

Analisis Ketidakpastian Parameterisasi Penggunaan Lahan dalam Model Invest Water Yield: Tinjauan Sistematis DAS Tropis

Sarif Robo¹

¹Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Khairun, Ternate, 97751

*Email: sarifrobo5@gmail.com

Received : 30 Mei 2026
Accepted : 28 Juni 2026
Available online : 29 Juni 2026

ABSTRACT

Land use change (LULC) and climate variability are key factors influencing water availability in watersheds, particularly in tropical regions. The InVEST water yield model has been widely applied to assess water-related ecosystem services; however, it still faces significant challenges related to LULC parameter uncertainty. This study aims to identify patterns of LULC parameterization, analyze the relationship between land use change and water yield, and evaluate sources of uncertainty in the InVEST model. A systematic literature review (SLR) was conducted on 43 peer-reviewed articles indexed in Scopus and Web of Science (Q1–Q2) published between 2015 and 2026. The analysis focused on key biophysical parameters, including crop coefficient (Kc), root depth, plant available water content (PAWC), and the Z parameter, as well as model validation practices. The results indicate that precipitation is the primary driver of water yield, while LULC acts as a spatial modifier through evapotranspiration and infiltration processes. Land use changes such as deforestation and urbanization generally increase water yield, whereas forest cover tends to reduce it due to higher evapotranspiration rates. The variation of LULC parameters across studies reveals substantial inconsistency, representing the main source of model uncertainty. This uncertainty propagates through hydrological processes and significantly affects water yield estimation. Moreover, limited model validation indicates that many results remain conceptual rather than empirically verified. This study concludes that LULC parameterization is a critical factor determining the uncertainty level of the InVEST model. Therefore, locally calibrated parameterization approaches and improved empirical validation are essential to enhance model reliability, particularly in tropical watersheds.

Keywords: InVEST, land use, tropical watershed, uncertainty, water yield.

ABSTRAK

Landuse Land Cover (LULC) dan variabilitas iklim merupakan faktor utama yang mempengaruhi ketersediaan air pada daerah aliran sungai (DAS), khususnya di wilayah tropis. Model InVEST water yield banyak digunakan untuk mengevaluasi jasa ekosistem air, namun masih menghadapi tantangan terkait ketidakpastian parameterisasi LULC. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola penggunaan parameter LULC, menganalisis hubungan antara perubahan penggunaan lahan dan water yield, serta mengevaluasi sumber ketidakpastian dalam model InVEST. Metode yang digunakan adalah systematic literature review (SLR) terhadap 43 artikel terindeks Scopus dan Web of Science (Q1–Q2) periode 2015–2026. Analisis difokuskan pada parameter biofisik utama, yaitu crop coefficient (Kc), root depth, plant available water content (PAWC), dan parameter Z, serta praktik validasi model. Hasil menunjukkan bahwa curah hujan merupakan pengendali utama water yield, sementara LULC berperan sebagai pengatur distribusi spasial melalui mekanisme evapotranspirasi dan infiltrasi. Perubahan LULC seperti deforestasi dan urbanisasi secara umum meningkatkan water yield, sedangkan tutupan hutan cenderung menurunkannya akibat tingginya evapotranspirasi. Variasi parameter LULC antar studi menunjukkan ketidakseragaman yang tinggi dan menjadi sumber utama ketidakpastian model. Ketidakpastian tersebut terpropagasi melalui proses hidrologi dan mempengaruhi estimasi water yield. Selain itu, keterbatasan validasi model menunjukkan bahwa sebagian besar hasil masih bersifat konseptual. Penelitian ini menyimpulkan bahwa parameterisasi LULC merupakan faktor kunci yang menentukan tingkat ketidakpastian model InVEST. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan parameterisasi berbasis kondisi lokal serta integrasi validasi empiris untuk meningkatkan akurasi model, terutama pada DAS tropis.

Kata kunci: DAS tropis, InVEST, ketidakpastian, penggunaan lahan, water yield.

