

KONSERVASI DAS

BERBASIS SISTEM DINAMIK

Teori dan Aplikasi Pengendalian Sedimen

Prof. Dr. Ir. Ahmad Rifqi Asrib, M.T.



PT. GHANI PRESS GROUP

KONSERVASI DAS BERBASIS SISTEM DINAMIK

Teori dan Aplikasi Pengendalian Sedimen

Penulis:

Prof. Dr. Ir. Ahmad Rifqi Asrib, M.T.

Desain Cover:

Umar Khasan

Layouter:

Tyas Dzawil Istiqomah

Editor Naskah:

Fithri Estikhamah

Anggota IKAPI: No. 468/JTI/2026

Diterbitkan oleh: PT GHANI PRESS GROUP

Perpustakaan Nasional RI: Katalog Dalam Terbitan (KDT)

Asrib, Ahmad Rifqi

Konservasi DAS berbasis sistem dinamik: teori dan aplikasi pengendalian sedimen 2026 / penulis, Ahmad Rifqi Asrib, Lamongan: PT. Ghani Press Group, 2026.

V + 115 hlm; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-634-97264-5-0

1. Daerah aliran sungai

I. Judul

551.483 [23]

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- a. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- b. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- c. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- d. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku referensi "KONSERVASI DAS BERBASIS SISTEM DINAMIK Teori dan Aplikasi Pengendalian Sedimen" ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik.

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan satu kesatuan ekosistem yang menghubungkan kawasan hulu, tengah, dan hilir melalui siklus hidrologi yang saling terkait. Ketika keseimbangan tata guna lahan di kawasan hulu terganggu, dampaknya tidak berhenti di tempat kejadian, melainkan merambat ke seluruh sistem dalam bentuk peningkatan aliran permukaan, erosi lahan, dan pada akhirnya sedimentasi yang mengancam keberlanjutan fungsi sungai, waduk, dan kawasan pesisir di wilayah hilir. Persoalan ini bersifat lintas waktu dan lintas ruang, sehingga penanganannya memerlukan cara berpikir yang mampu menangkap keterkaitan antarvariabel secara menyeluruh, bukan sekadar hubungan sebab-akibat yang linear.

Buku referensi ini disusun untuk menjawab kebutuhan tersebut melalui pendekatan pemodelan sistem dinamik (*system dynamics*), sebuah kerangka berpikir dan seperangkat alat kuantitatif yang dikembangkan untuk memahami perilaku sistem kompleks yang di dalamnya terdapat banyak variabel yang saling memengaruhi melalui mekanisme umpan balik (*feedback loop*). Pendekatan ini telah lama digunakan dalam berbagai bidang, mulai dari manajemen industri, kebijakan publik, hingga pengelolaan sumber daya alam, dan dalam

beberapa dekade terakhir semakin banyak diterapkan pada masalah-masalah lingkungan, termasuk konservasi DAS dan pengendalian sedimentasi.

Materi dalam buku ini disusun secara bertahap: dimulai dari pemahaman karakteristik hidrologi DAS dan problematika sedimentasi (Bab 1), pengantar konsep dan perangkat pemodelan sistem dinamik (Bab 2), konseptualisasi hubungan antarvariabel DAS ke dalam diagram sistem dinamik (Bab 3), formulasi matematis dan kalibrasi model dengan mengintegrasikan pendekatan hidrologi konvensional seperti USLE/MUSLE (Bab 4), simulasi skenario kebijakan konservasi (Bab 5), hingga aplikasi praktis pada contoh studi kasus nyata di Indonesia, khususnya sedimentasi Waduk Bili-Bili di DAS Jeneberang, Sulawesi Selatan (Bab 6).

Penulis menyadari bahwa penyusunan buku ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak, serta dari akumulasi pengetahuan yang telah dibangun oleh para peneliti terdahulu di bidang hidrologi, konservasi tanah dan air, serta pemodelan sistem lingkungan. Semoga buku ini memberi kontribusi yang bermakna bagi pengembangan keilmuan dan praktik konservasi DAS di Indonesia, khususnya dalam upaya memadukan pendekatan pemodelan kuantitatif dengan perumusan kebijakan pengendalian sedimen yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Makassar, Agustus 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
BAB I	
KARAKTERISTIK HIDROLOGI DAS DAN PROBLEMATIKA SEDIMENTASI.....	1
BAB II	
PENGANTAR PEMODELAN SISTEM DINAMIK UNTUK LINGKUNGAN	19
BAB III	
KONSEPTUALISASI SISTEM DINAMIK PADA KOMPONEN DAS	35
BAB IV	
FORMULASI MATEMATIKA DAN KALIBRASI MODEL SEDIMEN.....	49
BAB V	
SIMULASI SKENARIO KEBIJAKAN KONSERVASI DAS	69
BAB VI	
APLIKASI PRAKTIS DAN CONTOH STUDI KASUS	85
DAFTAR PUSTAKA	103
GLOSARIUM	105
LAMPIRAN	109
BIODATA PENULIS	115



PT GHANI PRESS GROUP

Email: ptghanipress@gmail.com

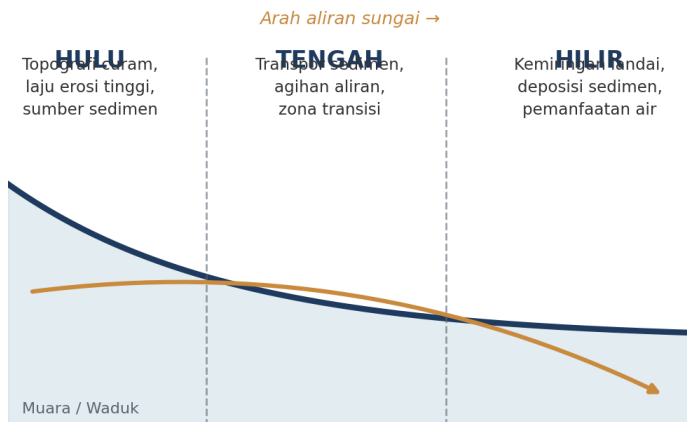
Website: <https://ghanipress.com/>

BAB I

KARAKTERISTIK HIDROLOGI DAS DAN PROBLEMATIKA SEDIMENTASI

➤ 1.1 Konsep Hulu-Hilir Daerah Aliran Sungai

Daerah Aliran Sungai (DAS) didefinisikan sebagai suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, dengan batas di daratan berupa pemisah topografis (*watershed divide*) dan batas di laut berupa daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan. Sebagai satu kesatuan sistem hidrologi, DAS lazim dibagi ke dalam tiga zona fungsional yang saling terkait, yaitu wilayah hulu, tengah, dan hilir, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema konsep hulu-hilir Daerah Aliran Sungai dan karakteristik fungsionalnya

Wilayah hulu umumnya dicirikan oleh topografi yang curam, kerapatan drainase yang tinggi, serta fungsi utama sebagai kawasan tangkapan air (*catchment area*) dan kawasan konservasi. Pada wilayah ini, energi kinetik aliran air relatif besar sehingga apabila tutupan vegetasi berkurang, potensi erosi lahan meningkat signifikan dan wilayah hulu menjadi sumber utama pasokan sedimen bagi bagian DAS di bawahnya. Wilayah tengah berperan sebagai zona transisi tempat terjadinya proses transpor sedimen dan redistribusi aliran, sementara wilayah hilir yang bertopografi relatif landai umumnya menjadi tempat terjadinya deposisi sedimen serta merupakan lokasi pemanfaatan air yang intensif untuk irigasi, air baku, dan berbagai keperluan domestik maupun industri.

Prinsip keterkaitan hulu-hilir menegaskan bahwa setiap intervensi yang terjadi di satu zona akan menimbulkan konsekuensi hidrologis di zona lainnya, meskipun jarak antarlokasi dapat mencapai puluhan kilometer dan efeknya baru terasa setelah rentang waktu bertahun-tahun. Sebagai contoh, konversi hutan menjadi lahan pertanian atau permukiman di kawasan hulu akan menurunkan kapasitas infiltrasi tanah dan meningkatkan koefisien aliran permukaan, yang pada gilirannya memperbesar debit puncak (*peak discharge*) saat hujan lebat dan mempercepat proses erosi. Sedimen hasil erosi tersebut kemudian tertransportasi melalui sistem sungai dan pada akhirnya terdeposisi di badan air hilir seperti waduk, sehingga mengurangi kapasitas tampungannya. Pemahaman terhadap keterkaitan lintas-zona inilah yang menjadi dasar filosofis bagi pendekatan pemodelan sistem dinamik yang dibahas pada bab-bab berikutnya, karena metode ini secara eksplisit dirancang untuk menangkap hubungan antarvariabel yang terpisah secara spasial maupun temporal namun tetap terhubung dalam satu jejaring kausal.

Dari sudut pandang pengelolaan, batas administratif suatu DAS sering tidak sejalan dengan batas wilayah pemerintahan, sehingga satu DAS dapat melintasi beberapa kabupaten atau bahkan provinsi. Kondisi ini menuntut koordinasi lintas-institusi dalam perencanaan konservasi, sebagaimana tercermin dalam kelembagaan Balai Besar/Balai Wilayah Sungai di Indonesia yang bertanggung jawab mengelola satu atau beberapa DAS lintas wilayah administratif sekaligus.

Tabel 1. Klasifikasi DAS berdasarkan luas tangkapan air

Kategori DAS	Rentang Luas (km ²)	Karakteristik Umum
DAS Kecil	< 500	Waktu respons hidrograf cepat; variasi debit tinggi antarwaktu
DAS Sedang	500 – 5.000	Terdapat beberapa sub-DAS; respons hidrologi lebih moderat
DAS Besar	> 5.000	Melibatkan banyak sub-DAS; pengelolaan memerlukan koordinasi lintas wilayah

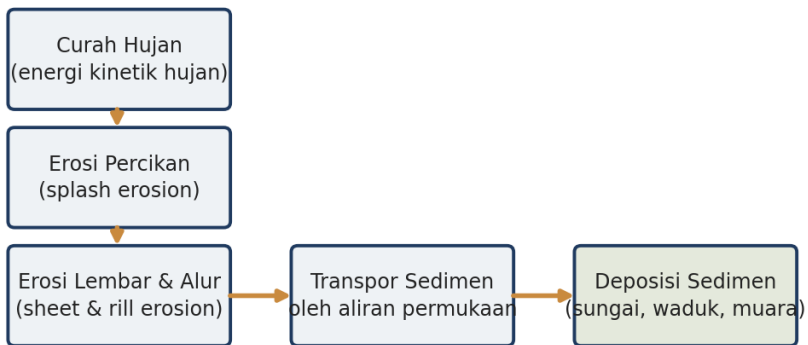
Sumber: Kompilasi penulis dari Asdak (2004)

Sebagai ilustrasi penerapan klasifikasi di atas, DAS Jeneberang yang menjadi salah satu fokus studi kasus pada Bab 6 memiliki luas daerah tangkapan di sekitar Waduk Bili-Bili kurang lebih 384 km², sehingga tergolong ke dalam kategori DAS sedang, namun dengan karakteristik hulu yang sangat

curam karena bersumber dari kawasan pegunungan Bawakaraeng.

➤ 1.2 Mekanisme Erosi, Transpor, dan Deposisi Sedimen

Sedimentasi pada dasarnya adalah tahap akhir dari suatu rangkaian proses fisik yang terdiri atas tiga fase utama, yaitu erosi (pelepasan partikel tanah dari permukaan lahan), transpor (pergerakan partikel tersebut oleh media pengangkut, umumnya air), dan deposisi (pengendapan partikel ketika energi pengangkutnya tidak lagi cukup untuk menjaga partikel dalam keadaan tersuspensi atau bergerak). Ketiga fase tersebut membentuk suatu rangkaian proses yang kontinu di sepanjang sistem DAS, sebagaimana digambarkan secara skematis pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram alir mekanisme erosi, transpor, dan deposisi sedimen dalam sistem DAS

Erosi

Erosi lahan diawali oleh proses erosi percikan (*splash erosion*), yaitu lepasnya partikel tanah akibat energi kinetik tumbukan butir hujan pada permukaan tanah yang tidak terlindungi vegetasi. Apabila intensitas hujan melampaui kapasitas infiltrasi

tanah, terbentuk aliran permukaan (*overland flow*) yang menyebabkan erosi lembar (*sheet erosion*), yaitu pengikisan tanah secara relatif merata pada suatu bidang lahan. Ketika aliran permukaan terkonsentrasi pada jalur-jalur tertentu, terjadi erosi alur (*rill erosion*) yang membentuk saluran-saluran kecil, dan pada tahap yang lebih lanjut dapat berkembang menjadi erosi parit (*gully erosion*) yang melibatkan volume tanah tererosi jauh lebih besar. Selain proses-proses yang didominasi oleh air permukaan tersebut, pada kawasan berlereng curam dengan kondisi geologi tertentu, erosi masif dapat pula terjadi melalui mekanisme longsor lahan (*landslide*), yang menyumbang volume sedimen dalam jumlah sangat besar dalam waktu singkat, sebagaimana terjadi pada peristiwa longsoran dinding kaldera Gunung Bawakaraeng tahun 2004 yang akan dibahas lebih rinci pada Bab 6.

Transpor Sedimen

Sedimen yang telah terlepas dari permukaan lahan diangkut oleh aliran air melalui dua mekanisme utama, yaitu sebagai muatan tersuspensi (*suspended load*), berupa partikel halus seperti lanau dan lempung yang melayang dalam badan air, dan sebagai muatan dasar (*bed load*), berupa partikel yang lebih kasar seperti pasir dan kerikil yang bergerak dengan cara menggelinding, meloncat (*saltation*), atau menggeser di dasar saluran. Kapasitas angkut suatu aliran sangat bergantung pada kecepatan dan debit aliran, yang pada gilirannya ditentukan oleh kemiringan saluran, kekasaran dasar sungai, dan volume air yang tersedia. Konsep nisbah hantaran sedimen atau *sediment delivery ratio* (SDR) digunakan untuk menyatakan proporsi hasil erosi lahan (*gross erosion*) yang benar-benar berhasil tertranspor hingga mencapai titik pengukuran tertentu di hilir, mengingat sebagian sedimen dapat terdeposisi kembali sepanjang lintasnya sebelum mencapai badan air utama.

Deposisi Sedimen

Deposisi terjadi ketika energi aliran menurun hingga tidak lagi mampu menahan partikel sedimen dalam keadaan bergerak, misalnya pada saat aliran memasuki badan air yang lebih tenang seperti waduk, danau, atau muara sungai, atau ketika kemiringan dasar sungai melandai secara tiba-tiba. Pada infrastruktur waduk, deposisi sedimen secara progresif akan mengurangi kapasitas tampungan efektif (*dead storage maupun live storage*), sehingga menurunkan kinerja waduk dalam menjalankan fungsi-fungsi utamanya, baik untuk pengendalian banjir, penyediaan air irigasi dan air baku, maupun pembangkit listrik tenaga air. Proses deposisi ini bersifat kumulatif dan pada umumnya berlangsung lambat, namun dapat terakselerasi secara drastis pascakejadian bencana alam berskala besar di kawasan hulu.

➤ 1.3 Dampak Sedimentasi terhadap Infrastruktur dan Fungsi DAS

Sedimentasi yang tidak terkendali menimbulkan konsekuensi yang bersifat multidimensi. Dari sisi teknis-infrastruktur, penumpukan sedimen pada waduk memperpendek usia guna (*design life*) yang telah direncanakan, meningkatkan frekuensi dan biaya kegiatan pengerukan (*dredging*), serta dapat mengganggu operasional bangunan intake dan turbin pembangkit listrik tenaga air. Dari sisi hidrologis, pendangkalan alur sungai akibat sedimentasi menurunkan kapasitas tampung saluran sehingga memperbesar risiko banjir di kawasan hilir meskipun debit air yang mengalir tidak mengalami peningkatan berarti. Dari sisi ekologis, kekeruhan air yang tinggi akibat muatan sedimen tersuspensi dapat mengganggu kehidupan biota akuatik, menghambat fotosintesis vegetasi air, dan menurunkan kualitas air baku.

Tabel 2. Faktor-faktor utama penyebab peningkatan laju erosi dan sedimentasi pada DAS

Faktor	Mekanisme Pengaruh terhadap Sedimentasi
Alih fungsi lahan (deforestasi, konversi ke pertanian/permukiman)	Menurunkan intersepsi hujan dan kapasitas infiltrasi, meningkatkan koefisien aliran permukaan
Intensitas dan pola curah hujan	Meningkatkan energi kinetik erosi serta debit limpasan, terutama pada hujan berintensitas tinggi
Kemiringan dan panjang lereng	Memperbesar kecepatan aliran permukaan dan daya angkut sedimen
Jenis dan struktur tanah (erodibilitas)	Menentukan kemudahan partikel tanah terlepas dan tertransportasi oleh air
Praktik konservasi lahan	Mengurangi laju erosi melalui teras, tanaman penutup tanah, dan pengaturan pola tanam
Kejadian bencana geologi (longsor, letusan gunung berapi)	Menyumbang volume sedimen dalam jumlah sangat besar secara tiba-tiba

Sumber: Kompilasi penulis dari Arsyad (2012) dan Asdak (2004)

Kombinasi antara faktor-faktor tersebut menjelaskan mengapa pendekatan pengelolaan sedimentasi tidak dapat hanya mengandalkan solusi struktural tunggal, seperti pembangunan bangunan penahan sedimen (*check dam* atau *sabo dam*), tanpa disertai penanganan pada sisi hulu berupa konservasi lahan dan pengendalian tata guna lahan. Pemahaman menyeluruh atas keterkaitan berbagai faktor penyebab inilah yang secara alami mengarahkan analisis pada kebutuhan kerangka pemodelan yang mampu me-

representasikan hubungan sebab-akibat yang kompleks dan bersifat dinamis dari waktu ke waktu sebuah kebutuhan yang dijawab oleh pendekatan sistem dinamik yang akan diperkenalkan pada Bab 2.

Sebagai penutup subbab ini, penting untuk ditegaskan bahwa problematika sedimentasi DAS pada dasarnya adalah persoalan keseimbangan antara laju penyediaan sedimen (supply) dari proses erosi di hulu dan kapasitas sistem sungai serta infrastruktur di hilir dalam menampung atau melewatkan sedimen tersebut. Setiap upaya konservasi DAS pada akhirnya bertujuan untuk mengembalikan atau menjaga keseimbangan tersebut pada tingkat yang dapat diterima secara teknis, ekonomis, dan lingkungan, sebagaimana akan dibahas secara lebih terstruktur melalui kerangka simulasi skenario kebijakan pada Bab 5.

➤ **1.4 Metode Pengukuran dan Pemantauan Erosi-Sedimentasi**

Keandalan setiap model, termasuk model sistem dinamik yang menjadi fokus buku ini, sangat bergantung pada ketersediaan data lapangan yang digunakan untuk mengkalibrasi dan memvalidasi hasil simulasinya. Oleh karena itu, sebelum membahas kerangka pemodelan pada bab-bab berikutnya, penting untuk memahami secara ringkas metode-metode utama yang lazim digunakan untuk mengukur dan memantau proses erosi lahan serta sedimentasi di lapangan.

Pengukuran Erosi Lahan

Pengukuran erosi lahan pada skala plot atau petak percobaan umumnya dilakukan melalui metode petak erosi (*erosion plot*), yaitu bidang lahan berukuran baku (misalnya 22 m × 4 m sesuai standar plot USLE) yang dilengkapi talang penampung (*runoff*

collector) untuk menampung dan mengukur volume serta konsentrasi sedimen pada limpasan permukaan yang keluar dari plot tersebut setiap kali terjadi hujan. Metode lain yang lebih sederhana namun cukup efektif untuk pemantauan jangka panjang adalah penggunaan patok erosi (*erosion pin*), yaitu batang logam atau kayu yang ditancapkan tegak lurus pada permukaan tanah, di mana perubahan jarak antara permukaan tanah dan bagian atas patok yang terukur secara berkala mengindikasikan besarnya penurunan permukaan tanah akibat erosi. Untuk cakupan area yang lebih luas, pendekatan penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) semakin banyak digunakan untuk mengestimasi faktor-faktor USLE secara spasial (khususnya faktor C melalui interpretasi citra penutup lahan dan faktor LS melalui model elevasi digital), sebagaimana telah banyak diterapkan pada berbagai kajian DAS di Indonesia.

Pengukuran Sedimentasi pada Badan Air dan Waduk

Pemantauan sedimentasi pada sungai umumnya dilakukan melalui pengambilan sampel muatan tersuspensi (*suspended sediment sampling*) menggunakan alat seperti *depth-integrating sampler* pada berbagai kedalaman kolom air, dikombinasikan dengan pengukuran debit aliran secara simultan untuk menghitung debit sedimen (*sediment discharge*). Untuk memantau sedimentasi pada waduk, metode yang paling umum digunakan adalah survei batimetri (*bathymetric survey*) berkala, yaitu pengukuran topografi dasar waduk menggunakan *echosounder* yang dipasang pada perahu survei mengikuti jalur-jalur pengukuran yang telah ditentukan, kemudian hasilnya dibandingkan dengan data batimetri pada tahun-tahun sebelumnya (idealnya dengan kondisi dasar waduk sesaat sebelum *impounding*) untuk menghitung volume sedimen yang telah terakumulasi serta laju sedimentasi rata-rata per tahun.

Survei batimetri inilah yang menjadi sumber data utama bagi angka-angka kapasitas tampungan Waduk Bili-Bili yang akan dibahas pada studi kasus Bab 6.

Tabel 3. Ringkasan metode pengukuran erosi dan sedimentasi yang umum digunakan

Metode	Skala Pengukuran	Keluaran Data Utama
Petak erosi (erosion plot)	Bidang lahan (puluhan m ²)	Laju erosi tanah per satuan luas per kejadian hujan
Patok erosi (erosion pin)	Titik pengamatan	Perubahan elevasi permukaan tanah dari waktu ke waktu
Sampling muatan tersuspensi sungai	Penampang sungai	Konsentrasi dan debit sedimen tersuspensi
Survei batimetri waduk	Seluruh badan waduk	Volume dan laju sedimentasi kumulatif waduk
Penginderaan jauh & SIG	DAS/sub-DAS (regional)	Estimasi spasial faktor C, LS, dan perubahan tutupan lahan

Sumber: Kompilasi penulis dari Arsyad (2012) dan Wischmeier & Smith (1978)

Kombinasi antara data lapangan berskala titik/plot dan data spasial berskala DAS inilah yang idealnya digunakan sebagai basis kalibrasi model sistem dinamik, sebagaimana akan dibahas lebih rinci pada Subbab 4.3. Keterbatasan ketersediaan data baik dari sisi kerapatan jaringan pemantauan maupun panjang rekaman waktu (*time series*) merupakan tantangan umum yang dihadapi hampir seluruh upaya pemodelan DAS di Indonesia, dan menjadi salah satu

pertimbangan mengapa pendekatan sistem dinamik yang tidak selalu menuntut resolusi data setinggi model hidrologi terdistribusi menjadi pilihan yang relevan secara praktis.

➤ **1.5 Klasifikasi Tingkat Kekritisan DAS**

Untuk kepentingan perencanaan dan penentuan prioritas penanganan, pemerintah Indonesia melalui kementerian yang membidangi kehutanan dan lingkungan hidup telah mengembangkan sistem klasifikasi tingkat kekritisan lahan dan DAS berdasarkan kombinasi indikator biofisik, seperti tingkat penutupan vegetasi, kemiringan lereng, tingkat erosi, dan indeks penggunaan air (perbandingan debit maksimum dan minimum sungai sebagai indikator kestabilan tata air DAS). Klasifikasi ini penting dipahami karena sering menjadi acuan penentuan prioritas alokasi anggaran program rehabilitasi hutan dan lahan (RHL) di tingkat nasional maupun daerah.

