuk rumus yang sama pada proposal REVISI2 §3 dan draf Artikel 2 §3. Semua parameter default ditandai kalibrasi pada kode sumber dan template kalibrasi.