PENDAHULUAN

Perubahan penggunaan lahan (LULC) dan variabilitas iklim merupakan dua faktor utama yang mempengaruhi ketersediaan air pada skala daerah aliran sungai (DAS), khususnya di wilayah tropis yang memiliki dinamika biofisik yang kompleks (Sun *et al.* 2020; Hou *et al.* 2016). Dalam beberapa tahun terakhir, model InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*) banyak digunakan untuk mengevaluasi jasa ekosistem air melalui pendekatan berbasis neraca air, terutama untuk mengestimasi *water yield* berdasarkan interaksi antara iklim, tanah, dan penggunaan lahan (Hamel & Guswa, 2015; Redhead *et al.* 2016).

Berbagai studi menunjukkan bahwa faktor iklim, khususnya curah hujan, berperan sebagai pengendali utama (*driver*) dalam menentukan besarnya *water yield*, sementara penggunaan lahan berfungsi sebagai faktor pengatur (*modifier*) yang mempengaruhi distribusi spasial air melalui mekanisme evapotranspirasi dan infiltrasi (Pessacg *et al.* 2015; Gong & Liang, 2025; Xu *et al.* 2022). Perubahan LULC seperti deforestasi, urbanisasi, dan intensifikasi pertanian terbukti mampu mengubah keseimbangan hidrologi melalui peningkatan atau penurunan evapotranspirasi serta perubahan runoff (Daneshi *et al.* 2021; Goyal & Khan, 2017; Yu *et al.* 2025). Namun demikian, penerapan model InVEST masih menghadapi tantangan utama terkait ketidakpastian hasil, yang sebagian besar berasal dari parameterisasi penggunaan lahan. Parameter biofisik seperti *crop coefficient* (Kc), *root depth*, *plant available water content* (PAWC), dan parameter Z dalam kerangka Budyko menunjukkan variasi yang signifikan antar studi, mencerminkan tidak adanya standar parameterisasi yang konsisten (Hamel & Guswa, 2015; Redhead *et al.* 2016). Parameter Z merupakan konstanta empiris dalam model InVEST yang merepresentasikan distribusi musiman curah hujan (*seasonality factor*) (Sharp *et al.*, 2020). Dalam formulasi kurva Budyko, parameter Z berfungsi sebagai faktor penentu proporsi pembagian air antara evapotranspirasi aktual (AET) dan *water yield*. Secara konseptual, nilai Z yang rendah (mendekati 1) menunjukkan curah hujan yang sangat musiman, yang menyebabkan evapotranspirasi aktual lebih rendah dan *water yield* lebih tinggi, sedangkan

nilai Z yang tinggi (mendekati 30) menunjukkan distribusi hujan yang merata sepanjang tahun, yang meningkatkan evapotranspirasi dan menurunkan *water yield* (Donohue *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2004). Meskipun parameter ini idealnya dikalibrasi menggunakan data debit observasi lapangan, dalam praktiknya sebagian besar studi mengadopsi nilai dari literatur global tanpa penyesuaian lokal.