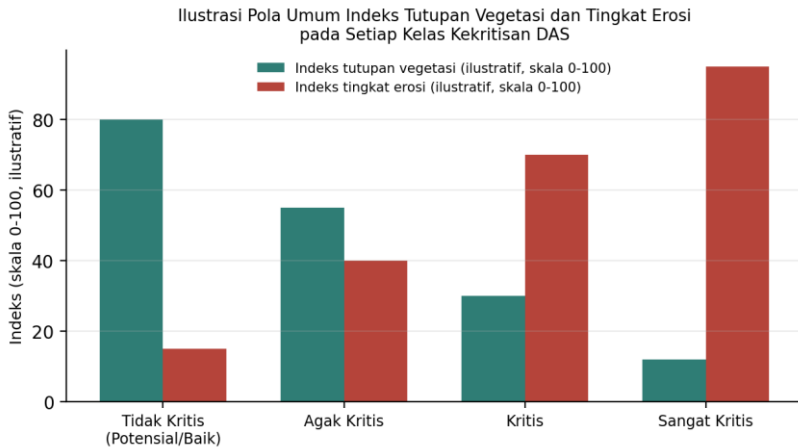
Tabel 4. Ilustrasi kriteria umum klasifikasi tingkat kekritisan DAS di Indonesia

Kelas	Kriteria Umum	Implikasi Prioritas Penanganan
Sangat Kritis	Penutupan vegetasi sangat rendah, erosi berat, indeks penggunaan air sangat tidak stabil	Prioritas tertinggi untuk rehabilitasi dan konservasi struktural-nonstruktural
Kritis	Penutupan vegetasi rendah-sedang, erosi sedang-berat	Prioritas tinggi, memerlukan program konservasi terpadu

Kelas	Kriteria Umum	Implikasi Prioritas Penanganan
Agak Kritis	Kondisi mulai menurun namun belum mengkhawatirkan	Perlu pemantauan intensif dan pencegahan dini
Tidak Kritis (Potensial/Baik)	Penutupan vegetasi memadai, tata air relatif stabil	Prioritas pemeliharaan kondisi eksisting

Sumber: Ilustrasi penulis berdasarkan kriteria umum penetapan lahan kritis

Sebagai catatan penting, klasifikasi semacam ini bersifat snapshot pada suatu titik waktu dan tidak menggambarkan dinamika atau lintasan perubahan DAS dari waktu ke waktu. Sebuah DAS yang saat ini masih berada pada kelas “agak kritis” dapat dengan cepat bergeser ke kelas “kritis” atau bahkan “sangat kritis” apabila tekanan alih fungsi lahan terus berlanjut tanpa intervensi, sejalan dengan sifat reinforcing loop yang telah diperkenalkan secara sekilas pada bab ini dan akan dibahas lebih mendalam pada Bab 2 dan Bab 3. Di sinilah letak nilai tambah pendekatan pemodelan sistem dinamik: bukan sekadar mengklasifikasikan kondisi DAS pada satu titik waktu, melainkan mensimulasikan lintasan perubahannya ke depan sehingga langkah antisipatif dapat diambil sebelum suatu DAS benar-benar jatuh ke kelas kekritisan yang lebih buruk.



Gambar 2. Ilustrasi pola umum hubungan antara indeks tutupan vegetasi dan indeks tingkat erosi pada setiap kelas kekritisitas DAS

Pola pada Gambar 3 menggambarkan hubungan berbanding terbalik yang secara umum diharapkan antara indeks tutupan vegetasi dan indeks tingkat erosi di setiap kelas kekritisitas: semakin rendah tutupan vegetasi suatu DAS, semakin tinggi pula tingkat erosi yang menyertainya, sejalan dengan mekanisme kausal yang telah dibahas pada Subbab 1.2 dan akan direpresentasikan secara lebih formal melalui CLD pada Gambar 2 dan Gambar 3. Perlu ditegaskan bahwa nilai indeks pada Gambar 3 bersifat ilustratif untuk menggambarkan pola umum hubungan tersebut, bukan angka baku yang berlaku seragam untuk seluruh DAS di Indonesia, mengingat ambang batas pasti antarkelas kekritisitas dapat bervariasi bergantung pada karakteristik biofisik regional masing-masing DAS.

➤ 1.6 Kerangka Hukum dan Kelembagaan Pengelolaan DAS di Indonesia

Pemahaman teknis mengenai hidrologi dan sedimentasi DAS yang telah diuraikan pada subbab-subbab sebelumnya perlu dilengkapi dengan pemahaman mengenai kerangka hukum dan kelembagaan yang mengatur pengelolaannya di Indonesia, mengingat setiap rekomendasi kebijakan yang dihasilkan dari pemodelan sistem dinamik pada akhirnya harus diimplementasikan melalui instrumen hukum dan kelembagaan yang berlaku. Landasan hukum utama bagi upaya konservasi tanah dan air di Indonesia saat ini adalah Undang-Undang Nomor 37 Tahun 2014 tentang Konservasi Tanah dan Air, yang menegaskan bahwa tanah dan air merupakan sumber daya alam yang tidak terbarukan dan mudah terdegradasi fungsinya, sehingga perlu dilindungi, dipulihkan, ditingkatkan, dan dipelihara melalui upaya konservasi yang terpadu dan komprehensif. Undang-undang tersebut mengatur berbagai aspek konservasi tanah dan air, termasuk perencanaan, pelaksanaan, pengawasan, hingga pembinaan dalam kerangka satu kesatuan pengelolaan DAS.

Secara kelembagaan, pengelolaan DAS di Indonesia melibatkan banyak pihak dengan kewenangan yang saling terkait: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melalui unit kerja yang membidangi pengelolaan DAS dan rehabilitasi hutan-lahan bertanggung jawab atas aspek konservasi lahan dan vegetasi di kawasan hulu; Kementerian Pekerjaan Umum melalui Balai Besar/Balai Wilayah Sungai bertanggung jawab atas pengelolaan infrastruktur sumber daya air termasuk waduk dan bangunan pengendali sedimen; sementara pemerintah daerah provinsi dan kabupaten/kota memiliki kewenangan pada aspek tata ruang dan perizinan pemanfaatan lahan yang secara langsung memengaruhi tutupan lahan di kawasan

tangkapan air. Kompleksitas kelembagaan lintas-sektor dan lintas-tingkatan pemerintahan inilah yang menjadi salah satu tantangan struktural terbesar dalam implementasi kebijakan konservasi DAS di Indonesia, karena keputusan yang optimal dari sudut pandang teknis-hidrologis (misalnya sebagaimana dihasilkan oleh simulasi model pada Bab 5) tidak selalu mudah diterjemahkan menjadi kebijakan konkret akibat perbedaan kewenangan, prioritas, dan kapasitas anggaran antarlembaga yang terlibat.

Kompleksitas kelembagaan tersebut memberikan justifikasi tambahan bagi nilai pendekatan sistem dinamik yang telah disinggung pada Bab 2: kemampuan CLD dan SFD untuk memvisualisasikan keterkaitan sebab-akibat secara sederhana dan mudah dipahami menjadikannya alat komunikasi yang efektif untuk menjembatani perbedaan perspektif antarlembaga yang terlibat dalam pengelolaan DAS, sehingga proses penyusunan kebijakan dapat lebih didasarkan pada pemahaman bersama mengenai struktur sistem, alih-alih pada negosiasi kepentingan sektoral semata. Prinsip inilah yang akan ditekankan kembali pada pembahasan mengenai keterlibatan pemangku kepentingan (*co-design*) pada Subbab 3.6 dan Subbab 5.6.

➤ 1.7 Perubahan Iklim dan Implikasinya terhadap Dinamika Erosi-Sedimentasi

Selain faktor alih fungsi lahan yang menjadi fokus utama pembahasan bab ini, perubahan iklim global merupakan faktor eksternal yang semakin penting diperhitungkan dalam analisis jangka panjang dinamika erosi-sedimentasi DAS. Proyeksi iklim untuk wilayah Indonesia secara umum mengindikasikan potensi peningkatan intensitas curah hujan ekstrem pada sejumlah wilayah, meskipun dengan pola musiman dan variasi

antarwilayah yang kompleks, bahkan pada kondisi di mana total curah hujan tahunan tidak mengalami perubahan signifikan. Implikasinya terhadap persamaan USLE/MUSLE yang dibahas pada Bab 4 cukup mendasar: peningkatan intensitas hujan ekstrem akan meningkatkan nilai faktor erosivitas hujan (R) pada kejadian-kejadian hujan tertentu, meskipun rata-rata tahunannya tidak banyak berubah, sehingga model yang hanya mengandalkan data R rata-rata historis berisiko meremehkan (*underestimate*) potensi erosi pada skenario iklim masa depan.

Dalam kerangka model sistem dinamik, ketidakpastian proyeksi iklim ini dapat diakomodasi melalui dua pendekatan utama. Pendekatan pertama adalah dengan memperlakukan skenario curah hujan sebagai salah satu dimensi tambahan dalam analisis skenario kebijakan pada Bab 5, sehingga setiap skenario intervensi (BAU, struktural, non-struktural) dapat disimulasikan di bawah beberapa skenario iklim yang berbeda (misalnya skenario iklim historis, skenario peningkatan moderat, dan skenario peningkatan ekstrem intensitas hujan), menghasilkan matriks kombinasi skenario yang lebih komprehensif untuk mendukung pengambilan keputusan yang tangguh (*robust*) terhadap ketidakpastian iklim. Pendekatan kedua adalah dengan memasukkan variabel iklim sebagai salah satu elemen dalam CLD itu sendiri, misalnya dengan menambahkan jalur kausal dari variabel eksogen "intensitas hujan ekstrem" menuju variabel "debit limpasan" pada Gambar 3.1, sehingga pengaruh perubahan iklim terhadap struktur sistem menjadi eksplisit tergambar, bukan sekadar tersembunyi dalam asumsi nilai parameter.

Terlepas dari pendekatan mana yang dipilih, prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) menganjurkan agar perencanaan infrastruktur pengendali sedimen jangka panjang termasuk penentuan kapasitas desain bangunan penahan

sedimen sebagaimana dibahas pada Subbab 5.3 tidak semata-mata didasarkan pada data historis, melainkan mempertimbangkan margin keamanan tambahan untuk mengakomodasi ketidakpastian peningkatan intensitas hujan ekstrem akibat perubahan iklim di masa depan, sejalan dengan pembahasan mengenai sumber-sumber ketidakpastian model yang akan diuraikan lebih rinci pada Subbab 4.7.

➤ **1.8 Perspektif Komparatif: Praktik Konservasi DAS di Berbagai Negara**

Persoalan sedimentasi DAS dan berbagai pendekatan penanganannya bukan merupakan fenomena yang unik dialami Indonesia semata, melainkan tantangan yang dihadapi banyak negara dengan kondisi geografis tropis maupun subtropis yang memiliki topografi curam dan curah hujan tinggi. Memahami secara singkat bagaimana negara lain menangani persoalan serupa dapat memperkaya perspektif pembaca sebelum mempelajari kerangka pemodelan yang menjadi fokus utama buku ini pada bab-bab berikutnya.

Di kawasan Asia Timur, Jepang memiliki pengalaman panjang dalam pengembangan teknologi sabo (istilah yang secara harfiah berarti “pengendalian pasir” dalam bahasa Jepang, dan menjadi asal-usul istilah sabo dam yang telah dibahas pada Subbab 5.3) sejak lebih dari satu abad lalu, sebagai respons terhadap kerawanan aliran debris pascaletusan gunung berapi dan gempa bumi pada kawasan pegunungan curam di negara tersebut sebuah konteks yang memiliki kemiripan mendasar dengan kerawanan longsoran kaldera vulkanik yang dialami DAS Jeneberang sebagaimana akan dibahas pada Bab 6. Di kawasan Amerika Tengah, Kosta Rika dikenal luas atas keberhasilan skema pembayaran jasa lingkungan (*payment for environmental services*) yang

memberikan insentif finansial langsung kepada pemilik lahan di kawasan hulu DAS untuk mempertahankan tutupan hutan, sebuah pendekatan yang secara konseptual dapat dipandang sebagai upaya kebijakan untuk mengaktifkan loop penyeimbang (*balancing loop*) B1 yang telah diidentifikasi pada Tabel 9, dengan menciptakan insentif ekonomi positif bagi konservasi alih-alih semata mengandalkan regulasi larangan.

Di kawasan Asia Tenggara sendiri, sejumlah negara seperti Filipina dan Vietnam menghadapi tantangan yang secara struktural mirip dengan Indonesia, yaitu tekanan konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian di kawasan DAS pegunungan yang padat penduduk, dan telah mengembangkan berbagai skema kombinasi antara pendekatan struktural (terasering, bangunan pengendali erosi) dan non-struktural (sistem pertanian lorong/*alley cropping*, agroforestri berbasis komoditas bernilai ekonomi tinggi) yang secara konseptual sejalan dengan klasifikasi skenario kebijakan yang dibahas pada Bab 5. Kesamaan tantangan struktural antarnegara berkembang tropis inilah yang menjadi salah satu alasan mengapa kerangka pemodelan sistem dinamik dengan sifatnya yang generik dan dapat diadaptasi lintas-konteks sebagaimana ditekankan pada Subbab 2.6 memiliki relevansi yang luas, tidak terbatas pada satu negara atau satu DAS tertentu saja.

Perbandingan lintas-negara ini juga mengingatkan bahwa tidak ada satu resep kebijakan tunggal yang dapat diterapkan secara seragam di semua konteks; efektivitas suatu pendekatan konservasi sangat bergantung pada konteks sosial-ekonomi, kelembagaan, dan biofisik setempat. Prinsip inilah yang mendasari pentingnya proses konseptualisasi model yang disesuaikan konteks lokal sebagaimana akan dibahas secara mendalam pada Bab 3, alih-alih sekadar mengadopsi struktur model dari konteks negara lain tanpa penyesuaian.

BAB II

PENGANTAR PEMODELAN SISTEM DINAMIK UNTUK LINGKUNGAN

➤ 2.1 Mengapa Menggunakan Pendekatan Sistem Dinamik?

Sistem dinamik (*system dynamics*) adalah suatu metodologi untuk memahami perilaku sistem yang kompleks dari waktu ke waktu, dengan menitikberatkan pada struktur umpan balik (*feedback*), akumulasi (*stock*), dan penundaan waktu (*delay*) sebagai penentu utama perilaku sistem, bukan sekadar peristiwa-peristiwa yang tampak di permukaan. Metodologi ini pertama kali dikembangkan oleh Jay W. Forrester di Massachusetts Institute of Technology pada akhir dekade 1950-an, mula-mula untuk keperluan analisis dinamika industri, sebelum kemudian diperluas penerapannya ke berbagai bidang termasuk kebijakan publik, kependudukan, ekonomi, dan pengelolaan lingkungan.

Sistem pengelolaan DAS merupakan kandidat yang sangat sesuai untuk dianalisis dengan pendekatan sistem dinamik karena beberapa alasan mendasar. Pertama, DAS adalah sistem dengan banyak variabel yang saling terkait melalui hubungan sebab-akibat yang tidak selalu linear, misalnya hubungan antara alih fungsi lahan, curah hujan, aliran permukaan, dan sedimentasi yang telah diuraikan pada Bab 1. Kedua, sistem DAS memiliki mekanisme umpan balik, baik yang bersifat memperkuat (*reinforcing*) maupun menyeimbangkan (*balancing*), sebagaimana terlihat pada fenomena di mana sedimentasi waduk yang tinggi dapat mendorong perubahan

pola pemanfaatan lahan di kawasan tangkapan air, yang pada gilirannya memengaruhi laju sedimentasi itu sendiri. Ketiga, terdapat penundaan waktu (*time delay*) yang signifikan antara suatu tindakan atau kejadian di kawasan hulu dan dampaknya yang teramati di kawasan hilir, sehingga hubungan sebab-akibat sulit ditangkap hanya melalui pengamatan langsung atau analisis statistik potongan-lintang (*cross-sectional*). Keempat, pendekatan ini memungkinkan simulasi berbagai skenario kebijakan konservasi secara *ex-ante*, sebelum kebijakan tersebut benar-benar diimplementasikan di lapangan, sehingga dapat menjadi alat bantu pengambilan keputusan yang efisien dari segi biaya dan waktu.

Dibandingkan dengan pendekatan pemodelan hidrologi konvensional yang umumnya berorientasi pada prediksi debit dan volume sedimen berbasis data spasial-temporal secara rinci (misalnya model SWAT, ANSWERS, atau AGNPS), pemodelan sistem dinamik menawarkan keunggulan dalam merepresentasikan struktur kausal antarvariabel secara eksplisit dan mudah dikomunikasikan kepada pemangku kebijakan yang tidak selalu memiliki latar belakang teknis mendalam. Kedua pendekatan ini sesungguhnya bersifat komplementer: model hidrologi konvensional unggul dalam akurasi prediksi kuantitatif berbasis proses fisik yang rinci, sedangkan model sistem dinamik unggul dalam mengungkap struktur kebijakan dan perilaku sistem jangka panjang. Pada Bab 4, kedua pendekatan tersebut akan dipadukan melalui integrasi formula USLE/MUSLE ke dalam struktur model sistem dinamik.

➤ 2.2 Sejarah Singkat dan Perkembangan Metodologi

Setelah diperkenalkan oleh Forrester melalui karyanya mengenai dinamika industri, metodologi sistem dinamik memperoleh momentum yang lebih luas melalui studi *Limits to*

Growth yang disusun oleh tim peneliti di MIT pada awal dekade 1970-an, yang menggunakan model sistem dinamik berskala global (World3) untuk menganalisis interaksi antara pertumbuhan populasi, produksi industri, konsumsi sumber daya alam, dan pencemaran lingkungan. Hal tersebut menjadi salah satu tonggak penting yang memperkenalkan pendekatan sistem dinamik ke ranah kebijakan lingkungan dan keberlanjutan (*sustainability*), dan sejak itu metodologi ini terus berkembang serta diterapkan pada skala yang lebih spesifik, termasuk pada tingkat DAS individual.

Perkembangan perangkat lunak simulasi turut mendorong meluasnya adopsi metodologi ini, karena memungkinkan pembangunan model tanpa memerlukan keahlian pemrograman komputer tingkat lanjut. Sejumlah perangkat lunak populer yang digunakan dalam pemodelan sistem dinamik untuk keperluan lingkungan dan sumber daya air disajikan pada Tabel di bawah ini.

Tabel 5. Perbandingan perangkat lunak pemodelan sistem dinamik yang umum digunakan dalam kajian lingkungan

Perangkat Lunak	Karakteristik Utama	Contoh Pemanfaatan pada Kajian DAS
<i>Vensim (Ventana Systems)</i>	Antarmuka grafis untuk CLD dan SFD; dilengkapi fitur optimasi dan analisis sensitivitas; tersedia versi PLE gratis untuk kalangan akademik	Simulasi dinamika erosi-sedimentasi, kalibrasi parameter model hidrologi sederhana

Perangkat Lunak	Karakteristik Utama	Contoh Pemanfaatan pada Kajian DAS
<i>Stella/iThink (isee systems)</i>	Antarmuka intuitif berorientasi pendidikan; visualisasi stok-aliran yang mudah dipahami pemula	Model pembelajaran interaktif untuk edukasi konservasi DAS
<i>Powersim</i>	Berorientasi pada aplikasi bisnis dan kebijakan korporat, dengan dukungan simulasi Monte Carlo	Analisis skenario kebijakan dengan ketidakpastian parameter
<i>AnyLogic</i>	Mendukung pemodelan hibrida (sistem dinamik, agen, dan diskrit-kejadian) dalam satu platform	Integrasi perilaku aktor (petani, pengelola waduk) dengan dinamika biofisik DAS

Sumber: Kompilasi penulis dari Sterman (2000) dan Ford (2010)

Terlepas dari perbedaan antarmuka dan fitur tambahan pada masing-masing perangkat lunak tersebut, seluruhnya dibangun di atas fondasi konseptual yang sama, yaitu representasi sistem melalui diagram lingkaran kausal (*Causal Loop Diagram/CLD*) pada tahap konseptualisasi, dan diagram stok-aliran (*Stock and Flow Diagram/SFD*) pada tahap formulasi kuantitatif, yang akan dijelaskan pada dua subbab berikut.

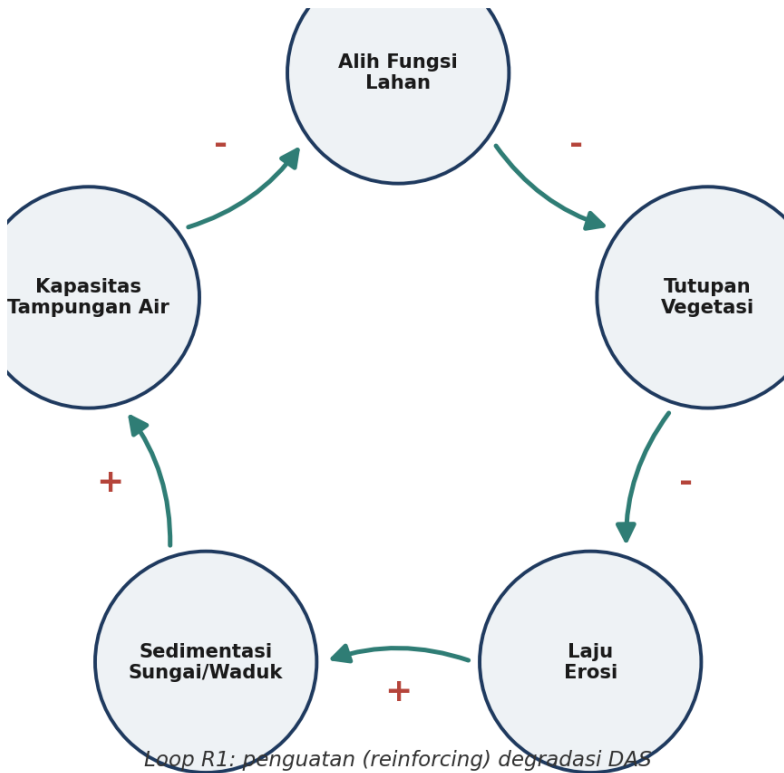
➤ 2.3 Causal Loop Diagram (CLD)

Causal Loop Diagram atau diagram lingkaran kausal adalah representasi grafis yang menggambarkan hubungan sebab-akibat antarvariabel dalam suatu sistem melalui rangkaian node (variabel) yang dihubungkan oleh anak panah (link) bertanda polaritas positif (+) atau negatif (-). Polaritas positif menunjukkan bahwa perubahan pada variabel penyebab akan menyebabkan perubahan pada variabel akibat ke arah yang sama (searah), sedangkan polaritas negatif menunjukkan perubahan ke arah yang berlawanan.

Rangkaian hubungan kausal yang membentuk suatu lingkaran tertutup (*closed loop*) disebut sebagai feedback loop, yang secara garis besar dapat digolongkan ke dalam dua jenis. *Reinforcing loop* (loop penguatan), umumnya dinotasikan dengan huruf R, adalah lingkaran kausal dengan jumlah polaritas negatif genap (termasuk nol), yang menyebabkan perubahan pada suatu variabel akan terus diperkuat dari waktu ke waktu sehingga menghasilkan perilaku pertumbuhan atau penurunan eksponensial. *Balancing loop* (*loop penyeimbang*), dinotasikan dengan huruf B, adalah lingkaran kausal dengan jumlah polaritas negatif ganjil, yang cenderung membawa sistem menuju suatu titik keseimbangan atau kondisi stabil (goal-seeking behavior).

Gambar 4 menyajikan contoh CLD sederhana yang menggambarkan mekanisme umpan balik penguatan (*reinforcing loop*) dalam proses degradasi lahan pada suatu DAS. Peningkatan alih fungsi lahan menurunkan tutupan vegetasi, yang meningkatkan laju erosi, yang pada gilirannya meningkatkan sedimentasi sungai dan waduk, sehingga menurunkan kapasitas tampungan air. Penurunan kapasitas tampungan air ini sering direspons melalui perluasan pembukaan lahan baru untuk mengompensasi berkurangnya ketersediaan air pada lahan yang sudah ada, sehingga menutup

lingkaran dan kembali mendorong alih fungsi lahan lebih lanjut sebuah pola yang, tanpa intervensi kebijakan yang memadai, akan terus terakselerasi dari waktu ke waktu.