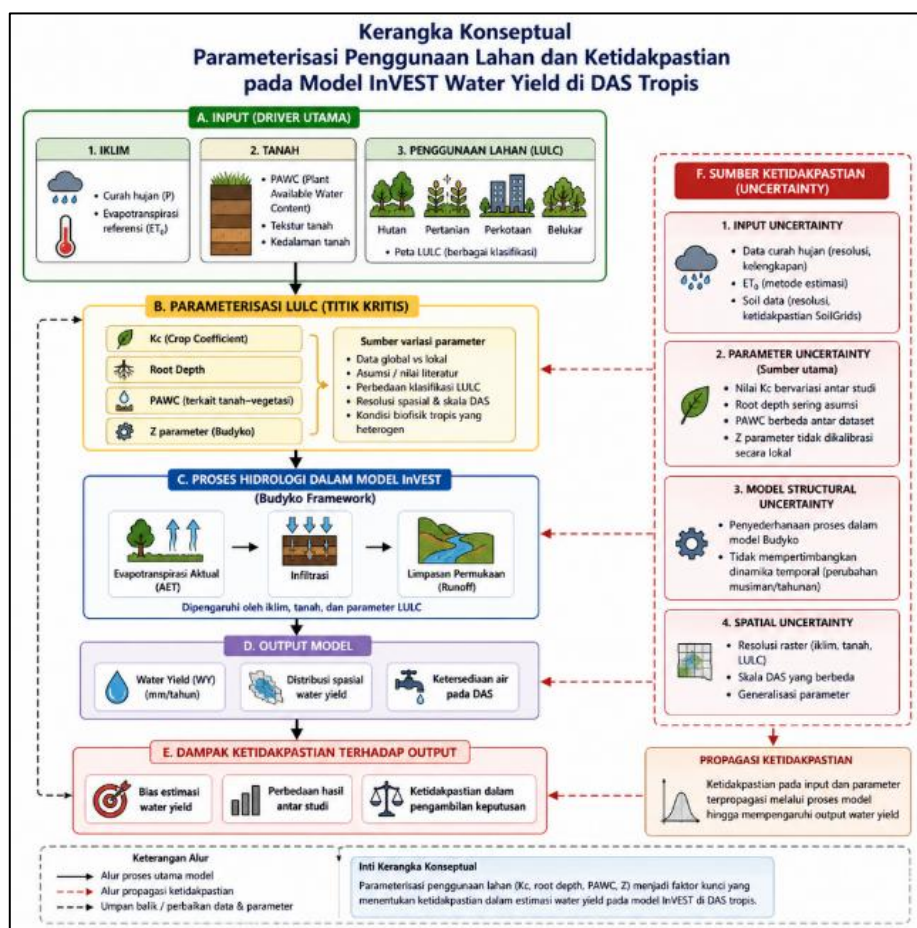
Selain itu, keterbatasan praktik validasi model memperbesar ketidakpastian dalam interpretasi hasil, karena banyak studi tidak menggunakan data debit observasi sebagai dasar verifikasi (Goyal & Khan, 2017; Daneshi *et al.* 2021). Kondisi ini menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam model InVEST tidak hanya berasal dari struktur model, tetapi juga dari kualitas input dan parameterisasi yang digunakan. Lebih jauh, ketidakpastian tersebut tidak bersifat statis, melainkan terpropagasi melalui proses hidrologi dalam model, sehingga mempengaruhi estimasi *water yield* secara keseluruhan (Banerjee *et al.* 2025; Pessacg *et al.* 2015). Meskipun berbagai penelitian telah membahas hubungan antara LULC dan *water yield*, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman mengenai bagaimana variasi parameter LULC tersebut berkontribusi terhadap ketidakpastian model, terutama dalam konteks DAS tropis. Hingga saat ini, belum terdapat kerangka konseptual yang secara sistematis menjelaskan hubungan antara parameterisasi LULC, proses hidrologi, dan propagasi ketidakpastian dalam model InVEST *water yield*.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola penggunaan parameter LULC dalam studi InVEST *water yield*, menganalisis hubungan antara perubahan penggunaan lahan dan variasi *water yield*, serta mengevaluasi sumber dan tingkat ketidakpastian yang muncul dalam model. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian terkait transferabilitas parameter LULC dari skala global ke lokal, serta menyusun kerangka konseptual yang menjelaskan hubungan antara LULC, proses hidrologi, dan ketidakpastian model pada DAS tropis.

Kerangka konseptual yang dikembangkan dalam penelitian ini menempatkan penggunaan lahan sebagai komponen kunci yang menghubungkan input biofisik (iklim dan tanah)

dengan proses hidrologi dalam model InVEST. Parameterisasi LULC (K_c , $root\ depth$, PAWC, dan Z) berperan sebagai titik kritis yang menentukan estimasi evapotranspirasi aktual (AET), yang selanjutnya mempengaruhi *water yield*. Dalam kerangka ini, ketidakpastian muncul pada setiap tahapan, baik dari input data, parameterisasi, maupun struktur model, dan

terpropagasi melalui proses hidrologi hingga mempengaruhi output model. Oleh karena itu, parameterisasi LULC tidak hanya berfungsi sebagai input model, tetapi juga sebagai faktor utama yang menentukan tingkat ketidakpastian dalam estimasi *water yield* di DAS tropis.



Gambar 1. Kerangka Konseptual parameterisasi Penggunaan lahan dan Ketidakpastian pada model InVEST *Water yield* di DAS Tropis

Kerangka konseptual penelitian ini menggambarkan hubungan antara parameterisasi penggunaan lahan (LULC) dan ketidakpastian dalam model InVEST *water yield* (Gambar 1). Parameter LULC seperti K_c , $root\ depth$, PAWC, dan parameter Z berperan sebagai penghubung antara kondisi biofisik dan proses hidrologi dalam model. Secara spesifik, parameter Z (faktor musiman presipitasi) dan K_c (koefisien tanaman) secara bersama-sama menentukan besarnya evapotranspirasi aktual (AET) melalui pendekatan kurva Budyko, di mana Z mengatur proporsi pembagian air berdasarkan pola musiman hujan, sedangkan K_c mencerminkan karakteristik vegetasi.

Sementara itu, $root\ depth$ dan PAWC memengaruhi ketersediaan air tanah yang dapat digunakan oleh tanaman. Variasi dalam parameter tersebut, yang seringkali berasal dari penggunaan data global atau asumsi literatur, menjadi sumber utama ketidakpastian dalam estimasi evapotranspirasi aktual (AET).

Ketidakpastian ini kemudian terpropagasi melalui proses hidrologi dalam model, sehingga mempengaruhi estimasi *water yield*. Dalam konteks DAS tropis, kompleksitas biofisik yang tinggi memperbesar ketidakpastian tersebut, terutama akibat ketidaksesuaian antara parameter global dan kondisi lokal. Oleh karena itu, parameterisasi LULC tidak hanya berfungsi

sebagai input model, tetapi juga sebagai faktor kunci yang menentukan reliabilitas output model.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) berbasis pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan transparansi, replikasi, dan konsistensi dalam proses seleksi literatur (Page *et al.* 2021; Moher *et al.* 2009). Pendekatan ini banyak digunakan dalam studi lingkungan dan pemodelan jasa ekosistem untuk mengidentifikasi pola penelitian, kesenjangan ilmiah, serta sintesis temuan secara sistematis (Haddaway *et al.* 2015; Pullin & Stewart, 2006).

Strategi Pencarian

Pencarian literatur dilakukan menggunakan database ilmiah utama, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, yang umum digunakan dalam studi *systematic literature review* untuk memastikan cakupan literatur yang luas dan representative (Page *et al.* 2021). Kata kunci disusun menggunakan kombinasi operator Boolean untuk menangkap studi yang relevan dengan topik jasa ekosistem, *water yield*, model InVEST, dan penggunaan lahan. Pendekatan ini banyak digunakan dalam SLR untuk meningkatkan akurasi dan relevansi hasil pencarian (Kitchenham & Charters, 2007). Query yang digunakan adalah: “ecosystem services” AND “*water yield*” AND “InVEST” AND “land use” AND (“trade-off” OR “uncertainty”) Pencarian dibatasi pada artikel jurnal terindeks kuartil Q1 dan Q2 dalam rentang tahun 2015–2026 untuk memastikan kualitas dan relevansi studi (Snyder 2019). Hasil pencarian awal menghasilkan 264 artikel. Setelah proses penyaringan berdasarkan judul, abstrak, dan kriteria inklusi–eksklusi sesuai pedoman SLR PRISMA 2020 Statement, jumlah artikel yang memenuhi syarat dan dianalisis dalam penelitian ini adalah sebanyak 43 studi.