Gambar 3. Contoh Causal Loop Diagram (CLD) sederhana: lingkaran penguatan (reinforcing loop) pada degradasi lahan AS

CLD berperan penting pada tahap awal pemodelan karena memfasilitasi diskusi antarpemangku kepentingan untuk menyepakati batas sistem (*system boundary*) dan variabel-variabel kunci yang relevan, tanpa perlu terlebih dahulu memikirkan detail formulasi matematisnya. Kelemahan utama

CLD adalah ketidakmampuannya merepresentasikan perbedaan mendasar antara variabel yang bersifat akumulatif (stok) dan variabel yang bersifat laju perubahan (aliran), suatu perbedaan yang sangat penting dalam analisis kuantitatif dan yang diatasi melalui representasi Stock and Flow Diagram.

➤ 2.4 *Stock and Flow Diagram (SFD)*

Stock and Flow Diagram atau diagram stok-aliran merupakan representasi yang lebih terstruktur secara matematis dibandingkan CLD, dengan membedakan secara eksplisit antara empat elemen utama, yaitu stok (*stock/level*), aliran (*flow/rate*), konverter (*auxiliary variable*), dan konektor informasi (*information link*).

Stok merepresentasikan akumulasi suatu kuantitas pada suatu titik waktu, misalnya volume sedimen yang tertampung di suatu waduk, dan secara matematis dinyatakan sebagai integral dari selisih aliran masuk (*inflow*) dan aliran keluar (*outflow*) terhadap waktu. Aliran merepresentasikan laju perubahan stok per satuan waktu, misalnya laju masuknya sedimen ke waduk (ton/tahun) atau laju pengerukan sedimen. Konverter adalah variabel bantu yang mengonversi informasi dari stok maupun variabel eksogen menjadi nilai yang digunakan untuk menentukan besaran aliran, misalnya koefisien erodibilitas tanah. Konektor informasi menggambarkan aliran informasi (bukan aliran materi) yang menghubungkan stok atau konverter dengan aliran, dan merupakan elemen yang membedakan SFD dari sekadar diagram alir proses biasa karena mampu merepresentasikan mekanisme umpan balik secara kuantitatif.

$$\text{Stok}(t) = \text{Stok}(t_0) + \int [\text{Aliran Masuk}(\tau) - \text{Aliran Keluar}(\tau)] dt ,$$

untuk τ dari t_0 hingga t

Gambar 5 menyajikan contoh SFD sederhana untuk merepresentasikan volume sedimen yang tertampung pada suatu waduk, dengan aliran masuk berupa laju sedimentasi dari hulu (dipengaruhi oleh laju erosi lahan) dan aliran keluar berupa laju pengeluaran sedimen melalui mekanisme flushing atau pengoperasian bangunan pengendali sedimen seperti sabo dam.



Gambar 4. Contoh Stock and Flow Diagram (SFD) sederhana untuk stok sedimen pada waduk

Transformasi dari CLD ke SFD merupakan tahap krusial dalam proses pemodelan karena pada tahap inilah pemodel dipaksa untuk secara eksplisit mengidentifikasi jenis (stok atau aliran) dari setiap variabel yang telah diidentifikasi pada tahap konseptualisasi, sekaligus merumuskan persamaan matematis yang menghubungkan antarvariabel tersebut. Proses ini akan dibahas secara lebih mendalam pada Bab 3 (konseptualisasi variabel DAS) dan Bab 4 (formulasi matematis dan kalibrasi).

➤ 2.5 Tahapan Umum Pembangunan Model Sistem Dinamik

Secara umum, proses pembangunan model sistem dinamik untuk kajian lingkungan mengikuti tahapan siklikal yang terdiri atas lima langkah utama: (1) perumusan masalah dan

penetapan batas sistem (*problem articulation*), yaitu menetapkan secara jelas fenomena dinamis yang ingin dipahami serta rentang waktu dan variabel yang relevan; (2) formulasi hipotesis dinamis (*dynamic hypothesis formulation*) melalui penyusunan CLD yang menjelaskan mekanisme umpan balik yang diduga menjadi penyebab utama perilaku sistem yang diamati; (3) formulasi model kuantitatif (*formulation*) melalui penyusunan SFD dan penulisan persamaan matematis untuk setiap aliran dan konverter; (4) pengujian model (*testing*), mencakup verifikasi struktural, kalibrasi parameter terhadap data historis, dan analisis sensitivitas; serta (5) perancangan dan evaluasi kebijakan (*policy design and evaluation*), yaitu penggunaan model yang telah diuji untuk mensimulasikan berbagai skenario intervensi kebijakan.

Bab-bab selanjutnya dalam buku ini disusun sejalan dengan tahapan tersebut: Bab 3 membahas konseptualisasi sistem dinamik pada komponen DAS (tahap 1 dan 2), Bab 4 membahas formulasi matematika dan kalibrasi model (tahap 3 dan 4), Bab 5 membahas simulasi skenario kebijakan konservasi (tahap 5), dan Bab 6 mengilustrasikan keseluruhan siklus tersebut melalui aplikasi pada studi kasus nyata.

➤ 2.6 Ragam Penerapan Sistem Dinamik pada Bidang Lingkungan dan Sumber Daya Alam

Untuk memperkaya wawasan pembaca mengenai luasnya cakupan penerapan metodologi sistem dinamik sebelum masuk lebih dalam ke konteks spesifik DAS pada Bab 3, subbab ini menguraikan secara singkat beberapa ranah penerapan sistem dinamik pada bidang lingkungan dan sumber daya alam secara lebih luas, yang masing-masing memiliki kemiripan struktural dengan persoalan konservasi DAS meskipun berbeda domain substantifnya.

Pada bidang kependudukan dan keberlanjutan global, model World3 yang mendasari studi *Limits to Growth* telah disinggung pada Subbab 2.2, dengan struktur inti berupa lima subsistem yang saling berinteraksi: populasi, produksi industri, produksi pangan, sumber daya tak terbarukan, dan pencemaran sebuah arsitektur yang menjadi inspirasi bagi banyak model keberlanjutan lingkungan berikutnya, termasuk model-model DAS, karena menunjukkan bagaimana subsistem sosial-ekonomi dan biofisik dapat direpresentasikan dalam satu kerangka terintegrasi. Pada bidang perikanan dan kelautan, model sistem dinamik banyak digunakan untuk menganalisis dinamika populasi ikan tangkap dalam kaitannya dengan tekanan penangkapan (*fishing effort*), dengan struktur reinforcing-balancing loop yang mirip dengan dinamika degradasi lahan DAS: penangkapan berlebih dapat memicu penurunan stok ikan yang, tanpa regulasi memadai, justru mendorong intensifikasi upaya penangkapan lebih lanjut untuk mempertahankan pendapatan nelayan, sebuah pola loop penguatan yang analog dengan loop degradasi lahan pada Gambar 4.

Pada bidang epidemiologi, model sistem dinamik digunakan secara luas untuk mensimulasikan penyebaran penyakit menular melalui struktur kompartemen populasi (misalnya kelompok rentan/*susceptible*, terinfeksi/*infected*, dan pulih/*recovered*), yang meskipun secara substantif sangat berbeda dari konteks DAS, berbagi arsitektur matematis stok-aliran yang identik dengan model sedimentasi waduk yang dibahas pada buku ini memperkuat argumen bahwa kekuatan utama sistem dinamik terletak pada keumuman (*generality*) kerangka berpikirnya, bukan pada domain aplikasi tertentu. Pada bidang pengelolaan sumber daya air secara lebih luas, sistem dinamik telah diterapkan untuk analisis kebijakan alokasi

air lintas sektor (irigasi, domestik, industri), perencanaan adaptasi perubahan iklim pada sektor pertanian, hingga evaluasi kebijakan pengelolaan sampah perkotaan, yang seluruhnya berbagi karakteristik umum berupa banyaknya variabel yang saling terkait, adanya waktu tunda, dan kebutuhan analisis kebijakan jangka panjang.

➤ **2.7 Kelebihan dan Keterbatasan Pendekatan Sistem Dinamik**

Sebagai penutup bab pengantar ini, penting bagi pembaca untuk memahami secara berimbang baik kelebihan maupun keterbatasan pendekatan sistem dinamik, agar penerapannya pada konteks konservasi DAS dilakukan secara proporsional dan tidak berlebihan (*overclaiming*) terhadap kemampuan sesungguhnya dari metodologi ini.

Tabel 6. Kelebihan dan keterbatasan utama pendekatan pemodelan sistem dinamik untuk kajian DAS

Aspek	Kelebihan	Keterbatasan
Representasi struktur kausal	Mampu menggambarkan mekanisme umpan balik secara eksplisit dan mudah dikomunikasikan	Penyederhanaan berlebihan dapat mengabaikan heterogenitas spasial dalam DAS
Kebutuhan data	Dapat berjalan dengan data agregat/rata-rata DAS yang lebih terbatas dibanding model terdistribusi	Kurang mampu memberikan informasi spasial rinci (misalnya peta sebaran erosi per petak lahan)

Aspek	Kelebihan	Keterbatasan
Analisis kebijakan jangka panjang	Unggul dalam analisis skenario dan simulasi dampak jangka panjang (puluhan tahun)	Akurasi prediksi jangka pendek (harian/mingguan) umumnya kalah presisi dibanding model hidrologi berbasis proses fisik terperinci
Komunikasi ke pemangku kebijakan	CLD relatif mudah dipahami oleh pemangku kepentingan nonteknis	Interpretasi yang salah dapat terjadi apabila polaritas loop tidak dijelaskan dengan tepat
Integrasi lintas-disiplin	Memungkinkan integrasi variabel biofisik dan sosial-ekonomi dalam satu model	Integrasi tersebut menuntut kolaborasi lintas-disiplin yang tidak selalu mudah dilakukan dalam praktik

Sumber: Kompilasi penulis dari Sterman (2000), Meadows (2008), dan Ford (2010)

Pemahaman yang berimbang atas Tabel 6 mengarahkan pada rekomendasi metodologis yang telah disinggung pada Subbab 2.1, yaitu bahwa pendekatan sistem dinamik idealnya diposisikan sebagai pelengkap (complement), bukan pengganti (substitute), bagi model hidrologi konvensional berbasis proses fisik seperti USLE/MUSLE, SWAT, atau AGNPS. Sistem dinamik memberikan nilai tambah terbesarnya justru pada aspek yang

menjadi kelemahan model-model konvensional tersebut, yaitu representasi eksplisit mekanisme umpan balik jangka panjang dan kemudahan penggunaannya sebagai alat komunikasi serta simulasi skenario kebijakan bagi pemangku kepentingan nonteknis sebuah kombinasi yang akan ditunjukkan secara konkret melalui integrasi USLE ke dalam struktur sistem dinamik pada Bab 4.

➤ 2.8 Perbandingan dengan Pendekatan Pemodelan Lain

Untuk memberikan konteks metodologis yang lebih lengkap, penting bagi pembaca memahami posisi sistem dinamik relatif terhadap dua pendekatan pemodelan sistem kompleks lainnya yang juga banyak digunakan dalam kajian lingkungan dan sumber daya alam, yaitu pemodelan berbasis agen (*agent-based modeling/ABM*) dan pemodelan berbasis kejadian diskret (*discrete-event modeling*).

Pemodelan berbasis agen merepresentasikan sistem melalui sekumpulan entitas otonom (agen) yang berinteraksi mengikuti aturan perilaku individual, dengan pola sistem secara keseluruhan (*emergent behavior*) muncul dari akumulasi interaksi antaragen tersebut, alih-alih ditetapkan secara top-down melalui persamaan agregat sebagaimana pada sistem dinamik. Pendekatan ini sangat sesuai untuk merepresentasikan heterogenitas perilaku aktor individual, misalnya untuk memodelkan keputusan masing-masing rumah tangga tani secara individual dalam merespons insentif kebijakan konservasi, sesuatu yang sulit ditangkap oleh model sistem dinamik yang cenderung merepresentasikan populasi rumah tangga tani sebagai satu stok agregat (sebagaimana tampak pada variabel "Tekanan Ekonomi Rumah Tangga Tani" pada Gambar 3.2). Pemodelan berbasis kejadian diskret, di sisi lain, berfokus pada urutan kejadian-kejadian diskret pada titik waktu

tertentu (bukan perubahan kontinu), dan lebih sesuai untuk memodelkan proses seperti antrean layanan pengelolaan bangunan pengendali sedimen atau jadwal operasional pengerukan waduk.

Tabel 7. Perbandingan karakteristik tiga pendekatan pemodelan sistem kompleks yang relevan bagi kajian lingkungan

Karakteristik	Sistem Dinamik	Pemodelan Berbasis Agen	Pemodelan Kejadian Diskret
Unit analisis	Stok dan aliran agregat	Agen individual dan interaksinya	Entitas dan kejadian diskret
Representasi waktu	Kontinu (atau langkah waktu tetap)	Kontinu atau diskret	Diskret, berbasis kejadian
Heterogenitas aktor	Rendah (populasi diagregasi)	Tinggi (setiap agen dapat berbeda)	Sedang, tergantung desain
Kesesuaian untuk DAS	Dinamika biofisik & kebijakan agregat DAS	Perilaku individual petani/pengelola lahan	Operasional teknis bangunan air

Karakteristik	Sistem Dinamik	Pemodelan Berbasis Agen	Pemodelan Kejadian Diskret
Kompleksitas komputasi	Relatif rendah	Tinggi, terutama untuk populasi besar	Sedang

Sumber: Kompilasi penulis dari Sterman (2000) dan Ford (2010)

Ketiga pendekatan tersebut bersifat komplementer, bukan saling menggantikan, dan pada praktik pemodelan lingkungan mutakhir semakin banyak dikembangkan model hibrida yang memadukan sistem dinamik untuk merepresentasikan dinamika biofisik agregat DAS dengan pemodelan berbasis agen untuk merepresentasikan heterogenitas keputusan aktor individual di kawasan hulu sebuah arah pengembangan lanjutan yang dapat menjadi topik bagi pembaca yang berminat memperdalam kerangka konseptual pada Gambar 3.2 dengan tingkat kedetailan aktor yang lebih tinggi.

➤ 2.9 Praktik Baik Dokumentasi dan Transparansi Model

Sebagai penutup pembahasan metodologis pada bab ini, penting ditekankan bahwa nilai suatu model sistem dinamik tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan strukturnya, melainkan juga oleh transparansi dan kemudahan model tersebut diperiksa ulang (*auditability*) oleh pihak lain, termasuk pengambil kebijakan yang akan menggunakan hasilnya maupun peneliti lain yang hendak mereplikasi atau mengembangkan model tersebut lebih lanjut. Praktik baik dokumentasi model umumnya mencakup empat komponen: pertama, dokumentasi struktur model secara lengkap (seluruh

CLD dan SFD beserta definisi setiap variabel dan satuannya); kedua, dokumentasi sumber dan metode pengolahan data yang digunakan untuk kalibrasi, termasuk asumsi-asumsi yang diambil ketika data tidak tersedia lengkap; ketiga, dokumentasi hasil pengujian model (kalibrasi, validasi, dan uji sensitivitas) secara transparan, termasuk pelaporan keterbatasan dan tingkat ketidakpastian hasil; dan keempat, dokumentasi asumsi yang mendasari setiap skenario kebijakan yang disimulasikan, agar pengguna hasil model memahami dengan tepat batasan interpretasi yang berlaku.

Praktik dokumentasi yang baik juga mencakup keterbukaan mengenai perangkat lunak dan versi yang digunakan (mengacu pada perbandingan perangkat lunak Tabel 5), sehingga berkas model dapat dibuka dan diperiksa ulang oleh pihak lain yang memiliki akses ke perangkat lunak yang sama. Sejalan dengan prinsip keterbukaan ilmiah (*open science*) yang semakin ditekankan dalam berbagai bidang, sejumlah peneliti sistem dinamik juga mulai membiasakan diri membagikan berkas model beserta dokumentasinya secara terbuka melalui repositori data, sehingga hasil kajian dapat direplikasi dan dikembangkan lebih lanjut oleh peneliti lain sebuah praktik yang, apabila diterapkan secara konsisten pada kajian-kajian sedimentasi DAS di Indonesia, berpotensi mempercepat akumulasi pengetahuan kolektif berkelanjutan mengenai Waduk Bili-Bili yang akan dibahas pada Bab 6.

BAB III

KONSEPTUALISASI SISTEM DINAMIK PADA KOMPONEN DAS

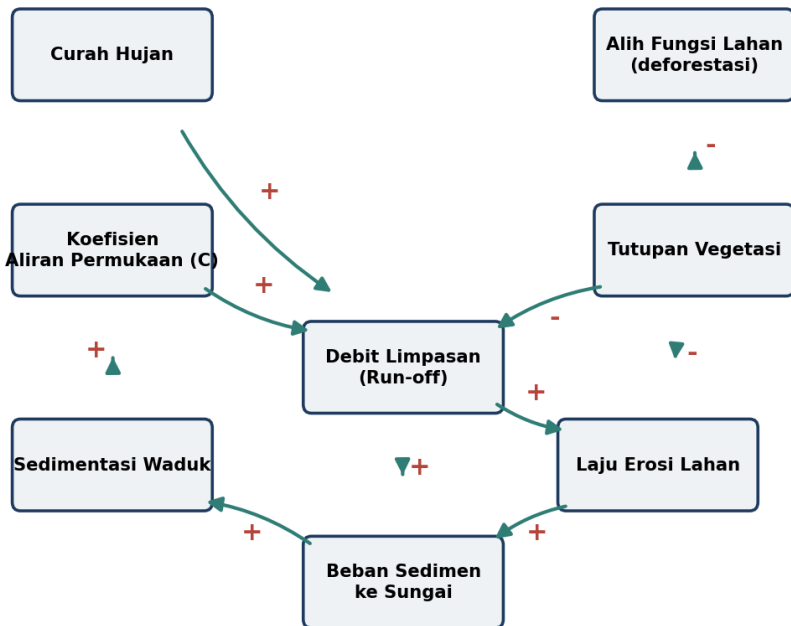
➤ **3.1 Identifikasi Variabel Kunci dan Batas Sistem**

Langkah pertama dalam konseptualisasi model sistem dinamik untuk kajian DAS adalah mengidentifikasi variabel-variabel kunci yang akan dimasukkan ke dalam batas sistem (*system boundary*). Berdasarkan mekanisme erosi-transport-deposisi yang telah diuraikan pada Bab 1, terdapat sejumlah variabel inti yang secara konsisten muncul dalam berbagai kajian pemodelan DAS, yaitu: curah hujan, tutupan/penggunaan lahan, koefisien aliran permukaan, debit limpasan (*run-off*), laju erosi lahan, beban sedimen yang tertransport ke sungai, dan volume sedimen yang terdeposisi pada badan air penerima seperti waduk.

Penetapan batas sistem memerlukan pertimbangan yang cermat antara kelengkapan representasi fenomena dan kesederhanaan model yang tetap dapat dipahami serta dikalibrasi. Model yang terlalu sederhana berisiko mengabaikan mekanisme umpan balik penting, sementara model yang terlalu kompleks akan sulit dikalibrasi karena kebutuhan data yang sangat besar serta menyulitkan interpretasi hasil bagi pengguna akhir seperti pengambil kebijakan. Sebagai prinsip umum, batas sistem sebaiknya mencakup seluruh variabel yang termasuk dalam hipotesis dinamis yang ingin diuji, namun mengeksklusi variabel-variabel yang meskipun relevan secara teoritis, pengaruhnya terhadap dinamika sistem dalam rentang waktu simulasi yang dikaji relatif dapat diabaikan.

➤ 3.2 Hubungan Timbal Balik Alih Fungsi Lahan, Curah Hujan, Run-off, dan Laju Sedimen

Gambar 6 menyajikan diagram lingkaran kausal (CLD) yang lebih terperinci dibandingkan Gambar 4, dengan menggambarkan keterkaitan antara curah hujan, alih fungsi lahan, tutupan vegetasi, koefisien aliran permukaan, debit limpasan, laju erosi lahan, beban sedimen, dan sedimentasi waduk. Diagram ini merupakan hipotesis dinamis (*dynamic hypothesis*) yang menjadi dasar bagi pembangunan model kuantitatif pada Bab 4.



Gambar 5. *Causal Loop Diagram* (CLD) keterkaitan alih fungsi lahan, curah hujan, run-off, dan laju sedimentasi DAS

Terdapat beberapa jalur kausal penting yang perlu diperhatikan dari diagram tersebut. Pertama, curah hujan memengaruhi debit limpasan secara langsung, namun besarnya pengaruh tersebut dimodifikasi oleh koefisien aliran permukaan (*runoff coefficient*, C), yang pada gilirannya ditentukan oleh tutupan vegetasi. Kedua, tutupan vegetasi dipengaruhi secara negatif oleh alih fungsi lahan, sehingga alih fungsi lahan memiliki pengaruh tidak langsung (melalui dua jalur) terhadap peningkatan debit limpasan: jalur pertama melalui penurunan intersepsi hujan dan infiltrasi, jalur kedua melalui peningkatan koefisien aliran permukaan. Ketiga, debit limpasan dan tutupan vegetasi bersama-sama menentukan laju erosi lahan, yang kemudian bersama debit limpasan menentukan besarnya beban sedimen yang tertransportasi ke sungai. Keempat, dan yang paling penting dari sudut pandang analisis kebijakan jangka panjang, terdapat lingkaran umpan balik dari sedimentasi waduk kembali ke koefisien aliran permukaan merepresentasikan fenomena di mana penurunan kapasitas tampungan air akibat sedimentasi dapat mendorong perubahan pola pemanfaatan lahan di kawasan tangkapan air (misalnya perluasan lahan pertanian untuk mengompensasi berkurangnya ketersediaan air pada musim kemarau), yang justru memperburuk kondisi tutupan lahan dan mempercepat laju sedimentasi berikutnya.

➤ 3.3 Umpan Balik (*Feedback Loops*) dalam Degradasi Lahan

Identifikasi loop-loop penguatan (*reinforcing*) dan penyeimbang (*balancing*) yang terkandung dalam CLD pada Gambar 6 menjadi dasar untuk memahami mengapa degradasi lahan DAS, bila tidak diintervensi, cenderung berlangsung secara progresif dan sulit dibalikkan (*irreversible* dalam jangka pendek-menengah) tanpa upaya restorasi yang signifikan.

Tabel 8. Identifikasi loop utama pada CLD konseptual DAS dan implikasinya terhadap kebijakan

Loop	Jenis	Deskripsi Mekanisme	Implikasi Kebijakan
R1	<i>Reinforcing</i>	Alih fungsi lahan → turunya tutupan vegetasi → naiknya erosi & sedimentasi → turunya kapasitas tampungan air → mendorong alih fungsi lahan lanjutan	Intervensi dini pada titik mana pun dalam loop dapat memutus siklus sebelum terjadi eskalasi jangka panjang
R2	<i>Reinforcing</i>	Naiknya debit limpasan → naiknya erosi alur/parit → semakin berkurangnya lahan produktif → tekanan pembukaan lahan baru	Program konservasi lahan perlu disertai insentif ekonomi agar tidak memicu pembukaan lahan di tempat lain (<i>leakage</i>)
B1 (potensial)	<i>Balancing</i>	Meningkatnya kesadaran dampak	Loop ini bersifat potensial

Loop	Jenis	Deskripsi Mekanisme	Implikasi Kebijakan
		sedimentasi (melalui edukasi/regulasi) → penerapan praktik konservasi → penurunan laju erosi	(belum otomatis aktif) dan memerlukan intervensi kebijakan eksplisit untuk diaktifkan

Sumber: Analisis Penulis atas Gambar 6

Baris ketiga pada Tabel 9 memiliki makna penting: berbeda dengan loop R1 dan R2 yang bekerja secara otomatis mengikuti hukum-hukum fisik dan ekonomi tanpa perlu intervensi eksternal, loop penyeimbang B1 tidak aktif secara alamiah pada banyak kasus DAS yang mengalami degradasi. Loop tersebut baru akan bekerja apabila terdapat intervensi kebijakan yang secara sengaja menciptakan mekanisme balik (misalnya melalui regulasi tata guna lahan, insentif konservasi, atau program rehabilitasi hutan dan lahan) yang mampu menahan laju loop-loop penguatan. Inilah salah satu wawasan (*insight*) terpenting yang ditawarkan oleh analisis sistem dinamik: tanpa intervensi yang secara eksplisit dirancang untuk mengaktifkan mekanisme penyeimbang, sistem DAS yang mengalami tekanan alih fungsi lahan akan cenderung terus terdegradasi meskipun tidak ada aktor yang secara sengaja menginginkan hal tersebut, sebagai konsekuensi struktural dari dominasi loop-loop penguatan dalam sistem.

➤ 3.4 Dari Konsep ke Struktur Kuantitatif

Setelah hipotesis dinamis dirumuskan melalui CLD dan loop-loop kuncinya teridentifikasi, langkah selanjutnya adalah menerjemahkan setiap variabel ke dalam salah satu dari tiga kategori struktural SFD: stok, aliran, atau konverter. Tabel 10 menyajikan klasifikasi tersebut untuk variabel-variabel utama yang telah dibahas, sebagai jembatan menuju formulasi matematis pada Bab 4.

Tabel 9. Klasifikasi variabel konseptual DAS ke dalam elemen struktural Stock and Flow Diagram

Variabel	Klasifikasi Struktural	Satuan Umum
Volume sedimen tertampung di waduk	Stok	m ³ atau ton
Luas lahan bervegetasi (hutan/tutupan baik)	Stok	hektar (ha)
Laju erosi lahan (dari lahan ke sungai)	Aliran	ton/tahun
Laju sedimentasi masuk ke waduk	Aliran	m ³ /tahun atau ton/tahun
Laju alih fungsi lahan	Aliran	ha/tahun
Koefisien aliran permukaan (C)	Konverter	tanpa dimensi (0–1)
Curah hujan	Variabel eksogen (input)	mm/tahun atau mm/kejadian
<i>Sediment Delivery Ratio</i> (SDR)	Konverter	tanpa dimensi (0–1)

Sumber: Analisis penulis mengacu Forrester (1961) dan Sterman (2000)

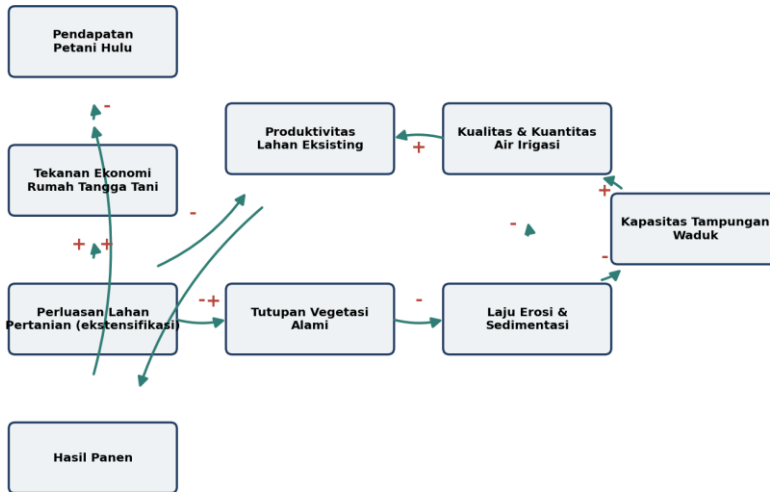
Klasifikasi pada Tabel 10 bukan bersifat mutlak dan dapat disesuaikan dengan tujuan spesifik pemodelan. Sebagai contoh, luas lahan bervegetasi dapat pula dimodelkan sebagai variabel eksogen (input skenario) apabila tujuan kajian adalah menguji dampak berbagai skenario tata guna lahan yang telah ditentukan sebelumnya (given), sebagaimana akan dilakukan pada Bab 5, alih-alih dimodelkan sebagai stok yang berubah secara endogen mengikuti dinamika internal model.

➤ **3.5 Memperluas Batas Sistem: Mengintegrasikan Dimensi Sosial-Ekonomi**

CLD pada Gambar 6 berfokus pada variabel-variabel biofisik DAS. Dalam praktiknya, degradasi DAS jarang semata-mata merupakan persoalan biofisik; ia sering kali berakar dari keputusan sosial-ekonomi rumah tangga tani di kawasan hulu yang terdorong oleh tekanan pemenuhan kebutuhan hidup. Memasukkan dimensi sosial-ekonomi ke dalam batas sistem, sebagaimana disinggung secara filosofis pada Subbab 3.1, dapat memperkaya pemahaman terhadap akar penyebab (*root causes*) degradasi DAS dan membuka ruang bagi perancangan skenario kebijakan yang lebih komprehensif pada Bab 5, khususnya yang menyentuh insentif ekonomi bagi masyarakat hulu.

Gambar 7 menyajikan perluasan CLD yang mengintegrasikan variabel pendapatan petani hulu, tekanan ekonomi rumah tangga tani, dan keputusan perluasan lahan pertanian (ekstensifikasi) ke dalam struktur kausal yang telah dibahas sebelumnya, sekaligus menambahkan jalur umpan balik dari sisi hilir berupa pengaruh kualitas dan kuantitas air irigasi terhadap produktivitas lahan pertanian eksisting.

Loop R1 (kiri): tekanan ekonomi → ekstensifikasi lahan | Loop R2 (kanan): sedimentasi → penurunan mutu air → produktivitas



Gambar 6. CLD diperluas yang mengintegrasikan dimensi sosial-ekonomi petani hulu ke dalam dinamika biofisik DAS

Struktur pada Gambar 7 mengungkap dua lingkaran penguatan (*reinforcing loop*) yang saling berinteraksi. Loop pertama (R1, sisi kiri diagram) menggambarkan bagaimana tekanan ekonomi rumah tangga tani mendorong ekstensifikasi lahan pertanian ke kawasan yang semestinya berfungsi sebagai kawasan konservasi, yang pada gilirannya menurunkan produktivitas lahan eksisting (baik karena kualitas lahan baru yang cenderung lebih marjinal maupun karena degradasi lahan lama akibat kurangnya perhatian pengelolaan), sehingga hasil panen dan pendapatan justru tidak meningkat signifikan atau bahkan menurun dalam jangka menengah-panjang, yang kembali memperkuat tekanan ekonomi pada periode berikutnya. Loop kedua (R2, sisi kanan diagram) menggambarkan bagaimana peningkatan laju erosi dan

sedimentasi menurunkan kualitas dan kuantitas air irigasi yang tersedia (baik akibat pendangkalan saluran maupun penurunan kapasitas tampungan waduk), yang pada gilirannya turut menurunkan produktivitas lahan pertanian yang bergantung pada pasokan air irigasi tersebut.

Wawasan penting yang dapat ditarik dari perluasan model ini adalah bahwa program konservasi DAS yang hanya menysasar aspek biofisik (misalnya sekadar program penanaman pohon tanpa mempertimbangkan mata pencaharian alternatif bagi petani hulu) berisiko tidak berkelanjutan, karena tidak mengatasi loop R1 yang menjadi salah satu pendorong struktural ekstensifikasi lahan. Sebaliknya, program yang memadukan intervensi biofisik dengan intervensi ekonomi misalnya melalui skema imbal jasa lingkungan (*payment for ecosystem services*), diversifikasi mata pencaharian, atau peningkatan produktivitas lahan eksisting melalui intensifikasi berkelanjutan berpotensi memutus loop R1 sekaligus loop R2 secara simultan, sehingga menghasilkan dampak konservasi yang lebih tahan lama. Pertimbangan inilah yang akan tercermin pada perancangan skenario kebijakan gabungan (*mixed policy*) pada Bab 5.

➤ 3.6 Verifikasi Struktur Model Konseptual

Sebelum suatu CLD atau hipotesis dinamis dilanjutkan ke tahap formulasi kuantitatif (SFD) pada Bab 4, praktik yang baik dalam metodologi sistem dinamik menganjurkan dilakukannya verifikasi struktural (*structure verification*), yaitu pengujian kualitatif terhadap kewajaran dan konsistensi struktur model yang telah dibangun, sebelum menghabiskan sumber daya untuk kalibrasi kuantitatif yang lebih intensif. Beberapa pertanyaan verifikasi yang lazim diajukan meliputi: apakah setiap hubungan kausal yang digambarkan memiliki justifikasi

teoretis atau empiris yang jelas (bukan sekadar korelasi tanpa mekanisme kausal yang masuk akal)? Apakah polaritas (+/-) pada setiap link telah ditetapkan secara konsisten dan telah diperiksa oleh lebih dari satu pihak yang memahami konteks lapangan? Apakah terdapat variabel penting yang secara tidak sengaja diabaikan (*missing feedback*), yang apabila dimasukkan berpotensi mengubah kesimpulan mengenai perilaku dominan sistem?

Sebagai ilustrasi penerapan pertanyaan-pertanyaan tersebut pada konteks buku ini, perluasan model dari Gambar 6 menjadi Gambar 7 pada dasarnya merupakan hasil dari proses verifikasi struktural yang mengidentifikasi bahwa model awal (murni biofisik) berisiko mengabaikan salah satu pendorong utama (*root cause*) alih fungsi lahan, yaitu tekanan ekonomi rumah tangga tani. Proses verifikasi struktural bersifat iteratif dan idealnya melibatkan diskusi dengan pemangku kepentingan yang memahami konteks lapangan secara langsung, sejalan dengan prinsip keterlibatan pemangku kepentingan (*co-design*) yang telah disinggung pada Subbab 2.7 dan akan ditekankan kembali pada Subbab 5.6.

➤ **3.7 Teknik Elisitasi Model Bersama Pemangku Kepentingan**

Proses penyusunan CLD sebagaimana dicontohkan pada Gambar 6 dan Gambar 7 dalam praktiknya jarang dilakukan oleh seorang pemodel secara terisolasi di belakang meja kerja. Metodologi sistem dinamik telah mengembangkan seperangkat teknik elisitasi partisipatif yang dikenal sebagai group model building (pembangunan model kelompok), yaitu proses terstruktur untuk melibatkan pemangku kepentingan secara langsung dalam penyusunan struktur model, dengan tujuan ganda: menghasilkan model yang lebih valid secara

konten (karena menggabungkan pengetahuan tacit dari berbagai pihak yang memahami konteks lapangan) dan menghasilkan rasa kepemilikan bersama (*shared ownership*) terhadap model yang pada akhirnya meningkatkan kemungkinan hasil model benar-benar digunakan dalam pengambilan keputusan, bukan sekadar menjadi dokumen teknis yang terabaikan.

Sesi group model *building* untuk kajian DAS umumnya melibatkan perwakilan dari berbagai kelompok pemangku kepentingan yang telah disinggung pada Subbab 1.6: pengelola Balai Wilayah Sungai, dinas kehutanan dan lingkungan hidup daerah, perwakilan kelompok tani di kawasan hulu, akademisi/peneliti, dan idealnya juga perwakilan pengguna air di kawasan hilir. Sesi tersebut difasilitasi menggunakan teknik-teknik terstruktur seperti pemetaan variabel menggunakan catatan tempel (*sticky notes*) yang kemudian disusun bersama menjadi diagram kausal di papan tulis atau media digital kolaboratif, diikuti diskusi terstruktur untuk menyepakati arah dan polaritas setiap hubungan kausal. Fasilitator berperan penting dalam memastikan seluruh peserta termasuk yang mungkin memiliki kekuasaan atau keahlian teknis lebih rendah, seperti perwakilan kelompok tani memiliki kesempatan setara untuk menyampaikan perspektif mereka, mengingat pemahaman mengenai keputusan sosial-ekonomi rumah tangga tani sebagaimana direpresentasikan pada Gambar 7 sering kali hanya dapat diperoleh secara akurat dari pihak yang benar-benar menjalani keputusan tersebut.

Hasil sesi group model building biasanya berupa CLD awal (draft) yang kemudian disempurnakan oleh tim pemodel teknis melalui proses verifikasi struktural sebagaimana dibahas pada Subbab 3.6, sebelum dilanjutkan ke tahap formulasi kuantitatif pada Bab 4. Penting dicatat bahwa keterlibatan pemangku

kepentingan idealnya tidak berhenti pada tahap konseptualisasi ini saja, melainkan berlanjut hingga tahap perancangan skenario kebijakan (Subbab 5.6) dan pemantauan-evaluasi implementasi (Subbab 5.8), sehingga membentuk siklus keterlibatan partisipatif yang utuh sepanjang siklus hidup model.

➤ **3.8 Keterbatasan Pendekatan CLD dan Cara Mengatasinya**

Meskipun CLD merupakan alat yang sangat berguna untuk komunikasi dan konseptualisasi awal sebagaimana ditekankan sepanjang bab ini, penting bagi pemodel untuk menyadari sejumlah keterbatasan mendasarnya agar tidak terjadi kesalahpahaman ketika CLD dikomunikasikan kepada pemangku kepentingan nonteknis. Keterbatasan pertama adalah bahwa polaritas tanda (+/-) pada CLD hanya menunjukkan arah pengaruh, bukan besaran (magnitude) pengaruh tersebut; dua variabel dapat memiliki hubungan positif yang sangat kuat maupun sangat lemah, namun keduanya digambarkan dengan notasi yang identik pada CLD, sehingga CLD semata tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan variabel mana yang paling dominan memengaruhi perilaku sistem tanpa dilengkapi analisis kuantitatif SFD sebagaimana dibahas pada Bab 4.

Keterbatasan kedua adalah risiko kesalahan identifikasi loop dominan tanpa simulasi kuantitatif. Sebuah CLD yang kompleks dengan banyak loop yang saling tumpang tindih, sebagaimana tampak pada Gambar 7, dapat menyulitkan penentuan loop mana yang secara aktual mendominasi perilaku sistem pada rentang waktu dan kondisi parameter tertentu, karena dominasi loop dapat berubah dari waktu ke waktu (*shifting loop dominance*) sebuah fenomena yang hanya dapat diidentifikasi secara meyakinkan melalui simulasi kuantitatif model SFD, bukan melalui inspeksi visual CLD semata.

Keterbatasan ketiga adalah godaan untuk membuat CLD yang terlalu kompleks (*overloaded*) dengan memasukkan terlalu banyak variabel sekaligus, yang alih-alih memperjelas justru mengaburkan pesan utama mengenai mekanisme kausal yang ingin disampaikan; praktik yang baik menganjurkan penyusunan beberapa CLD terpisah yang masing-masing berfokus pada satu mekanisme kausal utama (misalnya CLD terpisah untuk mekanisme biofisik pada Gambar 6 dan mekanisme sosial-ekonomi pada Gambar 7), alih-alih memaksakan seluruh variabel ke dalam satu diagram tunggal yang sulit dibaca.

Cara mengatasi keterbatasan-keterbatasan tersebut pada dasarnya kembali pada prinsip yang telah ditekankan sepanjang Bab 2 dan Bab 3: CLD sebaiknya diposisikan sebagai alat komunikasi dan hipotesis awal (*dynamic hypothesis*) yang bersifat kualitatif, bukan sebagai kesimpulan akhir analisis. Kesimpulan mengenai perilaku sistem yang sesungguhnya termasuk penentuan skenario kebijakan mana yang paling efektif sebagaimana akan dibahas pada Bab 5 harus selalu didasarkan pada hasil simulasi kuantitatif model SFD yang telah dikalibrasi dan diuji sensitivitasnya, sebagaimana dibahas secara rinci pada Bab 4, bukan semata-mata pada inspeksi visual terhadap CLD.

BAB IV

FORMULASI MATEMATIKA DAN KALIBRASI MODEL SEDIMEN

➤ 4.1 Persamaan USLE dan MUSLE sebagai Dasar Estimasi Erosi

Universal Soil Loss Equation (USLE) yang dikembangkan oleh Wischmeier dan Smith merupakan salah satu formula empiris paling banyak digunakan untuk mengestimasi laju erosi lahan tahunan rata-rata pada suatu bidang lahan, dan menjadi titik masuk yang wajar untuk mengintegrasikan pendekatan hidrologi konvensional ke dalam struktur model sistem dinamik. Persamaan dasar USLE dinyatakan sebagai berikut.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Dengan A adalah laju erosi lahan rata-rata tahunan (ton/ha/tahun), R adalah indeks erosivitas hujan (curah hujan dan intensitasnya), K adalah faktor erodibilitas tanah (kepekaan tanah terhadap erosi), LS adalah faktor topografi yang menggabungkan pengaruh kemiringan (slope) dan panjang lereng (slope length), C adalah faktor pengelolaan tanaman/penutup lahan, dan P adalah faktor praktik konservasi tanah (seperti pengolahan lahan menurut kontur atau terasering).

Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) merupakan pengembangan dari USLE yang menggantikan faktor erosivitas hujan tahunan (R) dengan faktor energi limpasan per kejadian hujan, sehingga mampu mengestimasi hasil sedimen (*sediment yield*) langsung per kejadian hujan

tanpa memerlukan faktor nisbah hantaran sedimen (SDR) tambahan, karena energi limpasan itu sendiri sudah merepresentasikan proses transpor sedimen. Persamaan umum MUSLE dinyatakan sebagai berikut.

$$SY = 11,8 \times (Q \times q_p)^{0,56} \times K \times LS \times C \times P$$

Dengan SY adalah hasil sedimen per kejadian hujan (ton), Q adalah volume limpasan (m³), dan q_p adalah debit puncak limpasan (m³/detik), sementara K, LS, C, dan P memiliki makna yang sama seperti pada persamaan USLE. Pemilihan antara USLE dan MUSLE dalam pembangunan model sistem dinamik bergantung pada resolusi temporal yang diinginkan: USLE lebih sesuai untuk model dengan langkah waktu (time step) tahunan, sementara MUSLE lebih sesuai untuk model dengan resolusi kejadian hujan atau bulanan.

Tabel 10. Definisi dan rentang nilai tipikal parameter USLE/MUSLE yang relevan pada konteks DAS tropis

Parameter	Definisi	Rentang Nilai Tipikal	Sumber Data Umum
R (erosivitas hujan)	Indeks energi kinetik dan intensitas hujan tahunan	Bervariasi menurut iklim regional	Data curah hujan harian/bulanan stasiun pengamatan
K (erodibilitas tanah)	Kepekaan tanah terhadap pelepasan dan pengangkutan partikel	0,02 – 0,70 (tergantung tekstur & struktur tanah)	Peta jenis tanah, uji laboratorium tekstur tanah

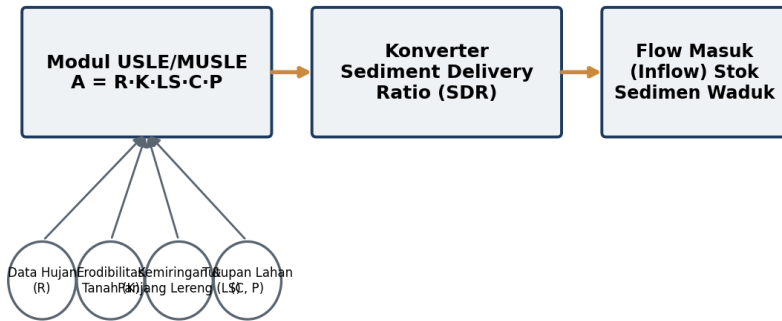
Parameter	Definisi	Rentang Nilai Tipikal	Sumber Data Umum
LS (topografi)	Pengaruh gabungan kemiringan dan panjang lereng	Meningkat tajam pada lereng > 15%	Data topografi (DEM) resolusi tinggi
C (pengelolaan lahan)	Efektivitas tutupan vegetasi/tanaman dalam meredam erosi	0,001 (hutan rapat) – 1,0 (lahan terbuka)	Interpretasi peta penggunaan lahan/penutup lahan
P (praktik konservasi)	Efektivitas teknik konservasi tanah yang diterapkan	0,1 (teras bangku terawat) – 1,0 (tanpa konservasi)	Survei lapangan praktik pengelolaan lahan

Sumber: Kompilasi penulis dari Wischmeier & Smith (1978) dan Arsyad (2012)

➤ 4.2 Integrasi Formula Hidrologi ke dalam Struktur Sistem Dinamik

Integrasi USLE/MUSLE ke dalam kerangka sistem dinamik dilakukan dengan memosisikan hasil hitungan A atau SY sebagai salah satu komponen penentu besaran aliran (*flow*) yang mengalir masuk ke dalam stok sedimen, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 8. Dalam skema tersebut, parameter-parameter USLE (R , K , LS , C , P) diperlakukan sebagai variabel eksogen atau konverter yang nilainya dapat berubah mengikuti skenario tata guna lahan (memengaruhi C dan P) maupun data historis/proyeksi curah hujan (memengaruhi R), sedangkan hasil keluaran modul USLE dikonversi melalui faktor

nisbah hantaran sedimen (SDR) menjadi besaran aliran masuk ke dalam stok sedimen waduk.



Gambar 7. Diagram integrasi modul USLE/MUSLE ke dalam struktur *Stock and Flow* Diagram model sedimentasi

Pendekatan integrasi semacam ini memungkinkan model sistem dinamik mewarisi validitas ilmiah formula USLE/MUSLE yang telah banyak diuji dan diterapkan secara luas dalam literatur hidrologi dan konservasi tanah, sekaligus memperoleh keunggulan sistem dinamik dalam merepresentasikan mekanisme umpan balik jangka panjang, seperti pengaruh balik penurunan kapasitas waduk terhadap keputusan tata guna lahan yang telah dibahas pada Bab 3.

➤ 4.3 Kalibrasi dan Validasi Model

Kalibrasi model merupakan proses penyesuaian nilai parameter-parameter model (baik parameter USLE maupun parameter struktural sistem dinamik lainnya, seperti konstanta waktu tunda dan koefisien pada fungsi tabel/*graphical function*) sedemikian rupa sehingga keluaran simulasi model mendekati data hasil pengamatan (observasi) pada rentang waktu historis yang tersedia. Proses ini umumnya dilakukan secara iteratif, baik melalui penyesuaian manual berdasarkan pemahaman proses

fisik, maupun melalui algoritma optimasi otomatis yang tersedia pada sebagian besar perangkat lunak sistem dinamik (misalnya metode Powell atau algoritma genetika pada Vensim), dengan fungsi objektif berupa minimisasi selisih kuadrat (sum of squared errors) antara nilai simulasi dan nilai observasi.

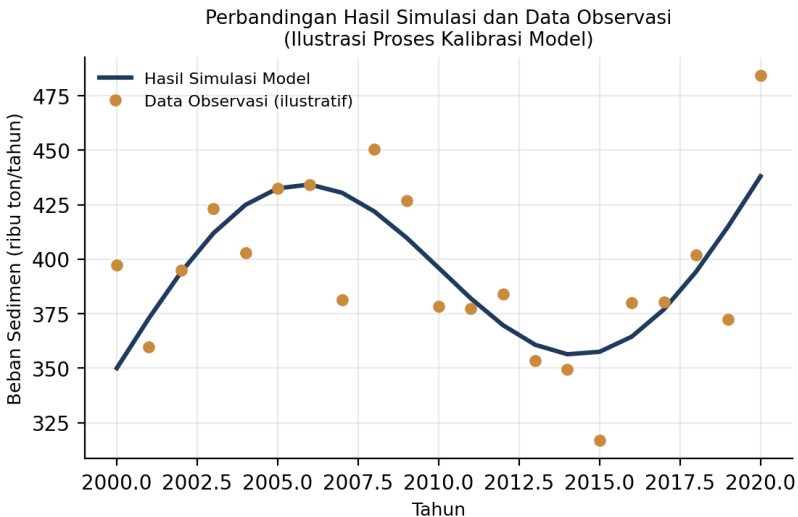
Validasi model, yang secara konseptual berbeda dari kalibrasi, adalah proses pengujian kemampuan model dalam mereplikasi data yang tidak digunakan pada tahap kalibrasi (data *out-of-sample*), untuk menilai kemampuan generalisasi model. Sejumlah indikator statistik lazim digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian (*goodness-of-fit*) antara hasil simulasi dan observasi, sebagaimana disajikan pada Tabel 12, dengan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) dan koefisien determinasi (R^2) menjadi dua indikator yang paling sering digunakan dalam literatur hidrologi.

$$NSE = 1 - [\sum (O_i - S_i)^2 / \sum (O_i - \bar{O})^2]$$

Dengan O_i adalah nilai observasi pada waktu ke- i , S_i adalah nilai simulasi pada waktu ke- i , dan $\bar{O}$ adalah rata-rata nilai observasi. Nilai NSE berkisar antara $-\infty$ hingga 1, dengan nilai 1 menunjukkan kesesuaian sempurna, dan nilai di atas 0,50 pada umumnya telah dianggap memuaskan untuk model hidrologi tahunan pada DAS tropis dengan ketersediaan data yang terbatas.