Kriteria Inklusi

Kriteria inklusi ditetapkan untuk memastikan bahwa hanya studi yang relevan dan berkualitas tinggi yang dimasukkan dalam analisis. Studi yang dipilih memenuhi kriteria berikut:

1. Dipublikasikan dalam rentang tahun 2015–2026, seiring dengan berkembangnya konsep jasa ekosistem dan model InVEST secara global (Sharp *et al.* 2020).
2. Menggunakan model InVEST Annual *Water yield* sebagai alat analisis utama atau bagian dari evaluasi jasa ekosistem (Sharp *et al.* 2020).
3. Membahas parameter biofisik, khususnya yang terkait dengan penggunaan lahan (LULC), seperti *Kc*, *root depth*, *PAWC*, dan parameter hidrologi lainnya (Hamel & Guswa, 2015).
4. Berlokasi di wilayah tropis atau memiliki karakteristik biofisik yang sebanding dengan daerah tropis, termasuk Indonesia, yang memiliki dinamika hidrologi dan penggunaan lahan yang kompleks (Locatelli *et al.* 2015).

Penetapan kriteria ini penting untuk menjaga konsistensi dan relevansi studi dalam menjawab tujuan penelitian (Kitchenham & Charters, 2007). Meskipun fokus penelitian ini adalah DAS tropis, beberapa studi dari wilayah non-tropis tetap disertakan untuk memberikan perspektif komparatif terhadap variasi parameter dan kinerja model. Untuk menjaga konsistensi fokus penelitian pada wilayah tropis, studi yang berasal dari wilayah non-tropis tetap dipertimbangkan secara terbatas sebagai pembandingan konseptual, namun tidak digunakan sebagai dasar utama dalam penarikan kesimpulan. Pendekatan ini dilakukan untuk menghindari bias generalisasi, mengingat perbedaan karakteristik biofisik antara DAS tropis dan non-tropis dapat mempengaruhi respons hidrologi secara signifikan. Oleh karena itu, sintesis hasil dalam penelitian ini lebih menekankan pada studi yang memiliki karakteristik iklim dan penggunaan lahan yang sebanding dengan wilayah tropis.

Kriteria Eksklusi

Studi dikeluarkan dari analisis apabila memenuhi salah satu kriteria berikut:

1. Tidak menggunakan pendekatan pemodelan atau tidak melibatkan model InVEST dalam analisis *water yield*.
2. Tidak membahas parameter atau variabel yang berkaitan dengan penggunaan lahan dan evapotranspirasi.
3. Merupakan artikel review non-sistematis, opini, atau laporan tanpa metodologi yang jelas.

Langkah eksklusi ini dilakukan untuk memastikan bahwa studi yang dianalisis memiliki kualitas metodologis yang memadai dan relevan dengan fokus penelitian (Petticrew & Roberts, 2006).

Diagram Alir PRISMA

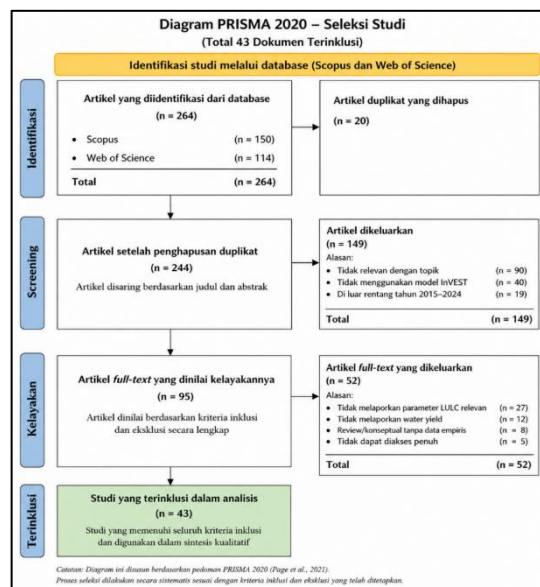
Proses seleksi literatur mengikuti empat tahapan utama dalam kerangka PRISMA, yaitu: identification, screening, eligibility, dan included (Page *et al.* 2021) (Gambar 2). Pada tahap *identification*, seluruh artikel yang diperoleh dari database dikumpulkan dan duplikasi dihapus. Selanjutnya, pada tahap *screening*, dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak untuk mengeliminasi studi yang tidak relevan. Tahap *eligibility* melibatkan evaluasi penuh terhadap teks artikel untuk memastikan kesesuaian dengan kriteria inklusi. Terakhir, pada tahap *included*, artikel yang memenuhi seluruh kriteria dimasukkan dalam analisis akhir. Pendekatan ini memungkinkan transparansi dalam proses seleksi dan mengurangi potensi bias dalam pemilihan literatur (Liberati *et al.* 2009). Sebanyak 43 studi yang memenuhi kriteria inklusi digunakan sebagai corpus utama analisis dalam penelitian ini. Daftar lengkap studi disajikan pada Tabel S1. Seluruh ekstraksi data parameter, klasifikasi LULC, praktik validasi, dan perhitungan frekuensi/proporsi pada bagian hasil diturunkan dari corpus tersebut.

Ekstraksi Data

Data dari setiap studi yang terpilih diekstraksi secara sistematis menggunakan format tabel untuk memudahkan perbandingan antar penelitian. Variabel yang diekstraksi meliputi:

- Identitas studi (penulis dan tahun)
- Lokasi penelitian
- Jenis model yang digunakan
- Klasifikasi penggunaan lahan (LULC)
- Parameter utama: *Kc*, *root depth*, *PAWC*, dan parameter *Z*
- Metode validasi model
- Resolusi data spasial

Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola penggunaan parameter dan variasi antar studi, yang penting dalam analisis ketidakpastian model (Hamel & Guswa, 2015; Vigerstol & Aukema, 2011).



Gambar 2. Prisma Diagram Flow Untuk SLR

Pendekatan Analitik

Analisis dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu kualitatif dan kuantitatif.

1. Analisis Kualitatif

Analisis kualitatif dilakukan melalui sintesis naratif untuk mengidentifikasi tren penggunaan parameter, pendekatan metodologi, serta kesenjangan penelitian yang ada (Popay *et al.* 2006). Pendekatan ini banyak digunakan dalam studi SLR untuk mengintegrasikan temuan dari berbagai sumber yang heterogen.

2. Analisis Kuantitatif

Analisis kuantitatif dilakukan melalui sintesis numerik terhadap nilai parameter yang dilaporkan dalam 43 studi, dengan menyajikan rentang nilai, rerata, frekuensi penggunaan, serta dominasi sumber data (global vs lokal). Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola umum variasi parameter dan ketidakseragaman praktik parameterisasi antar studi, bukan untuk melakukan uji statistik inferensial lintas studi mengingat heterogenitas metodologi dan pelaporan data. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi Hamel & Guswa (2015) dalam analisis sensitivitas parameter model InVEST.

Identifikasi Gap dan Ketidakpastian

Fokus utama analisis adalah mengidentifikasi:

- Ketidakpastian dalam parameterisasi (*uncertainty*)
- Variasi antar studi
- Kekurangan metodologis

Pendekatan ini penting untuk memahami keterbatasan model InVEST dan memberikan

rekomendasi untuk penelitian selanjutnya (Redhead *et al.* 2016).

Limitasi Penelitian

Pendekatan *systematic literature review* (SLR) dalam penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan metodologis yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil.