Gambar 9 menyajikan ilustrasi umum pola hasil proses kalibrasi, di mana kurva hasil simulasi model (garis) mengikuti tren umum data observasi (titik-titik) meskipun tidak menangkap seluruh variasi jangka pendek, sebuah karakteristik yang wajar mengingat model sistem dinamik pada umumnya dirancang untuk menangkap perilaku dan tren struktural jangka menengah-panjang, bukan fluktuasi jangka pendek yang lebih

dipengaruhi oleh kejadian-kejadian cuaca ekstrem yang bersifat stokastik.



Gambar 8. Ilustrasi perbandingan hasil simulasi model dan data observasi dalam proses kalibrasi model sedimentasi

➤ 4.4 Uji Sensitivitas Parameter

Uji sensitivitas dilakukan untuk mengidentifikasi parameter-parameter model yang perubahannya memberikan pengaruh paling besar terhadap variabel keluaran kunci (misalnya volume sedimen tertampung di waduk pada akhir periode simulasi), sehingga dapat diarahkan perhatian yang lebih besar pada akurasi pengukuran/estimasi parameter tersebut serta memahami tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) hasil model. Metode yang umum digunakan meliputi analisis sensitivitas satu-faktor-pada-satu-waktu (*one-at-a-time/OAT*), di mana setiap parameter diubah secara bergantian dalam rentang tertentu (misalnya $\pm 20\%$ dari nilai dasar) sementara parameter lainnya dijaga konstan, maupun simulasi Monte Carlo yang

mengubah seluruh parameter secara simultan sesuai distribusi probabilitas yang ditetapkan untuk menghasilkan selang kepercayaan pada hasil simulasi.

Tabel 11. Contoh hasil uji sensitivitas parameter terhadap volume sedimen kumulatif waduk (ilustratif)

Parameter	Perubahan Parameter	Perubahan Volume Sedimen Kumulatif (30 tahun)	Kategori Sensitivitas
Faktor C (tutupan lahan)	-20%	-32% hingga -38%	Tinggi
Faktor LS (topografi)	-20%	-15% hingga -20%	Sedang-Tinggi
Erosivitas hujan (R)	-20%	-18% hingga -22%	Sedang-Tinggi
Faktor K (erodibilitas tanah)	-20%	-8% hingga -12%	Sedang
Sediment Delivery Ratio (SDR)	-20%	-19% hingga -21%	Sedang-Tinggi
Faktor P (praktik konservasi)	-20%	-4% hingga -7%	Rendah-Sedang

Sumber: Ilustrasi Hipotetis Penulis

Pola umum yang tercermin pada Tabel 13 di mana faktor tutupan lahan (C) cenderung menjadi parameter paling sensitif dibandingkan faktor-faktor fisik yang relatif tetap seperti erodibilitas tanah (K) memiliki implikasi kebijakan yang penting: dari seluruh faktor penyebab erosi yang telah diidentifikasi pada Bab 1, faktor tutupan lahan merupakan salah satu yang paling dapat dikendalikan melalui intervensi manusia (dibandingkan misalnya karakteristik tanah atau topografi yang bersifat *given*), sehingga secara konsisten menjadi target utama berbagai program konservasi DAS, baik melalui reboisasi, agroforestri, maupun regulasi tata ruang. Kesimpulan inilah yang menjadi salah satu dasar perancangan skenario kebijakan konservasi yang akan disimulasikan pada Bab 5.

➤ 4.5 Contoh Perhitungan: Estimasi Laju Erosi dengan USLE

Untuk memberikan gambaran konkret mengenai penerapan persamaan USLE yang telah dibahas pada Subbab 4.1, berikut disajikan contoh perhitungan numerik ilustratif untuk suatu sub-DAS hipotetis dengan tiga unit lahan (*land unit*) yang berbeda karakteristik tutupan dan kemiringannya. Perlu ditegaskan bahwa seluruh angka pada contoh ini bersifat hipotetis untuk tujuan pedagogis, dan bukan merupakan hasil pengukuran lapangan pada lokasi tertentu.

Diasumsikan indeks erosivitas hujan tahunan (R) pada sub-DAS tersebut seragam sebesar 1.200 (satuan indeks R tahunan), dengan karakteristik masing-masing unit lahan sebagaimana disajikan pada Tabel 14.

Tabel 12. Data hipotetis tiga unit lahan pada contoh perhitungan USLE

Unit Lahan	Tutupan Lahan	K	LS	C	P	$A = R \times K \times LS \times C \times P$ (ton/ha/tahun)
Unit 1	Hutan sekunder rapat	0,25	1,8	0,01	1,0	5,4
Unit 2	Kebun campuran (agroforestri)	0,30	2,5	0,20	0,6	108,0
Unit 3	Ladang terbuka, lereng curam	0,35	4,2	0,45	1,0	793,8

Sumber: Contoh Perhitungan Hipotetis Penulis (formula USLE, 1978)

Hasil perhitungan pada Tabel 14 memperlihatkan perbedaan laju erosi yang sangat besar antarunit lahan, dengan Unit 3 (ladang terbuka berlereng curam tanpa praktik konservasi) menghasilkan estimasi laju erosi hampir 150 kali lipat dibandingkan Unit 1 (hutan sekunder rapat), meskipun berada pada satu sub-DAS yang sama dengan indeks erosivitas hujan yang identik. Perbedaan drastis ini terutama didorong oleh kombinasi faktor C yang jauh lebih tinggi (tutupan lahan minim) dan faktor LS yang lebih besar (lereng lebih curam) pada Unit 3, sejalan dengan simpulan uji sensitivitas pada Tabel 12 yang menunjukkan tingginya sensitivitas laju erosi terhadap faktor tutupan lahan. Contoh ini menggambarkan secara konkret mengapa strategi konservasi yang efektif perlu

memprioritaskan unit-unit lahan dengan kombinasi faktor C dan LS yang tinggi misalnya melalui konversi Unit 3 menuju pola agroforestri seperti Unit 2, yang berdasarkan tabel di atas berpotensi menurunkan laju erosi hingga lebih dari 85%, meskipun faktor LS (topografi) tidak dapat diubah karena bersifat given secara fisik.

Estimasi laju erosi (A) dari ketiga unit lahan tersebut selanjutnya dapat diagregasikan (dengan pembobotan luas masing-masing unit lahan) menjadi estimasi laju erosi rata-rata sub-DAS, yang kemudian dikonversi menjadi estimasi hasil sedimen (sediment yield) yang masuk ke stok sedimen waduk melalui faktor SDR sebagaimana telah diilustrasikan pada Gambar 8. Proses agregasi spasial semacam ini, meskipun disederhanakan pada contoh di atas, pada praktiknya dapat melibatkan puluhan hingga ratusan unit lahan yang didelineasi berdasarkan peta tutupan lahan dan peta topografi digital menggunakan perangkat SIG, sebelum hasilnya diringkaskan menjadi input bagi modul USLE dalam struktur model sistem dinamik tingkat DAS.

➤ **4.6 Sumber dan Kualitas Data untuk Kalibrasi**

Kualitas hasil kalibrasi model, sebagaimana dibahas pada Subbab 4.3, sangat bergantung pada kualitas dan kelengkapan data yang tersedia. Tabel 14 merangkum sumber data utama yang lazim digunakan untuk kalibrasi model sedimentasi DAS berbasis sistem dinamik di Indonesia, beserta tantangan umum yang menyertainya.

Keterbatasan pada salah satu atau beberapa jenis data di atas tidak serta-merta menghalangi pembangunan model sistem dinamik, mengingat metodologi ini sebagaimana ditekankan pada Subbab 2.7 dapat berjalan dengan data agregat yang lebih terbatas dibandingkan model hidrologi

terdistribusi. Namun demikian, keterbatasan data tetap perlu didokumentasikan secara transparan sebagai bagian dari pelaporan hasil model, termasuk implikasinya terhadap tingkat ketidakpastian hasil simulasi, sebagaimana akan ditekankan kembali pada Subbab 5.6.

Tabel 13. Sumber data utama untuk kalibrasi model sedimentasi DAS dan tantangan umumnya

Jenis Data	Sumber Umum di Indonesia	Tantangan Umum
Curah hujan harian/bulanan	Stasiun BMKG, pos hujan Balai Wilayah Sungai	Kerapatan stasiun rendah di kawasan hulu terpencil
Debit sungai	Pos duga air Balai Wilayah Sungai	Rekaman terputus akibat kerusakan alat atau bencana
Peta jenis tanah & tekstur	Peta tanah skala nasional/provinsi, uji laboratorium	Resolusi peta nasional sering terlalu kasar untuk sub-DAS kecil
Peta tutupan/penggunaan lahan	Citra satelit multiwaktu, peta RBI, data KLHK	Interpretasi memerlukan verifikasi lapangan (ground truth)
Data batimetri waduk	Survei berkala oleh pengelola waduk/Balai Wilayah Sungai	Frekuensi survei tidak selalu rutin/tahunan

Jenis Data	Sumber Umum di Indonesia	Tantangan Umum
Data sosial-ekonomi rumah tangga tani	Sensus pertanian, survei sosial-ekonomi daerah	Jarang terintegrasi langsung dengan data biofisik DAS

Sumber: Kompilasi Penulis (BMKG, Balai Wilayah Sungai, KLHK, BIG)

➤ 4.7 Keterbatasan dan Sumber Ketidakpastian Model

Setiap model, termasuk model sistem dinamik yang telah dikalibrasi dengan baik sekalipun, tetap merupakan penyederhanaan dari realitas dan mengandung sejumlah sumber ketidakpastian yang perlu disadari oleh penggunaanya. Sumber ketidakpastian tersebut secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi tiga: ketidakpastian struktural (*structural uncertainty*), yaitu ketidaksempurnaan representasi hubungan kausal dalam model dibandingkan kompleksitas sistem nyata yang sesungguhnya; ketidakpastian parameter (*parameter uncertainty*), yaitu ketidakpastian nilai estimasi parameter akibat keterbatasan data kalibrasi sebagaimana dibahas pada Subbab 4.6; dan ketidakpastian input (*input uncertainty*), khususnya terkait proyeksi curah hujan dan skenario tata guna lahan pada periode simulasi ke depan yang pada dasarnya tidak dapat diketahui secara pasti.

Pengelolaan ketidakpastian yang baik tidak berarti menghindari penggunaan model, melainkan mengomunikasikan hasil model secara jujur sebagai rentang kemungkinan (bukan angka pasti tunggal) kepada pengambil kebijakan, sebagaimana telah disinggung pada Subbab 5.6 mengenai analisis ketidakpastian melalui simulasi Monte Carlo.

Prinsip kehati-hatian ini konsisten dengan filosofi dasar pemodelan sistem dinamik sebagaimana dirumuskan sejak karya-karya awal Forrester dan Sterman, yang menekankan bahwa nilai utama model bukan terletak pada akurasi prediksi angka tunggal, melainkan pada pemahaman struktural mengenai perilaku sistem dan sensitivitas relatif antarkebijakan yang dihasilkannya.

➤ 4.8 Alur Kerja Praktis Implementasi Model pada Perangkat Lunak

Untuk melengkapi pembahasan konseptual mengenai formulasi dan kalibrasi model, subbab ini menguraikan secara garis besar alur kerja praktis implementasi model sedimentasi DAS pada perangkat lunak sistem dinamik, dengan mengambil Vensim sebagai contoh mengingat statusnya sebagai salah satu perangkat lunak yang paling banyak digunakan dalam kajian akademik di Indonesia sebagaimana disinggung pada Tabel 9, meskipun langkah-langkah serupa secara umum berlaku pula pada perangkat lunak lain seperti Stella atau Powersim dengan penyesuaian antarmuka.

Langkah pertama adalah membangun struktur SFD sesuai hasil konseptualisasi pada Bab 3, dengan menempatkan elemen stok (misalnya "Volume Sedimen Waduk"), elemen aliran ("Laju Sedimentasi Masuk" dan "Laju Pengerukan/*Flushing*"), serta konverter-konverter pendukung (faktor R, K, LS, C, P, dan SDR) pada kanvas kerja perangkat lunak, kemudian menghubungkannya dengan konektor informasi sesuai struktur kausal yang telah divalidasi. Langkah kedua adalah menuliskan persamaan matematis untuk setiap aliran dan konverter, mengikuti formulasi USLE/MUSLE yang telah dibahas pada Subbab 4.1 dan Subbab 4.2, dengan memanfaatkan fitur *graphical function* (fungsi tabel) pada perangkat lunak untuk

merepresentasikan hubungan nonlinear antarvariabel yang tidak dapat dinyatakan melalui persamaan aljabar sederhana, misalnya hubungan antara persentase tutupan vegetasi dan nilai faktor C yang bersifat nonlinear pada kondisi tutupan sangat rendah maupun sangat tinggi.

Langkah ketiga adalah memasukkan data historis (curah hujan, hasil survei batimetri, dan sebagainya) ke dalam perangkat lunak, baik secara langsung sebagai data time-series maupun melalui tabel data eksternal yang terhubung (*linked data*), untuk keperluan kalibrasi sebagaimana dibahas pada Subbab 4.3. Langkah keempat adalah menjalankan simulasi awal dengan nilai parameter dugaan awal (*initial guess*) berdasarkan nilai-nilai standar dari literatur (sebagaimana rentang nilai tipikal pada Tabel 12), kemudian membandingkan hasil simulasi dengan data observasi secara visual maupun melalui indikator statistik seperti NSE. Langkah kelima adalah melakukan kalibrasi otomatis menggunakan fitur optimasi bawaan perangkat lunak (misalnya Vensim menyediakan fitur Optimize yang menerapkan algoritma Powell atau algoritma genetika untuk mencari kombinasi nilai parameter yang meminimalkan selisih kuadrat antara simulasi dan observasi), diikuti pemeriksaan kewajaran (*reasonability check*) terhadap nilai parameter hasil kalibrasi untuk memastikan nilai tersebut masih berada dalam rentang yang secara fisik masuk akal, bukan sekadar nilai yang secara statistik menghasilkan kecocokan terbaik namun tidak realistis secara proses fisik yang direpresentasikannya.

Langkah keenam adalah menjalankan uji sensitivitas sebagaimana dibahas pada Subbab 4.4, umumnya menggunakan fitur *sensitivity simulation* yang tersedia pada sebagian besar perangkat lunak sistem dinamik untuk menjalankan ratusan hingga ribuan simulasi dengan kombinasi

nilai parameter yang bervariasi secara sistematis maupun acak (Monte Carlo), menghasilkan keluaran berupa selang kepercayaan (*confidence bounds*) pada variabel-variabel kunci. Langkah ketujuh, yang menjadi jembatan menuju Bab 5, adalah menyiapkan model untuk simulasi skenario kebijakan, umumnya melalui pembuatan beberapa “run” simulasi terpisah dengan nilai parameter/variabel eksogen yang berbeda-beda sesuai skenario yang ingin diuji (BAU, struktural, non-struktural), kemudian membandingkan hasilnya melalui fitur perbandingan multi-run yang tersedia pada perangkat lunak.

➤ **4.9 Perbandingan dengan Model Hidrologi-Sedimentasi Berbasis Proses Fisik**

Sebagaimana disinggung sekilas pada Subbab 2.1, model sistem dinamik yang mengintegrasikan USLE/MUSLE bukanlah satu-satunya pendekatan kuantitatif untuk memodelkan sedimentasi DAS. Model hidrologi terdistribusi berbasis proses fisik seperti SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) dan AGNPS/ANSWERS (*Agricultural Non-Point Source/Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*) telah banyak diterapkan pada berbagai DAS di Indonesia, mengenai erosi lahan Sub-DAS Jeneberang yang akan dibahas pada Bab 6. Model-model tersebut membagi DAS menjadi satuan-satuan respons hidrologi (*hydrological response units*) berdasarkan kombinasi jenis tanah, penggunaan lahan, dan kemiringan lereng, kemudian mensimulasikan proses hidrologi-erosi pada setiap satuan tersebut secara terpisah sebelum diagregasikan menjadi hasil pada skala DAS.

Tabel 14. Perbandingan karakteristik model sistem dinamik terintegrasi USLE dengan model hidrologi terdistribusi (SWAT/AGNPS/ANSWERS)

Aspek	Sistem Dinamik Terintegrasi USLE	Model Hidrologi Terdistribusi (SWAT/AGNPS/ANSWERS)
Resolusi spasial	Umumnya teragregasi pada tingkat DAS/sub-DAS	Terdistribusi pada satuan respons hidrologi/sel grid
Representasi umpan balik jangka panjang	Eksplisit melalui struktur CLD/SFD (Bab 3)	Umumnya tidak eksplisit; berfokus pada proses biofisik
Kebutuhan data spasial	Relatif rendah-sedang	Tinggi (peta tanah, DEM, tutupan lahan resolusi tinggi)
Kemudahan komunikasi kebijakan	Tinggi, terutama melalui visualisasi CLD	Sedang, memerlukan keahlian SIG untuk interpretasi peta hasil
Kesesuaian untuk analisis skenario kebijakan jangka panjang	Sangat sesuai (Bab 5)	Sesuai untuk skenario tata guna lahan, kurang untuk umpan balik sosial-ekonomi
Keluaran spasial (peta sebaran erosi)	Terbatas atau tidak tersedia	Tersedia, menjadi keunggulan utama

Sumber: Kompilasi penulis dari Ford (2010) dan Asrib (2011)

Perbandingan pada Tabel 16 menegaskan kembali argumen komplementaritas yang telah dikemukakan pada Subbab 2.7: alih-alih memandang sistem dinamik dan model hidrologi terdistribusi sebagai dua pendekatan yang saling bersaing, praktik terbaik justru mengarah pada penggunaan keduanya secara berurutan atau simultan sesuai kebutuhan analisis. Sebagai contoh, model SWAT atau AGNPS dapat digunakan terlebih dahulu untuk menghasilkan peta sebaran spasial erosi pada skala DAS secara rinci, yang hasilnya kemudian diringkas dan diagregasikan menjadi input bagi modul USLE dalam struktur sistem dinamik sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 8, sehingga model sistem dinamik yang dihasilkan memperoleh keunggulan ganda: akurasi spasial dari model terdistribusi dan kemampuan analisis skenario kebijakan jangka panjang dari sistem dinamik. Pendekatan gabungan semacam inilah yang secara implisit mengenai sedimentasi Waduk Bili-Bili yang akan dibahas pada Bab 6, di mana menggunakan model AGNPS untuk estimasi erosi spasial pada Sub-DAS Jeneberang, sebelum dikembangkan lebih lanjut menjadi model pengendalian sedimentasi yang lebih komprehensif.

➤ **4.10 Menerjemahkan Hasil Model bagi Pengambil Kebijakan Nonteknis**

Setelah model dikalibrasi, divalidasi, dan diuji sensitivitasnya sebagaimana dibahas pada subbab-subbab sebelumnya, tantangan berikutnya yang tidak kalah penting adalah menerjemahkan keluaran teknis model tersebut menjadi informasi yang dapat dipahami dan digunakan oleh pengambil kebijakan yang pada umumnya tidak memiliki latar belakang matematika atau hidrologi mendalam. Kegagalan dalam tahap penerjemahan ini merupakan salah satu penyebab paling umum

mengapa model yang secara teknis valid tetap gagal memengaruhi pengambilan keputusan aktual di lapangan.

Beberapa prinsip praktis dapat membantu proses penerjemahan ini. Pertama, utamakan visualisasi grafis dibandingkan tabel angka mentah; grafik perbandingan lintasan skenario seperti Gambar 10 jauh lebih mudah dicerna oleh pengambil kebijakan dibandingkan tabel keluaran numerik model yang detail. Kedua, gunakan satuan dan kerangka waktu yang relevan dengan konteks pengambilan keputusan pengambil kebijakan, misalnya menerjemahkan volume sedimen kumulatif menjadi estimasi “jumlah tahun tersisa sebelum kapasitas tampungan kritis” yang lebih intuitif dibandingkan angka meter kubik abstrak, sebagaimana implisit dilakukan pada penyajian data kapasitas Waduk Bili-Bili dalam bentuk persentase pada Subbab 6.2.2. Ketiga, sertakan selalu rentang ketidakpastian (bukan angka tunggal) sebagaimana ditekankan pada Subbab 4.7 dan Subbab 5.6, namun sajikan dalam bentuk visual yang tidak mengintimidasi, misalnya pita keyakinan (*confidence band*) pada grafik alih-alih tabel interval statistik yang rumit. Keempat, hindari jargon teknis tanpa penjelasan; istilah seperti “*Sediment Delivery Ratio*” atau “*Nash-Sutcliffe Efficiency*” yang lazim digunakan pada Bab 4 ini perlu diterjemahkan menjadi bahasa yang lebih sehari-hari ketika dikomunikasikan kepada audiens nonteknis, misalnya “proporsi tanah tererosi yang benar-benar sampai ke waduk” dan “tingkat kecocokan model dengan data lapangan”.

Kelima, dan mungkin yang paling penting, libatkan pengambil kebijakan dalam proses interpretasi hasil sejak tahap awal, bukan hanya menyajikan hasil akhir yang sudah jadi. Prinsip keterlibatan pemangku kepentingan yang telah ditekankan berulang kali sepanjang buku ini mulai dari Subbab 2.7, Subbab 3.7, hingga Subbab 5.6 dan Subbab 5.9 pada

dasarnya juga berlaku untuk tahap interpretasi hasil model, karena pemahaman yang dibangun secara bertahap bersama sepanjang proses pemodelan jauh lebih efektif dibandingkan penyajian hasil akhir yang mengejutkan atau sulit dipahami tanpa konteks yang memadai. Kelima prinsip tersebut, apabila diterapkan secara konsisten, akan meningkatkan kemungkinan bahwa hasil kerja teknis yang telah diuraikan sepanjang Bab 4 ini benar-benar dimanfaatkan dalam perumusan skenario kebijakan pada Bab 5 dan keputusan implementasi nyata di lapangan sebagaimana diilustrasikan pada Bab 6.

BAB V

SIMULASI SKENARIO KEBIJAKAN KONSERVASI DAS

➤ 5.1 Kerangka Umum Analisis Skenario

Salah satu kegunaan utama model sistem dinamik yang telah dikalibrasi dan divalidasi, sebagaimana dibahas pada Bab 4, adalah kemampuannya untuk mensimulasikan berbagai skenario kebijakan konservasi secara *ex-ante*, sehingga dampak jangka panjang dari suatu opsi kebijakan dapat diperkirakan sebelum benar-benar diimplementasikan di lapangan. Dalam konteks konservasi DAS dan pengendalian sedimentasi, skenario kebijakan pada umumnya dikelompokkan ke dalam tiga kategori besar: skenario dasar tanpa intervensi tambahan (*Business-as-Usual*), skenario intervensi struktural, dan skenario intervensi non-struktural, yang masing-masing dapat pula dikombinasikan untuk membentuk skenario gabungan (*mixed policy*).

Perbandingan hasil simulasi antarskenario memungkinkan pengambil kebijakan untuk mengevaluasi *trade-off* antara efektivitas teknis, biaya investasi, jangka waktu munculnya manfaat (*time-to-benefit*), serta implikasi sosial-ekonomi dari masing-masing opsi, sehingga keputusan alokasi anggaran dan prioritas program konservasi dapat didasarkan pada bukti kuantitatif alih-alih semata-mata pada pertimbangan politis atau anggaran yang tersedia.

➤ 5.2 Skenario *Business-as-Usual* (BAU)

Skenario Business-as-Usual merepresentasikan proyeksi kondisi DAS apabila tren historis alih fungsi lahan, praktik pengelolaan lahan, dan tidak adanya penambahan infrastruktur pengendali sedimen terus berlanjut tanpa perubahan kebijakan yang berarti. Skenario ini berfungsi sebagai garis dasar (*baseline*) yang menjadi pembanding bagi skenario-skenario intervensi lainnya, dan pada banyak kasus DAS kritis di Indonesia, skenario BAU menunjukkan tren peningkatan laju sedimentasi yang bersifat eksponensial mengikuti dinamika loop penguatan (*reinforcing loop*) yang telah diidentifikasi pada Bab 3, sebagai konsekuensi terus berlanjutnya tekanan konversi lahan hutan dan lahan pertanian konservatif menjadi penggunaan lahan yang kurang protektif terhadap tanah.

Penyusunan skenario BAU yang kredibel memerlukan ekstrapolasi tren historis tata guna lahan, pertumbuhan populasi, dan variabilitas curah hujan berdasarkan data *time-series* yang tersedia, dengan asumsi eksplisit bahwa hubungan struktural (parameter model) yang telah dikalibrasi pada Bab 4 tetap berlaku pada periode simulasi ke depan (asumsi stasioneritas struktural), kecuali terdapat justifikasi kuat untuk memasukkan perubahan struktural, misalnya akibat perubahan iklim yang memengaruhi pola curah hujan ekstrem.

➤ 5.3 Skenario Intervensi Struktural

Intervensi struktural mengacu pada pembangunan atau peningkatan infrastruktur fisik yang secara langsung bertujuan menahan, mengendalikan, atau mengelola sedimen sebelum mencapai badan air penerima utama. Contoh yang paling umum diterapkan pada DAS-DAS kritis di Indonesia meliputi pembangunan *check* dam (bangunan penahan sedimen berskala kecil-menengah pada anak sungai), sabo dam

(bangunan pengendali aliran debris berskala lebih besar, umumnya diterapkan pada kawasan pascabencana longsor vulkanik atau tektonik), serta rorak (lubang resapan biopori berskala plot lahan yang berfungsi menahan aliran permukaan dan sedimen pada skala mikro sebelum mencapai saluran drainase utama).

Dalam struktur model sistem dinamik, intervensi struktural umumnya direpresentasikan melalui penurunan nilai efektif *Sediment Delivery Ratio* (SDR) yang telah dibahas pada Bab 4, karena bangunan-bangunan tersebut pada dasarnya menahan sebagian sedimen agar tidak seluruhnya mencapai badan air penerima, tanpa harus mengubah laju erosi lahan itu sendiri (variabel A pada persamaan USLE relatif tidak berubah). Keunggulan skenario ini adalah kecepatan munculnya manfaat (*time-to-benefit* relatif singkat, karena efeknya langsung terasa segera setelah bangunan selesai dan berfungsi), namun dengan kelemahan berupa kebutuhan investasi awal yang besar, kebutuhan pemeliharaan berkelanjutan (bangunan penahan sedimen akan penuh dan kehilangan efektivitasnya apabila tidak dikelola/dikeruk secara berkala), serta tidak mengatasi akar penyebab persoalan pada sisi hulu.

➤ **5.4 Skenario Intervensi Non-Struktural**

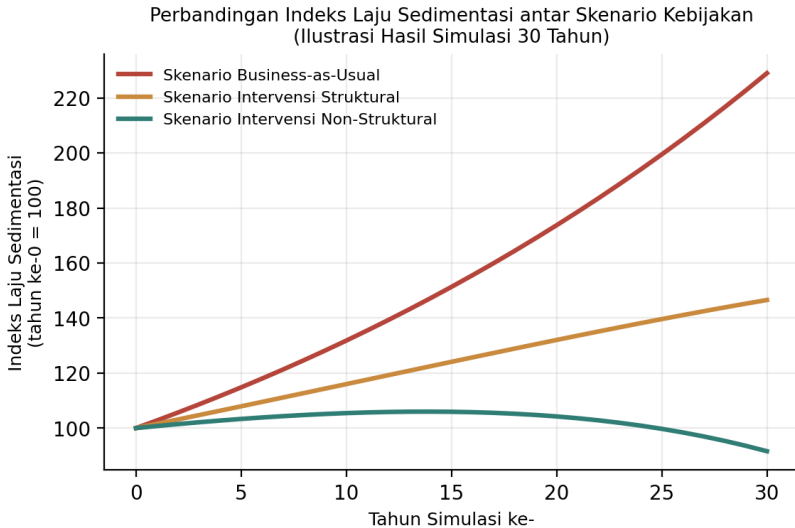
Intervensi non-struktural berfokus pada perbaikan kondisi tutupan dan pengelolaan lahan di kawasan hulu, dengan tujuan menurunkan laju erosi pada sumbernya, alih-alih menahan sedimen yang telah terbentuk. Contoh utama meliputi program reboisasi dan rehabilitasi hutan pada lahan kritis, penerapan sistem agroforestri yang memadukan tanaman kehutanan dengan tanaman pertanian/perkebunan untuk menjaga tutupan vegetasi sepanjang tahun, penerapan teknik konservasi tanah pada lahan pertanian seperti pengolahan tanah menurut

kontur dan pembuatan teras, serta instrumen kebijakan tata ruang yang membatasi konversi kawasan hutan lindung dan lahan berlereng curam.

Dalam struktur model, intervensi non-struktural direpresentasikan melalui perbaikan nilai faktor C (tutupan lahan) dan/atau faktor P (praktik konservasi) pada persamaan USLE/MUSLE, yang secara langsung menurunkan laju erosi lahan pada sumbernya (variabel A), sehingga secara struktural memutus salah satu jalur utama loop penguatan R1 yang telah diidentifikasi pada Bab 3. Uji sensitivitas pada Tabel 13 yang menunjukkan bahwa faktor C merupakan parameter dengan tingkat sensitivitas tertinggi, intervensi jenis ini secara teoretis memiliki potensi dampak jangka panjang yang lebih besar dibandingkan intervensi struktural semata, meskipun manfaatnya baru terlihat signifikan setelah vegetasi tumbuh dan berfungsi optimal, yang pada kondisi tropis Indonesia umumnya memerlukan rentang waktu lebih dari lima hingga sepuluh tahun sejak penanaman.

➤ 5.5 Perbandingan Hasil Simulasi Antarskenario

Gambar 10 menyajikan ilustrasi umum pola hasil simulasi ketiga skenario di atas dalam rentang waktu 30 tahun, dinyatakan dalam bentuk indeks laju sedimentasi relatif (tahun ke-0 = 100), sebagai gambaran konseptual mengenai bentuk lintasan (*trajectory*) yang tipikal dihasilkan oleh model sistem dinamik pada kajian sejenis, dan bukan merupakan hasil numerik dari suatu model DAS spesifik.



Gambar 9. Ilustrasi perbandingan lintasan indeks laju sedimentasi pada tiga skenario kebijakan konservasi DAS selama periode simulasi 30 tahun

Terdapat tiga wawasan konseptual penting yang dapat ditarik dari pola pada Gambar 10. Pertama, skenario BAU menunjukkan lintasan pertumbuhan yang terus meningkat mengikuti dinamika loop penguatan, konsisten dengan sifat reinforcing loop yang telah dibahas pada Bab 3. Kedua, skenario intervensi struktural pada umumnya efektif dalam menahan pertumbuhan laju sedimentasi pada tahun-tahun awal setelah bangunan pengendali sedimen berfungsi, namun karena tidak mengatasi laju erosi pada sumbernya, efektivitasnya cenderung menurun pada jangka panjang seiring dengan berkurangnya kapasitas tampungan bangunan pengendali sedimen itu sendiri apabila tidak diikuti pemeliharaan berkala. Ketiga, skenario intervensi non-struktural menunjukkan manfaat yang baru terlihat signifikan setelah beberapa tahun (mencerminkan waktu tunda pertumbuhan vegetasi), namun pada jangka panjang

cenderung menghasilkan lintasan penurunan laju sedimentasi yang lebih berkelanjutan dibandingkan intervensi struktural semata, karena secara struktural mengubah parameter penyebab erosi pada sumbernya.

Tabel 15. Ringkasan perbandingan karakteristik tiga kategori skenario kebijakan konservasi DAS

Aspek Perbandingan	Business-as-Usual	Intervensi Struktural	Intervensi Non-Struktural
Kebutuhan investasi awal	Tidak ada (baseline)	Tinggi (konstruksi bangunan sipil)	Sedang (bibit, penyuluhan, insentif)
Waktu munculnya manfaat	Tidak relevan	Cepat (segera setelah konstruksi)	Lambat (5–10 tahun untuk vegetasi matang)
Kebutuhan pemeliharaan	Tidak relevan	Tinggi (pengerukan/flushing berkala)	Sedang (pemeliharaan tanaman, pengawasan)
Dampak terhadap akar penyebab erosi	Tidak ada	Tidak langsung (hanya menahan sedimen)	Langsung (menurunkan laju erosi pada sumber)
Keberlanjutan jangka panjang	Menurun (tren memburuk)	Sedang (bergantung pemeliharaan)	Tinggi (bila konsisten dijaga)

Sumber: Analisis Konseptual Penulis

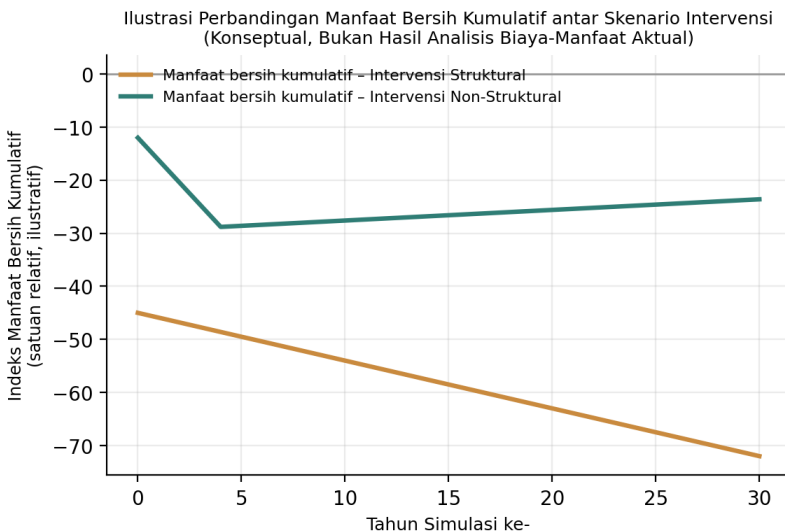
Berdasarkan perbandingan pada Tabel 17, banyak kajian dan praktik pengelolaan DAS di Indonesia pada akhirnya mengarah pada rekomendasi skenario gabungan (*mixed policy*), yaitu kombinasi antara intervensi struktural untuk menahan dampak jangka pendek-menengah dari sedimen yang sudah dan akan terbentuk, dengan intervensi non-struktural untuk mengatasi akar penyebab erosi pada jangka panjang, sebagaimana akan diilustrasikan lebih konkret melalui studi kasus penanganan sedimentasi Waduk Bili-Bili pada Bab 6.

➤ 5.6 Pertimbangan dalam Perancangan Skenario

Beberapa hal perlu diperhatikan agar hasil simulasi skenario dapat digunakan secara bertanggung jawab dalam pengambilan kebijakan. Pertama, hasil simulasi skenario sangat bergantung pada kualitas kalibrasi model pada Bab 4; model yang kalibrasinya kurang baik akan menghasilkan proyeksi skenario yang menyesatkan meskipun struktur model secara konseptual telah benar. Kedua, perlu dilakukan analisis ketidakpastian (*uncertainty analysis*) untuk menyajikan hasil simulasi tidak hanya sebagai satu lintasan tunggal, melainkan sebagai rentang kemungkinan (misalnya melalui simulasi Monte Carlo yang memvariasikan parameter-parameter sensitif yang telah diidentifikasi pada Tabel 13), agar pengambil kebijakan memahami tingkat keyakinan dari proyeksi yang disajikan. Ketiga, skenario kebijakan idealnya disusun bersama-sama dengan pemangku kepentingan terkait (*co-design*), termasuk pemerintah daerah, pengelola waduk, dan masyarakat di kawasan hulu, agar asumsi-asumsi yang mendasari setiap skenario mencerminkan konteks lokal yang relevan dan opsi kebijakan yang benar-benar layak diimplementasikan secara teknis, ekonomis, maupun sosial-politis.

➤ 5.7 Ilustrasi Analisis Biaya-Manfaat Sederhana Antarskenario

Selain perbandingan efektivitas teknis sebagaimana diuraikan pada Subbab 5.5, pengambilan keputusan kebijakan pada praktiknya juga memerlukan pertimbangan biaya-manfaat, mengingat sumber daya anggaran untuk program konservasi DAS pada umumnya terbatas. Gambar 11 menyajikan ilustrasi konseptual mengenai bagaimana lintasan manfaat bersih kumulatif (*cumulative net benefit*), yaitu selisih antara manfaat kumulatif yang dihasilkan (misalnya dalam bentuk penghematan biaya pengerukan, perpanjangan usia guna waduk, atau peningkatan produktivitas pertanian) dan biaya kumulatif yang dikeluarkan (investasi awal ditambah biaya operasional dan pemeliharaan tahunan), dapat berbeda polanya antara skenario intervensi struktural dan non-struktural.



Gambar 10. Ilustrasi konseptual perbandingan lintasan manfaat bersih kumulatif antara skenario intervensi struktural dan non-struktural

Pola pada Gambar 11 menggambarkan sebuah wawasan konseptual yang penting bagi pengambil kebijakan: skenario intervensi struktural pada umumnya menunjukkan manfaat bersih yang lebih cepat positif pada tahun-tahun awal (karena manfaat langsung terasa segera setelah konstruksi selesai, sebagaimana dibahas pada Subbab 5.3), namun skenario intervensi non-struktural meskipun memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai titik impas (*break-even point*) akibat waktu tunda pertumbuhan vegetasi berpotensi menghasilkan manfaat bersih kumulatif yang lebih besar pada jangka panjang (horizon 20-30 tahun), karena biaya operasional-pemeliharaannya yang relatif lebih rendah dibandingkan biaya pemeliharaan bangunan sipil skala besar dan karena manfaatnya lebih berkelanjutan sebagaimana telah diargumenkan pada Subbab 5.4.

Perlu ditegaskan kembali bahwa angka-angka pada Gambar 11 bersifat ilustratif dan konseptual, bukan hasil analisis biaya-manfaat aktual dari suatu proyek konservasi DAS tertentu. Analisis biaya-manfaat yang layak digunakan untuk pengambilan keputusan investasi riil memerlukan data biaya konstruksi, operasional, dan pemeliharaan yang spesifik lokasi, estimasi nilai moneter dari manfaat lingkungan (yang sering kali memerlukan teknik valuasi ekonomi lingkungan tersendiri, seperti valuasi kontingensi atau biaya pengganti), serta mempertimbangkan faktor diskonto (*discount rate*) untuk membandingkan nilai uang pada waktu yang berbeda topik yang berada di luar cakupan buku ini namun dapat menjadi arah pengembangan lanjutan bagi pembaca yang berminat pada aspek ekonomi lingkungan dari konservasi DAS.

➤ 5.8 Kerangka Pemantauan dan Evaluasi Implementasi Kebijakan

Simulasi skenario yang telah dibahas sepanjang bab ini pada dasarnya bersifat *ex-ante*, yaitu dilakukan sebelum kebijakan benar-benar diimplementasikan. Agar siklus pengelolaan kebijakan menjadi lengkap, hasil implementasi kebijakan di lapangan perlu dipantau dan dievaluasi secara berkala (*ex-post*) untuk menilai apakah dampak yang terjadi sesuai dengan yang diproyeksikan model, sekaligus menjadi umpan balik untuk pemutakhiran (*updating*) model itu sendiri sebuah siklus yang menghubungkan kembali ke tahap kalibrasi dan validasi pada Bab 4.

Kerangka pemantauan dan evaluasi (*monitoring and evaluation*/M&E) yang baik untuk implementasi kebijakan konservasi DAS idealnya mencakup indikator pada berbagai tingkatan: indikator input (misalnya luas lahan yang direhabilitasi, jumlah bangunan pengendali sedimen yang dibangun), indikator proses (misalnya tingkat kelangsungan hidup bibit tanaman, frekuensi pemeliharaan bangunan pengendali sedimen), indikator keluaran (*output*) langsung (misalnya perubahan tutupan vegetasi terukur melalui citra satelit), hingga indikator dampak (*outcome/impact*) jangka panjang berupa perubahan laju sedimentasi aktual yang terukur melalui survei batimetri berkala sebagaimana dibahas pada Subbab 1.4. Data hasil pemantauan pada tingkatan indikator dampak inilah yang paling relevan untuk digunakan memvalidasi ulang (revalidasi) model sistem dinamik secara periodik, sehingga akurasi proyeksi model dapat terus ditingkatkan seiring bertambahnya data observasi dari waktu ke waktu.

Penutupan siklus antara pemodelan *ex-ante* dan pemantauan-evaluasi *ex-post* inilah yang menjadi esensi dari pendekatan pengelolaan adaptif (*adaptive management*) dalam konservasi DAS: kebijakan tidak dirancang sebagai keputusan sekali jadi yang statis, melainkan sebagai proses pembelajaran berkelanjutan yang terus disempurnakan berdasarkan bukti baru yang diperoleh dari lapangan, sejalan dengan sifat model sistem dinamik itu sendiri yang idealnya juga terus dimutakhirkan, sebagaimana akan diilustrasikan lebih konkret melalui rangkaian bertahap mengenai sedimentasi Waduk Bili-Bili pada studi kasus Bab 6.

➤ **5.9 Koordinasi Multi-Tingkat Pemerintahan dalam Implementasi Kebijakan**

Implementasi skenario kebijakan konservasi DAS yang telah disimulasikan pada subbab-subbab sebelumnya pada praktiknya memerlukan koordinasi antarlevel pemerintahan yang telah disinggung secara kelembagaan pada Subbab 1.6. Skenario intervensi struktural (Subbab 5.3), misalnya, umumnya memerlukan pendanaan dan kewenangan teknis di tingkat pemerintah pusat (melalui Balai Besar/Balai Wilayah Sungai) untuk bangunan berskala besar seperti sabo dam, namun dapat pula melibatkan pemerintah kabupaten/kota untuk bangunan berskala lebih kecil seperti rorak dan teras pada lahan milik masyarakat. Skenario intervensi non-struktural (Subbab 5.4), di sisi lain, sangat bergantung pada kewenangan pemerintah daerah dalam pengaturan tata ruang dan perizinan pemanfaatan lahan, serta kewenangan pemerintah desa/kelurahan dalam pendampingan langsung kepada kelompok tani di kawasan hulu.

Kompleksitas koordinasi multi-tingkat ini menegaskan pentingnya hasil simulasi model tidak hanya disajikan sebagai satu rekomendasi kebijakan tunggal yang bersifat generik, melainkan diterjemahkan menjadi paket kebijakan yang secara eksplisit memetakan pembagian peran dan tanggung jawab antarlevel pemerintahan, sejalan dengan prinsip keterlibatan pemangku kepentingan (*co-design*) yang telah ditekankan pada Subbab 2.7, Subbab 3.7, dan Subbab 5.6. Sebagai ilustrasi, skenario kebijakan gabungan (*mixed policy*) yang direkomendasikan pada Subbab 5.5 idealnya dipecah menjadi rencana aksi yang lebih rinci: pemerintah pusat bertanggung jawab atas pembangunan dan pemeliharaan bangunan pengendali sedimen berskala besar serta pendanaan program rehabilitasi hutan lindung; pemerintah provinsi/kabupaten bertanggung jawab atas regulasi tata ruang dan program penyuluhan pertanian konservasi; sementara pemerintah desa bersama kelompok tani bertanggung jawab atas implementasi teknik konservasi lahan pada skala petak usaha tani masing-masing sebuah pembagian peran yang akan diilustrasikan lebih konkret dalam konteks penanganan Sungai Jeneberang pada Subbab 6.6.

Keberhasilan koordinasi multi-tingkat semacam ini pada akhirnya bergantung pada keberadaan forum atau mekanisme koordinasi formal yang mempertemukan seluruh pemangku kepentingan secara berkala, baik dalam bentuk forum DAS terpadu maupun mekanisme koordinasi lain yang telah diamanatkan dalam kerangka hukum konservasi tanah dan air sebagaimana disinggung pada Subbab 1.6. Model sistem dinamik yang telah dibangun dan divisualisasikan melalui CLD sebagaimana dibahas sepanjang Bab 3 dapat berperan penting sebagai "bahasa bersama" (*boundary object*) dalam forum koordinasi tersebut, membantu berbagai pihak dengan latar

belakang kepentingan yang berbeda untuk memahami keterkaitan sistemik antara peran masing-masing pihak dan hasil akhir yang ingin dicapai bersama.

➤ **5.10 Ilustrasi Terperinci Skenario Gabungan (*Mixed Policy*)**

Untuk melengkapi pembahasan konseptual mengenai skenario gabungan yang telah disinggung pada Subbab 5.5, subbab ini menyajikan ilustrasi lebih terperinci mengenai bagaimana skenario gabungan dapat disusun melalui kombinasi parameter dari skenario struktural dan non-struktural secara simultan, alih-alih menerapkan keduanya secara terpisah.

Tabel 18 menyajikan ilustrasi parameter kombinasi untuk tiga varian skenario gabungan yang berbeda proporsi penekanannya, sebagai contoh bagaimana pengambil kebijakan dapat menyusun beberapa alternatif skenario gabungan sesuai ketersediaan anggaran dan prioritas jangka waktu yang diinginkan, alih-alih hanya membandingkan skenario tunggal struktural versus non-struktural sebagaimana disajikan pada Gambar 11.

Tabel 16. Ilustrasi tiga varian skenario gabungan (*mixed policy*) dengan proporsi penekanan berbeda

Varian Skenario	Penekanan Struktural	Penekanan Non-Struktural	Karakteristik Umum Hasil (Ilustratif)
Gabungan A — Struktural Dominan	70%	30%	Manfaat jangka pendek tinggi, memerlukan pemeliharaan intensif berkelanjutan
Gabungan B — Seimbang	50%	50%	Manfaat jangka pendek moderat, manfaat jangka panjang mulai

Varian Skenario	Penekanan Struktural	Penekanan Non-Struktural	Karakteristik Umum Hasil (Ilustratif)
			terlihat sejak tahun ke-8 hingga ke-10
Gabungan C — Non-Struktural Dominan	30%	70%	Manfaat jangka pendek terbatas, namun manfaat jangka panjang paling tinggi di antara ketiga varian

Sumber: Ilustrasi Hipotetis Penulis

Pola pada Tabel 18 mengilustrasikan sebuah wawasan penting bagi pengambil kebijakan: pilihan proporsi penekanan antara struktural dan non-struktural pada dasarnya merupakan keputusan mengenai *trade-off* antara kecepatan manfaat jangka pendek dan besarnya manfaat jangka panjang, yang idealnya disesuaikan dengan tingkat urgensi kondisi DAS yang dihadapi. Pada DAS dengan tingkat kekritisian sangat tinggi dan risiko bencana jangka pendek yang mendesak (misalnya pascakejadian bencana geologi sebagaimana kasus Bili-Bili pascalongsoran 2004 yang akan dibahas pada Bab 6), varian Gabungan A yang menekankan intervensi struktural untuk penanganan darurat jangka pendek mungkin lebih tepat dipilih terlebih dahulu, dengan proporsi penekanan yang secara bertahap digeser menuju varian Gabungan C pada periode-periode berikutnya seiring kondisi darurat mereda dan fokus kebijakan beralih ke keberlanjutan jangka panjang sebuah strategi bertahap (*phased strategy*) yang lebih realistis dibandingkan menerapkan satu proporsi kebijakan yang statis sepanjang seluruh horizon perencanaan.

Penyusunan skenario gabungan bertahap semacam ini pada praktiknya memerlukan simulasi tambahan yang mengizinkan proporsi penekanan berubah dari waktu ke waktu (*time-varying policy*), sebuah kapabilitas yang secara alami didukung oleh struktur model sistem dinamik melalui fungsi tabel (*graphical function*) yang telah disinggung pada Subbab 4.8, di mana proporsi alokasi anggaran struktural-nonstruktural dapat didefinisikan sebagai fungsi dari waktu simulasi atau bahkan sebagai fungsi dari kondisi sistem itu sendiri (misalnya proporsi struktural yang otomatis meningkat apabila laju sedimentasi terukur melampaui ambang batas tertentu) sebuah tingkat kecanggihan kebijakan adaptif yang melampaui skenario statis sederhana pada Gambar 10, namun sepenuhnya konsisten dengan filosofi pengelolaan adaptif yang telah diperkenalkan pada Subbab 5.8.