1. Hasil sintesis sangat bergantung pada strategi pencarian literatur yang digunakan, termasuk pemilihan kata kunci, basis data, serta kriteria inklusi dan eksklusi, sehingga berpotensi menyebabkan bias seleksi terhadap studi yang teridentifikasi. Meskipun pencarian dilakukan secara sistematis menggunakan kombinasi operator Boolean pada basis data Scopus dan Web of Science, kemungkinan adanya studi relevan yang tidak terjangkau tetap tidak dapat sepenuhnya dihindari, terutama studi yang tidak terindeks atau menggunakan terminologi yang berbeda.
2. Keterbatasan SLR juga berkaitan dengan bias publikasi (*publication bias*), di mana studi dengan hasil signifikan atau positif cenderung lebih banyak dipublikasikan dibandingkan studi dengan hasil negatif atau tidak signifikan. Kondisi ini dapat menyebabkan overestimasi terhadap hubungan antara parameter LULC dan *water yield*, karena studi yang tidak menunjukkan hubungan kuat mungkin tidak terwakili dalam corpus analisis. Selain itu, dominasi studi dari wilayah tertentu, terutama Asia dan Afrika, juga berpotensi menciptakan bias geografis yang mempengaruhi generalisasi hasil ke wilayah lain.
3. Proses ekstraksi dan sintesis data dalam SLR sangat bergantung pada pelaporan dalam masing-masing studi yang dianalisis. Variasi dalam metode, skala analisis, definisi parameter, serta tingkat detail pelaporan menyebabkan keterbatasan dalam standarisasi data yang dikompilasi. Akibatnya, beberapa nilai parameter seperti K_c , PAWC, dan *root depth* harus disintesis dalam bentuk rentang atau kecenderungan umum, bukan nilai absolut yang seragam.
4. SLR tidak memungkinkan verifikasi langsung terhadap kualitas data primer yang digunakan dalam setiap studi. Dengan kata lain, penelitian ini bergantung pada asumsi bahwa data dan metode yang digunakan dalam studi terinklusi telah melalui proses

validasi yang memadai. Namun, hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar studi tidak melakukan validasi model secara komprehensif, sehingga terdapat potensi propagasi ketidakpastian dari studi individu ke dalam hasil sintesis.

5. Keterbatasan lain dari pendekatan SLR adalah sifatnya yang deskriptif dan sintetik, sehingga tidak mampu menangkap dinamika temporal dan interaksi proses hidrologi secara langsung. Meskipun SLR dapat mengidentifikasi pola umum dan kecenderungan hubungan antara LULC dan *water yield*, pendekatan ini tidak dapat menggantikan analisis berbasis data observasi atau pemodelan dinamis yang lebih detail. Oleh karena itu, hasil penelitian ini sebaiknya dipahami sebagai sintesis konseptual yang memberikan gambaran umum, bukan sebagai representasi kuantitatif yang presisi untuk setiap kondisi lokal.
6. Selain itu, pendekatan SLR dalam penelitian ini juga menghadapi tantangan terkait ketergantungan pada kualitas studi sumber, di mana sebagian besar studi dalam corpus tidak melakukan validasi empiris. Hal ini menyebabkan sintesis numerik (seperti rentang dan rerata parameter) yang dihasilkan berpotensi mencerminkan 'ketidakpastian dalam ketidakpastian', karena nilai-nilai tersebut berasal dari model yang derajat keakuratannya terhadap kondisi aktual tidak dapat diverifikasi. Oleh karena itu, hasil kuantitatif dalam penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai nilai referensi universal, melainkan sebagai alat diagnostik untuk menunjukkan variasi dan ketidakseragaman praktik parameterisasi dalam literatur.

Secara keseluruhan, keterbatasan ini menunjukkan bahwa meskipun SLR merupakan pendekatan yang kuat dalam mengidentifikasi pola dan kesenjangan penelitian, interpretasi hasil tetap harus dilakukan dengan mempertimbangkan potensi bias, keterbatasan data, serta variasi metodologi antar studi. Dengan memahami batasan ini, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengintegrasikan pendekatan empiris dan pemodelan berbasis data untuk melengkapi hasil sintesis yang diperoleh melalui SLR.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Overview Studi