BAB VI

APLIKASI PRAKTIS DAN CONTOH STUDI KASUS

➤ 6.1 Kerangka Aplikasi Model pada DAS Kritis di Indonesia

Kerangka konseptual dan formulasi matematis yang telah dibahas pada Bab 2 hingga Bab 5 memperoleh relevansi praktisnya yang paling nyata ketika diterapkan pada DAS-DAS kritis di Indonesia yang telah mengalami dampak sedimentasi signifikan terhadap infrastruktur sumber daya air. Indonesia memiliki banyak DAS dengan tingkat kekritisan tinggi, terutama di wilayah dengan kombinasi topografi curam, curah hujan tinggi, tekanan konversi lahan hutan, dan aktivitas geologi (vulkanik maupun tektonik) yang rawan memicu longsor berskala besar. Pada bab ini, kerangka pemodelan yang telah dibangun diaplikasikan pada studi kasus sedimentasi Waduk Bili-Bili di DAS Jeneberang, Sulawesi Selatan, yang merupakan salah satu contoh paling terdokumentasi mengenai interaksi antara faktor antropogenik (alih fungsi lahan) dan faktor bencana alam (longsor kaldera gunung) dalam menentukan dinamika sedimentasi jangka panjang suatu waduk multiguna.

➤ 6.2 Contoh Studi Kasus: Sedimentasi Waduk Bili-Bili, DAS Jeneberang

Gambaran Umum Lokasi

Waduk Bili-Bili terletak di Desa Bili-Bili, Kecamatan Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan, membendung aliran Sungai Jeneberang yang berhulu di kawasan pegunungan Bawakaraeng. Waduk ini diresmikan penggunaannya pada tahun 1999 sebagai waduk serbaguna (multipurpose dam) dengan fungsi utama pengendalian banjir Kota Makassar, penyediaan air irigasi untuk area sekitar 23.000 hektar, penyediaan air baku dengan kapasitas sekitar 3,3 m³/detik, serta pembangkit listrik tenaga air berkapasitas sekitar 20,1 MW. Daerah tangkapan air (catchment area) Waduk Bili-Bili memiliki luas kurang lebih 384 km², dengan rencana umur operasi (design life) selama 50 tahun sejak mulai difungsikan.



Gambar 11. Skema ilustratif rangkaian hulu-hilir DAS Jeneberang dari kawasan Gunung Bawakaraeng hingga Waduk Bili-Bili

Tabel 17. Karakteristik teknis umum Waduk Bili-Bili dan DAS Jeneberang

Parameter	Nilai/Keterangan
Lokasi	Desa Bili-Bili, Kec. Bontomarannu, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan
Sungai yang dibendung	Sungai Jeneberang
Tahun mulai operasi	1999
Luas daerah tangkapan air	$\pm 384 \text{ km}^2$
Rencana umur operasi	50 tahun (JRBDP, 2004)
Fungsi utama	Pengendalian banjir Kota Makassar, irigasi ($\pm 23.000 \text{ ha}$), air baku ($\pm 3,3 \text{ m}^3/\text{detik}$), PLTA ($\pm 20,1 \text{ MW}$)
Laju sedimentasi rencana awal	$\pm 1.500 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{tahun}$ (Laporan CTI Engineering Co. Ltd. bersama PT Indra Karya & PT Exsa International, 1988)

Sumber: Kompilasi Penulis dari JRBDP (2004) dan CTI Engineering dkk. (1988)

Peristiwa Longsor Kaldera Bawakaraeng 2004 dan Dampaknya

Pada 26 Maret 2004, terjadi longsor besar pada dinding kaldera Gunung Bawakaraeng yang merupakan kawasan hulu DAS Jeneberang. Berdasarkan laporan Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang, peristiwa tersebut melibatkan

material longsor dengan volume diperkirakan sekitar 300 juta m^3 , di mana sekitar 210 juta m^3 di antaranya masuk ke aliran Sungai Jeneberang dan sekitar 80 juta m^3 terbawa hingga ke Waduk Bili-Bili. Bencana ini juga menimbulkan korban jiwa dan kerugian material yang signifikan, dengan laporan yang mencatat 10 orang meninggal dunia, 22 orang dinyatakan hilang, kerusakan sekitar 10 unit rumah, kehilangan sekitar 635 ekor ternak sapi, dan kerusakan lahan pertanian seluas sekitar 1.500 hektar.

Studi Asrib dkk. (2011) mendokumentasikan bahwa akibat peristiwa tersebut, kapasitas tampungan Waduk Bili-Bili mengalami penurunan drastis, dari sekitar 90,81% pada tahun 1997 menjadi sekitar 73,34% pada tahun 2005, atau mengalami penurunan sekitar 17 poin persentase dalam kurun waktu delapan tahun yang sebagian besar terjadi setelah peristiwa longsor tahun 2004.

Peristiwa Bawakaraeng 2004 merupakan ilustrasi nyata dari fenomena yang telah dibahas secara konseptual pada Bab 1, yaitu bahwa selain proses erosi permukaan yang berlangsung secara gradual, sedimentasi DAS juga dapat terakselerasi secara drastis melalui kejadian bencana geologi berskala besar yang bersifat episodik. Dari sudut pandang pemodelan sistem dinamik, kejadian semacam ini direpresentasikan sebagai lonjakan (*shock* atau *pulse*) pada variabel aliran masuk sedimen, yang kemudian berinteraksi dengan dinamika erosi gradual akibat alih fungsi lahan yang telah berlangsung sebelumnya, sehingga menghasilkan efek kumulatif yang jauh lebih besar dibandingkan bila kedua faktor tersebut dianalisis secara terpisah.

Tekanan Alih Fungsi Lahan pada Kawasan Tangkapan Air

Selain dampak bencana geologi, tekanan alih fungsi lahan pada kawasan hulu DAS Jeneberang turut memperberat beban

sedimentasi Waduk Bili-Bili secara gradual dan berkelanjutan. Kajian yang dilaporkan mencatat bahwa jumlah erosi lahan di daerah hulu DAS Jeneberang mencapai sekitar 67 ton/hektar/tahun pada tahun 2015, dengan sekitar 26 ton/hektar/tahun dari tanah yang terkikis tersebut pada akhirnya mengendap di sepanjang sistem DAS Jeneberang. Data pemantauan lain juga menunjukkan bahwa laju sedimentasi aktual pada tahun 2010 tercatat mencapai sekitar $4.678 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{tahun}$, jauh melampaui laju sedimentasi yang direncanakan sejak awal pembangunan waduk, yaitu sekitar $1.500 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{tahun}$. Kesenjangan antara laju sedimentasi rencana dan aktual inilah yang menjadi salah satu justifikasi utama diperlukannya pemodelan lanjutan untuk memahami dinamika sedimentasi Waduk Bili-Bili secara lebih komprehensif.

Sebagaimana tercantum dalam Daftar Pustaka buku ini, meliputi analisis tingkat erosi lahan pada Sub-DAS Jeneberang menggunakan model AGNPS, analisis dampak longsoran kaldera terhadap tingkat sedimentasi Waduk Bili-Bili, hingga perumusan model pengendalian sedimentasi waduk akibat erosi lahan dan longsoran yang dituangkan dalam disertasi berjudul "Model Pengendalian Sedimentasi Waduk Akibat Erosi Lahan dan Longsoran di Waduk Bili-Bili Sulawesi Selatan" (Asrib, 2012). Rangkaian karya tersebut menjadi salah satu rujukan empiris terpenting bagi buku referensi ini, karena secara langsung menggabungkan dua sumber sedimentasi utama erosi gradual akibat alih fungsi lahan dan lonjakan akibat bencana geologi dalam satu kerangka analisis yang koheren, sejalan dengan filosofi pemodelan sistem dinamik yang ditekankan pada Bab 2 hingga Bab 4 buku ini.

Upaya Pengendalian Sedimen yang Telah Dilakukan

Sebagai respons terhadap peningkatan laju sedimentasi pascalongsoran 2004, pengelola Wilayah Sungai Pompengan

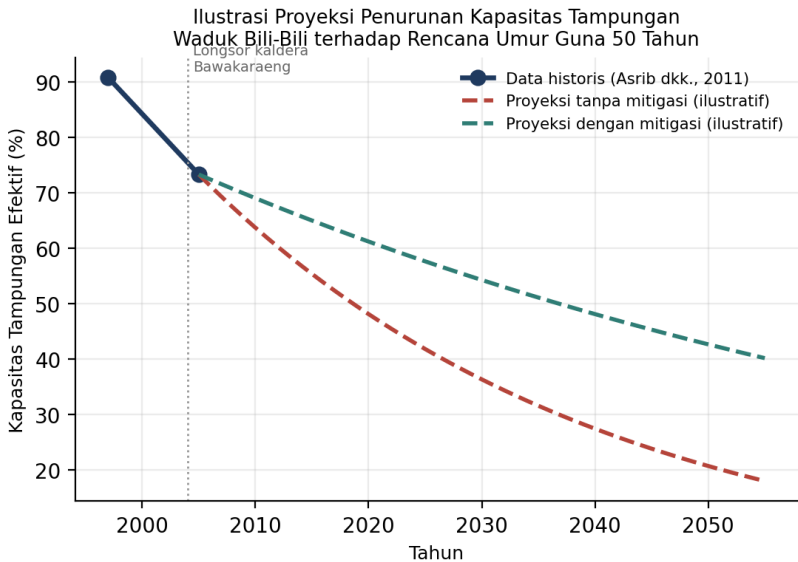
Jeneberang melaksanakan sejumlah intervensi struktural pada sistem Sungai Jeneberang, meliputi pembangunan dan peningkatan sabo dam, *check dam*, *consolidation dam*, serta sand pocket, sebagai bagian dari strategi pengendalian sedimen sebelum mencapai badan Waduk Bili-Bili. Dalam kerangka klasifikasi skenario kebijakan yang telah dibahas pada Bab 5, seluruh intervensi tersebut tergolong ke dalam kategori intervensi struktural, yang berfungsi menahan sedimen yang telah terbentuk akibat proses erosi dan longsoran di kawasan hulu.

Studi lanjutan mengenai laju sedimentasi Waduk Bili-Bili pascapengembangan bangunan penahan sedimen tersebut menunjukkan bahwa intervensi struktural memberikan kontribusi dalam mengendalikan sebagian volume sedimen yang mencapai badan waduk, meskipun sebagaimana telah dibahas pada Subbab 5.3, efektivitas intervensi struktural semata pada jangka panjang tetap bergantung pada konsistensi pemeliharaan bangunan pengendali sedimen serta idealnya perlu dilengkapi dengan intervensi non-struktural pada kawasan hulu, mengingat sumber utama persoalan yaitu tekanan alih fungsi lahan dan kerawanan longsoran pada kawasan kaldera Bawakaraeng tidak sepenuhnya teratasi hanya melalui penahanan sedimen di bagian hilir.

Analisis Dampak Jangka Panjang: Proyeksi 20–50 Tahun

Sejalan dengan kerangka simulasi skenario pada Bab 5, analisis dampak jangka panjang terhadap keberlanjutan usia guna Waduk Bili-Bili dapat diilustrasikan melalui proyeksi kapasitas tampungan efektif waduk pada rentang 20 hingga 50 tahun ke depan sejak rencana operasi awal, dengan menggunakan dua titik data historis yang telah diverifikasi (90,81% pada 1997 dan 73,34% pada 2005) sebagai basis kalibrasi laju penurunan kapasitas. Gambar 13 menyajikan ilustrasi dua lintasan proyeksi:

lintasan pertama mengasumsikan laju penurunan kapasitas terus berlanjut mendekati tren pascalongsor tanpa mitigasi tambahan yang berarti, dan lintasan kedua mengasumsikan penerapan kombinasi intervensi struktural dan non-struktural yang berhasil menurunkan laju penurunan kapasitas secara signifikan.



Gambar 12. Ilustrasi proyeksi penurunan kapasitas tampungan Waduk Bili-Bili terhadap rencana umur guna 50 tahun, dikalibrasi dari data historis 1997 dan 2005 (Asrib dkk., 2011)

Perlu ditegaskan bahwa kedua lintasan proyeksi pada Gambar 13 bersifat ilustratif untuk tujuan pedagogis dalam menunjukkan cara kerja dan manfaat analisis skenario jangka panjang sebagaimana dibahas pada Bab 5, dan bukan merupakan hasil resmi pemodelan hidrologi-sedimentasi terkini dari lembaga pengelola Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang. Meskipun demikian, pola umum yang tergambar

bahwa tanpa mitigasi yang memadai, laju penurunan kapasitas tampungan berpotensi mengancam tercapainya rencana umur guna 50 tahun yang ditetapkan sejak awal pembangunan waduk konsisten dengan kekhawatiran yang telah diungkapkan secara berulang dalam berbagai kajian teknis mengenai Waduk Bili-Bili, dan menjadi justifikasi kuat bagi keberlanjutan program pengendalian sedimen secara komprehensif, baik struktural maupun non-struktural, pada DAS Jeneberang.

➤ **6.4 Pembelajaran dan Rekomendasi Kebijakan**

Studi kasus Waduk Bili-Bili memberikan sejumlah pembelajaran penting yang relevan tidak hanya bagi pengelolaan DAS Jeneberang, tetapi juga bagi pengelolaan DAS-DAS kritis lain di Indonesia dengan karakteristik serupa. Pertama, ketergantungan yang tinggi terhadap satu sumber sedimentasi dominan (dalam hal ini kerawanan longsoran kaldera vulkanik) perlu diantisipasi melalui pemantauan dini (*early warning*) dan pembangunan bangunan pengendali sedimen yang dirancang memiliki kapasitas cadangan (*redundancy*) untuk mengakomodasi lonjakan sedimen episodik, tidak hanya sedimentasi gradual rata-rata tahunan. Kedua, intervensi struktural yang telah dan terus dilakukan pada Sungai Jeneberang perlu diimbangi dengan program rehabilitasi lahan kritis dan pengendalian alih fungsi lahan di kawasan tangkapan air, sejalan dengan simpulan uji sensitivitas pada Bab 4 yang menegaskan tingginya sensitivitas laju erosi terhadap faktor tutupan lahan. Ketiga, keberlanjutan pendokumentasian data sedimentasi lanjutan sebagaimana telah dirintis melalui rangkaian penelitian disertasi dan artikel jurnal karya Ahmad Rifqi Asrib dan koleganya perlu terus didukung agar model prediksi dapat terus dimutakhirkan (*updated*) dengan data observasi terbaru, sehingga keputusan investasi pengendalian

sedimen di masa depan dapat didasarkan pada bukti kuantitatif yang semakin akurat.

Sebagai penutup subbab ini, studi kasus Bili-Bili menegaskan tesis utama buku referensi ini: bahwa persoalan sedimentasi DAS pada dasarnya adalah persoalan sistem yang kompleks, melibatkan interaksi antara proses biofisik gradual, kejadian bencana alam episodik, dan keputusan sosial-ekonomi manusia dalam memanfaatkan lahan, yang hanya dapat dipahami secara memadai dan pada akhirnya dikelola secara efektif melalui kerangka berpikir dan perangkat analisis yang secara eksplisit memperhitungkan struktur umpan balik dan dinamika jangka panjang, sebagaimana ditawarkan oleh pendekatan pemodelan sistem dinamik yang telah diuraikan sepanjang buku ini.

➤ **6.5 Perbandingan Singkat dengan DAS/Waduk Kritis Lain di Indonesia**

Persoalan sedimentasi yang dialami Waduk Bili-Bili bukanlah kasus yang berdiri sendiri. Sejumlah waduk multiguna lain di Indonesia dilaporkan dalam berbagai kajian teknis dan akademik mengalami tantangan sedimentasi yang sebanding, meskipun dengan karakteristik penyebab yang bervariasi antarlokasi. Perbandingan singkat ini dimaksudkan untuk menegaskan bahwa kerangka pemodelan sistem dinamik yang dibahas dalam buku ini bersifat generik dan berpotensi diadaptasi pada konteks DAS/waduk kritis lainnya, tidak terbatas pada studi kasus Bili-Bili semata.

Tabel 18. Ilustrasi perbandingan kualitatif beberapa waduk di Indonesia yang dilaporkan menghadapi tantangan sedimentasi dalam literatur

Waduk	Karakteristik Umum Persoalan Sedimentasi yang Dilaporkan
Waduk Bili-Bili (DAS Jeneberang, Sulawesi Selatan)	Kombinasi erosi lahan gradual dan lonjakan sedimen episodik akibat longsoran kaldera Bawakaraeng 2004; dibahas rinci pada Subbab 6.2
Waduk Panglima Besar Soedirman (Jawa Tengah)	Dilaporkan mengalami persoalan sedimentasi yang memengaruhi umur layanan waduk, sebagaimana dikaji dalam sejumlah studi teknik sipil keairan
Waduk Kedungombo dan Waduk Sermo (Jawa Tengah/D.I. Yogyakarta)	Menjadi subjek berbagai kajian analisis rezim sedimentasi dan estimasi volume sedimentasi menggunakan pendekatan RUSLE dan survei batimetri
Waduk Duriangkang (Pulau Batam)	Dilaporkan menghadapi pengaruh sedimentasi terhadap daya dukung waduk sebagai sumber air baku utama pulau
Waduk Sagulong (Kepulauan Riau)	Dikaji dalam literatur terkait pengaruh erosi dan sedimentasi terhadap proyeksi umur waduk

Sumber: Rangkuman Kualitatif Penulis dari Berbagai Literature

Sebagaimana ditegaskan pada judul kolom Tabel 20, informasi yang disajikan bersifat kualitatif dan merangkum topik yang dikaji dalam literatur terkait, bukan angka kuantitatif laju sedimentasi yang presisi untuk masing-masing waduk, mengingat data teknis rinci tersebut memerlukan verifikasi langsung pada laporan resmi pengelola waduk masing-masing yang berada di luar cakupan penelusuran buku ini. Meskipun demikian, pola umum yang konsisten muncul di seluruh kasus pada Tabel 20 yaitu bahwa waduk-waduk multiguna di Indonesia secara umum menghadapi tekanan sedimentasi yang memengaruhi keberlanjutan fungsi layanannya menegaskan relevansi dan urgensi penerapan kerangka pemodelan dan simulasi skenario kebijakan sebagaimana dibahas pada Bab 5 secara lebih luas pada konteks pengelolaan sumber daya air nasional, tidak terbatas pada satu DAS tertentu.

Pola kesamaan tersebut juga membuka peluang bagi pengembangan basis data dan pembelajaran lintas-waduk (*cross-reservoir learning*) di tingkat nasional, di mana pengalaman kalibrasi model dan efektivitas berbagai skenario kebijakan pada satu waduk misalnya rangkaian pembelajaran dari penanganan sedimentasi Waduk Bili-Bili yang telah diuraikan secara mendalam pada Subbab 6.2 hingga Subbab 6.4 dapat menjadi rujukan awal (meskipun tetap memerlukan kalibrasi ulang sesuai konteks lokal sebagaimana ditekankan pada Subbab 1.8) bagi pengelola waduk lain yang menghadapi tantangan struktural serupa. Pengembangan basis data dan komunitas praktik (*community of practice*) semacam ini, yang mempertemukan peneliti dan pengelola dari berbagai waduk kritis di Indonesia, berpotensi mempercepat proses saling belajar dan mengurangi duplikasi dasar yang sesungguhnya dapat dihindari apabila pengetahuan dari satu lokasi dapat lebih mudah diadaptasi ke lokasi lain.

➤ 6.6 Menyusun Rencana Aksi Pengelolaan Terpadu

Sebagai penutup aplikasi praktis buku ini, subbab ini merangkum langkah-langkah umum yang dapat diambil oleh pengelola DAS/waduk dalam menyusun rencana aksi pengelolaan sedimentasi terpadu, dengan mengintegrasikan seluruh kerangka yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya. Langkah pertama adalah pemetaan dan diagnosis awal, yaitu mengidentifikasi sumber-sumber sedimentasi dominan pada DAS yang menjadi perhatian (apakah didominasi erosi gradual akibat alih fungsi lahan, ataukah turut dipengaruhi kerawanan bencana geologi episodik sebagaimana kasus Bili-Bili), menggunakan kombinasi data lapangan dan penginderaan jauh sebagaimana dibahas pada Subbab 1.4.

Langkah kedua adalah pembangunan model sistem dinamik yang disesuaikan konteks lokal, mengikuti tahapan konseptualisasi (Bab 3) dan formulasi-kalibrasi (Bab 4), dengan memanfaatkan sebanyak mungkin data historis yang tersedia meskipun terbatas, mengikuti prinsip bahwa model yang sederhana namun tervalidasi lebih bernilai dibandingkan model kompleks yang tidak dapat dikalibrasi secara memadai. Langkah ketiga adalah simulasi dan evaluasi skenario kebijakan (Bab 5), yang idealnya melibatkan pemangku kepentingan lokal secara partisipatif untuk memastikan skenario yang disimulasikan relevan dan layak diimplementasikan. Langkah keempat adalah implementasi kebijakan terpilih secara bertahap, dengan kombinasi intervensi struktural untuk penanganan jangka pendek-menengah dan intervensi non-struktural untuk penanganan akar penyebab jangka panjang, sebagaimana direkomendasikan pada Subbab 5.5 dan tercermin dalam praktik penanganan Sungai Jeneberang yang dibahas pada Subbab 6.2.4. Langkah kelima, dan yang tidak kalah penting, adalah pemantauan-evaluasi berkelanjutan (Subbab 5.8) yang

hasilnya digunakan untuk memutakhirkan model secara periodik, menutup siklus pengelolaan adaptif yang menjadi benang merah metodologis buku ini.

Rangkaian lima langkah tersebut diagnosis, pemodelan, simulasi skenario, implementasi bertahap, dan pemantauan-evaluasi berkelanjutan pada dasarnya merupakan penerapan konkret dari lima tahapan umum pembangunan model sistem dinamik yang telah diperkenalkan pada Subbab 2.5, yang kini telah dilengkapi dengan konteks substantif spesifik pengelolaan sedimentasi DAS di sepanjang Bab 3 hingga Bab 6. Dengan demikian, kerangka metodologis yang ditawarkan buku ini bersifat siap-adaptasi (*adaptable*) bagi pembaca yang hendak menerapkannya pada DAS atau waduk lain di luar studi kasus Bili-Bili yang menjadi fokus utama pembahasan.

➤ **6.7 Peran Teknologi Pemantauan Modern bagi Keberlanjutan Pengelolaan Waduk Bili-Bili**

Sedimentasi Waduk Bili-Bili yang dibahas pada Subbab 6.2 sebagian besar mengandalkan metode survei batimetri konvensional dan pengambilan sampel lapangan sebagaimana diuraikan pada Subbab 1.4. Perkembangan teknologi pemantauan sumber daya air dalam dekade terakhir membuka peluang peningkatan kualitas dan frekuensi data yang tersedia bagi pemutakhiran model, sekaligus mengurangi biaya dan waktu yang dibutuhkan dibandingkan metode survei konvensional semata.

Penginderaan jauh resolusi tinggi dan menengah, yang kini tersedia dengan frekuensi perekaman ulang (*revisit time*) yang semakin sering, memungkinkan pemantauan perubahan tutupan lahan di kawasan tangkapan air DAS Jeneberang secara lebih rutin dibandingkan metode survei lapangan periodik, sehingga perubahan pola alih fungsi lahan yang menjadi salah

satu pendorong utama sedimentasi (sebagaimana dibahas pada Subbab 6.2.3) dapat terdeteksi lebih dini. Teknologi pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT), seperti sensor turbiditas dan tinggi muka air otomatis yang terpasang pada titik-titik strategis sepanjang Sungai Jeneberang, berpotensi menyediakan data debit dan konsentrasi sedimen secara hampir-waktu-nyata (*near real-time*), yang apabila dipadukan dengan sistem peringatan dini dapat membantu mengantisipasi lonjakan sedimen mendadak akibat kejadian hujan ekstrem di kawasan hulu, sebagaimana terjadi pascalongsoran Bawakaraeng 2004. Teknologi drone (*unmanned aerial vehicle*) juga semakin banyak dimanfaatkan untuk survei topografi kawasan hulu yang sulit dijangkau, termasuk pemantauan berkala kondisi dinding kaldera Bawakaraeng untuk mendeteksi tanda-tanda pergerakan tanah lebih dini sebelum terjadi longsoran berskala besar.

Integrasi data dari berbagai sumber teknologi pemantauan modern tersebut ke dalam siklus pemutakhiran model sistem dinamik sejalan dengan kerangka pengelolaan adaptif yang telah dibahas pada Subbab 5.8 berpotensi meningkatkan akurasi dan responsivitas model terhadap perubahan kondisi lapangan secara signifikan dibandingkan pendekatan konvensional yang mengandalkan survei periodik dengan interval tahunan. Namun demikian, investasi pada infrastruktur pemantauan modern tersebut perlu mempertimbangkan keberlanjutan pendanaan operasional jangka panjang (termasuk pemeliharaan sensor dan biaya konektivitas data) serta ketersediaan kapasitas sumber daya manusia lokal untuk mengelola dan menganalisis volume data yang jauh lebih besar dibandingkan metode konvensional, agar investasi teknologi tersebut benar-benar termanfaatkan secara

optimal, bukan sekadar menjadi infrastruktur yang terpasang namun tidak terkelola dengan baik.

➤ **6.8 Refleksi Metodologis: Pelajaran bagi Pemodelan DAS di Indonesia**

Sebelum menutup bab aplikasi praktis ini, penting untuk merefleksikan kembali bagaimana seluruh kerangka metodologis yang telah dibahas sejak Bab 2 mulai dari CLD dan SFD, integrasi USLE/MUSLE, kalibrasi-validasi, hingga simulasi skenario kebijakan terwujud secara konkret dalam studi kasus Waduk Bili-Bili, sekaligus menarik pelajaran metodologis yang lebih luas bagi upaya pemodelan DAS lain di Indonesia.

Pelajaran pertama adalah pentingnya kombinasi sumber data jangka panjang. Subbab 6.2 menunjukkan bagaimana akumulasi data dari berbagai metode survei batimetri periodik, analisis model AGNPS untuk estimasi erosi spasial, dan dokumentasi sistematis pascabencana longsor 2004 dapat dipadukan menjadi basis kalibrasi model yang jauh lebih kuat dibandingkan mengandalkan satu jenis data saja, sejalan dengan pembahasan mengenai sumber data pada Subbab 4.6. Pelajaran kedua adalah pentingnya merepresentasikan sumber sedimentasi ganda (gradual dan episodik) secara eksplisit dalam struktur model, sebagaimana ditekankan pada Subbab 6.2.2, karena model yang hanya mengasumsikan proses erosi gradual tanpa memperhitungkan potensi lonjakan akibat bencana geologi akan menghasilkan proyeksi yang jauh meleset dari kondisi aktual pada DAS dengan kerawanan geologi tinggi seperti Jeneberang.

Pelajaran ketiga adalah pentingnya kesinambungan lintas-waktu. Studi kasus Bili-Bili menunjukkan bagaimana yang dimulai sejak awal tahun 2010-an terus dikembangkan dan dimutakhirkan oleh peneliti yang sama maupun peneliti lain

hingga periode-periode berikutnya, mencerminkan penerapan nyata prinsip pengelolaan adaptif dan siklus pemutakhiran model yang telah dibahas pada Subbab 5.8 sebuah kesinambungan yang idealnya menjadi teladan bagi pengelolaan DAS-DAS kritis lain di Indonesia yang disebutkan pada Tabel 21, yang tidak jarang hanya dikaji secara sporadis. Pelajaran keempat, dan yang menjadi penutup refleksi metodologis buku ini, adalah bahwa nilai sesungguhnya dari pemodelan sistem dinamik bukan terletak pada kecanggihan matematisnya semata, melainkan pada kemampuannya menghubungkan pemahaman biofisik, data empiris jangka panjang, dan proses pengambilan kebijakan partisipatif menjadi satu kerangka kerja yang koheren sebuah benang merah yang telah diupayakan tergambar secara konsisten sepanjang keenam bab buku referensi ini.

➤ **6.9 Tantangan Pendanaan dan Keberlanjutan Kelembagaan**

Melengkapi refleksi metodologis pada Subbab 6.8, penting pula untuk mengakui secara jujur tantangan nonteknis yang turut menentukan keberhasilan implementasi rekomendasi kebijakan berbasis model, sebagaimana telah disinggung secara umum pada Subbab 1.9. Pengendalian sedimentasi pada DAS berskala besar seperti Jeneberang memerlukan pendanaan yang tidak sedikit, terutama untuk pemeliharaan berkelanjutan bangunan pengendali sedimen (*sabo dam*, *check dam*, *consolidation dam*, *sand pocket*) yang telah dibahas pada Subbab 6.2.4, mengingat bangunan-bangunan tersebut kehilangan efektivitasnya secara bertahap apabila tidak dikeruk atau dipelihara secara rutin, sejalan dengan *trade-off* yang telah diidentifikasi pada Tabel 17.

Keberlanjutan pendanaan pemeliharaan jangka panjang sering kali menjadi titik lemah dalam siklus proyek pembangunan infrastruktur di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, karena anggaran pembangunan awal (*capital expenditure*) umumnya lebih mudah diperoleh dibandingkan anggaran operasional-pemeliharaan rutin (*operational expenditure*) yang harus dialokasikan secara konsisten dari tahun ke tahun tanpa batas waktu proyek yang jelas. Tantangan ini menegaskan kembali argumen yang telah dikemukakan pada Subbab 5.4 dan Subbab 5.7 mengenai keunggulan relatif intervensi non-struktural dari sisi keberlanjutan biaya operasional jangka panjang, meskipun keduanya struktural maupun non-struktural pada akhirnya tetap memerlukan komitmen kelembagaan dan pendanaan yang konsisten untuk dapat memberikan manfaat optimal.

Dari sisi kelembagaan, keberlanjutan penanganan sedimentasi DAS Jeneberang dan DAS-DAS kritis lain di Indonesia pada akhirnya bergantung pada konsistensi koordinasi multi-tingkat pemerintahan sebagaimana dibahas pada Subbab 5.9, ditambah dengan komitmen politik jangka panjang yang tidak terpengaruh oleh siklus pergantian kepemimpinan daerah maupun nasional. Penanganan sedimentasi Waduk Bili-Bili yang telah berlangsung sejak peristiwa longsor 2004 hingga kini menunjukkan bahwa penanganan persoalan sedimentasi DAS berskala besar memang memerlukan horizon waktu puluhan tahun, jauh melampaui satu periode kepemimpinan politik mana pun, sehingga keberlanjutan kelembagaan dan pendokumentasian pengetahuan lintas-generasi pengelola sebagaimana tercermin dalam kesinambungan yang telah dibahas pada Subbab 6.2.3 menjadi aset yang tidak kalah penting dibandingkan model matematis dan infrastruktur fisik itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, S. (2012). *Konservasi Tanah dan Air* (Edisi kedua). Bogor: IPB Press.
- Asdak, C. (2004). *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai* (Edisi III). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Asrib, A.R. (2012). *Model Pengendalian Sedimentasi Waduk Akibat Erosi Lahan dan Longsor di Waduk Bili-Bili Sulawesi Selatan* (Disertasi). Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Asrib, A.R. (2011). Analisis Tingkat Erosi Lahan Menggunakan Model AGNPS pada Sub DAS Jeneberang Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Biosainstifika*, 3(1). ISSN 1979-6900.
- Asrib, A.R., Purwanto, J.Y., Sukandi, & Erizal. (2011). Dampak Longsor Kaldera Terhadap Tingkat Sedimentasi di Waduk Bili-Bili Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Hidrolitan (Jurnal Hidrologi, Lingkungan, dan Tanah)*, 2(3). ISSN 2086-4825.
- Asrib, A.R., Winarno, H., & Natsir, T. (2018). Dampak Aktivitas Penambangan terhadap Masyarakat Sekitar Waduk Bili-Bili di Sungai Jeneberang. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Agribisnis 2018*.

- Asrib, A.R., Roy, M., Faozi, K., Sari, N.N., & Abduh, A.M., dkk. (2025). *Konservasi Tanah dan Air* (buku kolaborasi multi-penulis). [Kota terbit tidak disebutkan]: CV. Brizqha Media Qita.
- Ford, A. (2010). *Modeling the Environment* (Edisi kedua). Washington, DC: Island Press.
- Forrester, J.W. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Meadows, D.H. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., & Behrens, W.W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.
- Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Nomor 37 Tahun 2014 tentang Konservasi Tanah dan Air*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 299.
- Sterman, J.D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill.
- Vennix, J.A.M. (1996). *Group Model Building: Facilitating Team Learning Using System Dynamics*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning* (Agriculture Handbook No. 537). Washington, DC: United States Department of Agriculture.

GLOSARIUM

Agroforestri

Sistem pengelolaan lahan yang memadukan tanaman kehutanan dengan tanaman pertanian/perkebunan dalam satu bidang lahan untuk menjaga tutupan vegetasi sepanjang tahun.

Aliran (*flow*)

Elemen struktural dalam *Stock and Flow* Diagram yang merepresentasikan laju perubahan suatu stok per satuan waktu.

Balancing loop

Lingkar kausal penyeimbang yang mendorong sistem menuju kondisi stabil atau target tertentu (*goal-seeking behavior*).

Batimetri, survei

Pengukuran topografi dasar suatu badan air (sungai, danau, waduk) menggunakan *echosounder* untuk menghitung volume dan sebaran sedimentasi.

Causal Loop Diagram (CLD)

Diagram lingkar kausal yang menggambarkan hubungan sebab-akibat antarvariabel melalui node dan tanda polaritas.

Check dam

Bangunan penahan sedimen berskala kecil-menengah yang dibangun melintang pada alur anak sungai.

Dead storage

Bagian kapasitas tampungan waduk yang tidak dapat dimanfaatkan untuk operasional normal, sering menjadi lokasi akumulasi sedimen pertama.

Erodibilitas tanah (K)

Kepekaan suatu jenis tanah terhadap pelepasan dan pengangkutan partikel oleh air, salah satu parameter USLE.

Group model building

Proses terstruktur untuk melibatkan pemangku kepentingan secara langsung dalam penyusunan struktur model sistem dinamik.

Konverter

Variabel bantu pada *Stock and Flow* Diagram yang mengonversi informasi menjadi nilai yang digunakan aliran.

Monitoring and Evaluation (M&E)

Kerangka pemantauan dan evaluasi berkala terhadap implementasi kebijakan untuk menilai kesesuaiannya dengan proyeksi model.

MUSLE

Modified Universal Soil Loss Equation; pengembangan USLE berbasis energi limpasan per kejadian hujan.

Reinforcing loop

Lingkar kausal penguatan yang menghasilkan perilaku pertumbuhan atau penurunan eksponensial.

Rorak

Lubang resapan biopori berskala plot lahan yang menahan aliran permukaan dan sedimen pada skala mikro.

Sabo dam

Bangunan pengendali aliran debris berskala besar, umum diterapkan pada kawasan pascabencana vulkanik/longsor.

Sediment Delivery Ratio (SDR)

Nisbah antara hasil sedimen yang mencapai suatu titik pengukuran dan total erosi kotor (*gross erosion*) di hulunya.

Sistem dinamik (system dynamics)

Metodologi pemodelan sistem kompleks yang menitikberatkan pada struktur umpan balik, stok, dan penundaan waktu.

Stock and Flow Diagram (SFD)

Diagram stok-aliran yang merepresentasikan struktur kuantitatif model sistem dinamik secara matematis.

Stok (*stock*)

Elemen struktural yang merepresentasikan akumulasi suatu kuantitas pada suatu titik waktu.

***Time delay* (waktu tunda)**

Rentang waktu antara suatu tindakan/kejadian dan dampaknya yang teramati pada bagian lain dari sistem.

USLE

Universal Soil Loss Equation, formula empiris untuk mengestimasi laju erosi lahan tahunan rata-rata.

LAMPIRAN

➤ LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN ILUSTRATIF NERACA SEDIMEN BULANAN

Lampiran ini menyajikan contoh perhitungan ilustratif neraca sedimen bulanan pada suatu sub-DAS hipotetis, sebagai pelengkap contoh perhitungan tahunan yang telah dibahas pada Subbab 4.5. Perhitungan disederhanakan dengan mengasumsikan indeks erosivitas hujan bulanan (R bulanan) proporsional terhadap curah hujan bulanan, faktor gabungan $K \times LS \times C \times P$ bernilai konstan sebesar 1,15 (satuan ton/ha per satuan indeks R), dan Sediment Delivery Ratio (SDR) konstan sebesar 0,35 sepanjang tahun. Seluruh angka bersifat hipotetis untuk tujuan ilustrasi cara penyusunan neraca sedimen bulanan, bukan hasil pengukuran pada DAS tertentu.

Tabel 1. Ilustrasi neraca sedimen bulanan pada sub-DAS hipotetis

Bulan	Curah Hujan (mm)	Indeks R Bulanan	Estimasi Erosi (ton/ha)	Estimasi Sedimen Masuk Waduk (ribu ton)
Jan	310	192.2	92.8	32.5
Feb	285	176.7	85.3	29.9
Mar	260	161.2	77.9	27.3
Apr	190	117.8	56.9	19.9
Mei	120	74.4	35.9	12.6
Jun	70	43.4	21	7.4

Bulan	Curah Hujan (mm)	Indeks R Bulanan	Estimasi Erosi (ton/ha)	Estimasi Sedimen Masuk Waduk (ribu ton)
Jul	45	27.9	13.5	4.7
Agu	30	18.6	9	3.2
Sep	55	34.1	16.5	5.8
Okt	110	68.2	32.9	11.5
Nov	205	127.1	61.4	21.5
Des	275	170.5	82.4	28.8
Total	1955	-	-	205.1

Sumber: Perhitungan hipotetis penulis

Pola pada tabel di atas memperlihatkan bahwa estimasi erosi dan sedimen yang masuk ke waduk terkonsentrasi pada bulan-bulan dengan curah hujan tinggi (musim hujan, sekitar Desember-Maret), sementara pada bulan-bulan kemarau (Juni-Agustus) kontribusinya jauh lebih kecil. Pola musiman semacam ini penting diperhitungkan dalam perancangan jadwal operasi bangunan pengendali sedimen serta jadwal pengerukan (flushing) waduk, agar upaya pengendalian sedimen dapat difokuskan pada periode-periode kritis, alih-alih dilakukan secara merata sepanjang tahun tanpa mempertimbangkan variabilitas musiman.

Dalam struktur model sistem dinamik dengan resolusi waktu bulanan, tabel neraca sedimen semacam ini dapat langsung digunakan sebagai data kalibrasi bagi aliran masuk (inflow) stok sedimen waduk sebagaimana dibahas pada Subbab 2.4 dan Subbab 4.2, dengan pola musiman yang

direpresentasikan melalui fungsi tabel (graphical function/lookup table) yang tersedia pada hampir seluruh perangkat lunak sistem dinamik yang telah diperkenalkan pada Tabel 2.1.

Sebagai kelanjutan ilustrasi, estimasi total sedimen masuk tahunan pada Tabel Lampiran A dapat lebih lanjut dikonversi menjadi estimasi penurunan kapasitas tampungan waduk hipotetis, dengan mengasumsikan kapasitas tampungan awal sebesar 300.000 ribu m^3 (300 juta m^3) dan berat jenis sedimen terendapkan sebesar 1,3 ton/ m^3 (nilai tipikal untuk campuran lanau-lempung yang telah mengalami konsolidasi parsial). Dengan asumsi tersebut, total sedimen tahunan hasil Tabel Lampiran A dapat dikonversi menjadi volume sedimen dengan membagi total massa sedimen (ribu ton) dengan berat jenisnya, menghasilkan estimasi volume sedimen tahunan yang mengendap di waduk, yang kemudian dapat diakumulasikan dari tahun ke tahun untuk memproyeksikan lintasan penurunan kapasitas tampungan mengikuti pendekatan yang sama seperti yang digunakan untuk menghasilkan Gambar 13 pada studi kasus Waduk Bili-Bili.

Latihan lanjutan bagi pembaca: cobalah mengulangi perhitungan pada Lampiran ini dengan mengubah asumsi faktor gabungan $K \times LS \times C \times P$ dari 1,15 menjadi 0,60 (merekpresentasikan skenario perbaikan tutupan lahan melalui program non-struktural sebagaimana dibahas pada Subbab 5.4), kemudian bandingkan total estimasi sedimen tahunan yang dihasilkan dengan hasil pada Tabel Lampiran A. Selisih antara kedua hasil perhitungan tersebut memberikan gambaran kuantitatif sederhana mengenai potensi manfaat intervensi non-struktural yang telah dibahas secara konseptual pada Subbab 5.4 dan Subbab 5.7.

➤ LAMPIRAN B PANDUAN RINGKAS MEMULAI PEMODELAN SISTEM DINAMIK

Lampiran ini menyajikan panduan ringkas tujuh langkah bagi pembaca yang baru pertama kali hendak membangun model sistem dinamik untuk kajian DAS menggunakan perangkat lunak sejenis Vensim, sebagai pelengkap praktis bagi pembahasan konseptual pada Subbab 4.8. Panduan ini bersifat umum dan perlu disesuaikan dengan antarmuka spesifik versi perangkat lunak yang digunakan pembaca, mengingat tampilan menu dapat berbeda antarversi maupun antarperangkat lunak (Vensim, Stella, atau Powersim, sebagaimana dibandingkan pada Tabel 2.1).

Instalasi dan orientasi awal

Unduh dan pasang perangkat lunak sesuai kebutuhan (versi edukasi/PLE umumnya tersedia gratis untuk kalangan akademik, sebagaimana disinggung pada Tabel 2.1). Kenali tiga area kerja utama: kanvas diagram (tempat menyusun SFD), jendela persamaan (*equation editor*), dan jendela grafik/tabel keluaran simulasi.

Menyusun struktur SFD

Gunakan alat gambar bawaan untuk menempatkan simbol stok (kotak persegi), aliran (pipa dengan katup), konverter (lingkaran/segitiga kecil), dan konektor informasi (anak panah tipis), mengikuti hasil konseptualisasi pada Bab 3.

Menuliskan persamaan

Klik ganda setiap elemen untuk membuka jendela persamaan, lalu tuliskan formula sesuai Bab 4 (misalnya persamaan USLE pada konverter faktor erosi), dengan satuan (*units*) setiap variabel diisi secara konsisten untuk memungkinkan pemeriksaan konsistensi satuan otomatis.

Memeriksa konsistensi model

Manfaatkan fitur pemeriksaan satuan (*units check*) dan pemeriksaan model (*model check*) bawaan untuk mendeteksi kesalahan struktural sebelum simulasi dijalankan, sejalan dengan praktik verifikasi struktural pada Subbab 3.6.

Menjalankan simulasi dasar

Tetapkan rentang waktu simulasi (INITIAL TIME, FINAL TIME) dan langkah waktu (TIME STEP) sesuai resolusi data yang tersedia, kemudian jalankan simulasi dan periksa hasil awal secara kualitatif (apakah arah perubahan variabel kunci masuk akal).

Kalibrasi dan uji sensitivitas

Gunakan data historis untuk kalibrasi (Subbab 4.3) dan fitur simulasi sensitivitas untuk uji sensitivitas parameter (Subbab 4.4), sebagaimana diuraikan pada alur kerja Subbab 4.8.

Menyusun dan membandingkan skenario

Simpan beberapa hasil simulasi (run) dengan nama berbeda untuk setiap skenario kebijakan (Bab 5), lalu manfaatkan fitur perbandingan multi-run untuk menghasilkan grafik perbandingan seperti Gambar 10.

Pembaca yang ingin memperdalam keterampilan teknis penggunaan perangkat lunak sistem dinamik secara lebih rinci disarankan merujuk pada dokumentasi resmi masing-masing perangkat lunak serta buku ajar metodologis seperti Sterman (2000) dan Ford (2010) yang tercantum pada Daftar Pustaka, yang membahas teknik-teknik pemodelan lanjutan di luar cakupan pengantar praktis pada lampiran ini.

Tanya Jawab Singkat (FAQ) bagi Pemodel Pemula

T: Model saya menghasilkan nilai negatif pada stok yang seharusnya tidak mungkin negatif (misalnya volume sedimen), apa yang salah?

J: Periksa apakah aliran keluar (*outflow*) dapat melebihi nilai stok yang tersedia pada langkah waktu tertentu. Tambahkan fungsi pembatas (MIN/MAX) pada persamaan aliran keluar agar tidak pernah menguras stok hingga di bawah nol, sebuah praktik standar yang dikenal sebagai *non-negativity constraint*.

T: Hasil kalibrasi menunjukkan kecocokan (NSE) yang baik, namun nilai parameter yang dihasilkan tidak masuk akal secara fisik. Apakah ini boleh diterima?

J: Tidak disarankan. Sebagaimana ditekankan pada Subbab 4.8 mengenai pemeriksaan kewajaran (*reasonability check*), nilai parameter hasil kalibrasi otomatis perlu selalu diperiksa terhadap rentang nilai yang masuk akal secara fisik (Tabel 4.1) sebelum diterima, karena algoritma optimasi dapat menghasilkan kecocokan statistik tinggi melalui kombinasi parameter yang secara fisik tidak realistis (*overfitting*).

T: Berapa lama rentang data historis minimal yang dibutuhkan untuk kalibrasi yang memadai?

J: Tidak ada angka baku universal, namun sebagai pedoman umum, rentang data minimal 8-10 tahun umumnya dianggap memadai untuk menangkap variabilitas antartahun yang relevan bagi model tahunan, meskipun model tetap dapat dibangun dengan data lebih pendek disertai catatan keterbatasan yang eksplisit sebagaimana dibahas pada Subbab 4.7.

T: Apakah model sistem dinamik yang telah dibangun dapat langsung digunakan pada DAS lain?

J: Struktur model (CLD/SFD) dapat digunakan sebagai titik awal (*starting point*), namun nilai parameter hasil kalibrasi bersifat spesifik-lokasi dan tidak boleh dipindahkan begitu saja ke DAS lain tanpa rekalisasi menggunakan data setempat, sejalan dengan penekanan pada konteks lokal di Subbab 3.7 dan Subbab 1.8.

BIODATA PENULIS



Prof. Dr. Ir. Ahmad Rifqi Asrib, M.T. adalah seorang tenaga pengajar dan juga peneliti di Program Studi Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar, yang dilahirkan di Yogyakarta, 19 September 1963. Penulis menyelesaikan studi S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin tahun 1990 dan mendapatkan gelar Ir. Selanjutnya, pada tahun 1997 mendapatkan gelar MT pada program studi Teknik Sipil Pantai di Universitas Gadjahmada. Terakhir, menyelesaikan studi doktoral di IPB pada tahun 2013 pada bidang Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. Sejumlah penelitian telah dilakukan termasuk yang berkaitan dengan Pengelolaan Sumberdaya Air. Penelitian tersebut adalah Analisis model sistem klasifikasi Neraca Aliran Sedimen, Efektifitas Model Penyaringan dalam Meningkatkan Kualitas Air Sungai, Pengembangan *Smart Eco-Irrigation Photovoltaic System*. Sistem Cerdas Irigasi Ramah Lingkungan, dan Analisis Hasil Pengujian Geolistrik untuk Penentuan Karakteristik Fisik Lapisan Tanah. Kemudian, telah menerbitkan beberapa artikel pada jurnal internasional bereputasi diantaranya adalah *Analysis test of Fine Aggregates at the Upstream of Jeneberang River*, dan *Effectiveness of Screening Models in Improving the Quality of Cenrana River Water as a Drinking Water*. Beberapa buku telah ditulis termasuk buku Waduk dan Sedimen (2022), Mengenal Sistem Irigasi dan Bangunan Air (2023) dan Konservasi Tanah dan Air (2025). Selain sebagai dosen banyak orang mengenalnya juga sebagai seorang konsultan proyek pada berbagai pekerjaan fisik Keairan.