Seluruh analisis pada bagian hasil ini didasarkan pada 43 studi yang telah diseleksi (Tabel S1), yang menjadi dasar sintesis parameter, klasifikasi LULC, serta evaluasi ketidakpastian dalam model InVEST *water yield*.” Hasil pencarian dan seleksi literatur menunjukkan bahwa penelitian terkait pemodelan *water yield* menggunakan model InVEST mengalami peningkatan signifikan sejak tahun 2015, seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap jasa ekosistem dan pengelolaan DAS berbasis model (Redhead *et al.* 2016; Hamel & Guswa, 2015). Distribusi publikasi menunjukkan tren peningkatan terutama setelah tahun 2018, yang berkaitan dengan ketersediaan data spasial global seperti SoilGrids dan peningkatan akses terhadap citra satelit resolusi tinggi (Hengl *et al.* 2017).

Selain itu, studi-studi tersebut tersebar luas di wilayah tropis, termasuk Asia Tenggara, Amerika Latin, dan Afrika, yang memiliki karakteristik hidrologi serupa seperti curah hujan tinggi dan dinamika penggunaan lahan yang cepat (Locatelli *et al.* 2015). Sebagian kecil studi dalam corpus berasal dari wilayah non-tropis, namun tetap digunakan untuk memperkaya analisis variasi parameter secara global (n = 43; Tabel S1). Tren ini menunjukkan peningkatan eksponensial penggunaan model InVEST dalam analisis jasa ekosistem (Sharp *et al.* 2020).

Beberapa studi dalam corpus menunjukkan pola yang konsisten terkait faktor pengontrol *water yield*. Sebagai contoh, studi di DAS Heihe (terletak di wilayah arid-temperate Tiongkok utara, bukan termasuk DAS tropis) menunjukkan bahwa curah hujan merupakan faktor dominan dibandingkan perubahan

penggunaan lahan dalam menentukan *water yield* (Geng *et al.* 2015). Temuan serupa juga dilaporkan pada DAS Weihe (anak sungai Huang He di Tiongkok, beriklim temperate), di mana variabilitas curah hujan menjadi faktor utama dalam fluktuasi *water yield* (Wu *et al.* 2022). Keberadaan studi dari wilayah non-tropis ini dimasukkan dalam tinjauan untuk memperkaya pemahaman tentang variasi parameter dan mekanisme pengendali *water yield* secara global, namun sebagaimana telah dinyatakan dalam kriteria inklusi, studi dari wilayah non-tropis tidak digunakan sebagai dasar utama dalam penarikan kesimpulan untuk DAS tropis, melainkan sebagai pembanding konseptual untuk menunjukkan bahwa pengaruh dominan curah hujan terhadap *water yield* bersifat lintas zona iklim. Studi. Studi di wilayah urban menunjukkan bahwa peningkatan permukaan kedap air menyebabkan peningkatan *runoff* dan *water yield* (Carrasco-Valencia *et al.* 2024). Selain itu, studi validasi model menunjukkan bahwa model InVEST memiliki keterbatasan dalam akurasi temporal dan sangat sensitif terhadap parameter input, terutama parameter LULC (Anjinho *et al.* 2022).

Karakteristik Penggunaan Lahan (LULC)

Penggunaan lahan merupakan variabel kunci dalam model InVEST karena menentukan evapotranspirasi dan kapasitas retensi air tanah (Hamel & Guswa, 2015). Berdasarkan hasil sintesis literatur, terdapat empat kategori utama penggunaan lahan yang dominan digunakan dalam studi *water yield*, yaitu hutan, pertanian, perkebunan, dan permukiman. Namun, ditemukan bahwa klasifikasi LULC sangat bervariasi antar studi, baik dalam jumlah kelas maupun definisi kategorinya, yang berpotensi menimbulkan ketidakpastian dalam hasil model (Kindu *et al.* 2018).

Tabel 1. Karakteristik Evapotranspirasi dan Runoff pada Berbagai Tipe Penggunaan Lahan serta Implikasinya terhadap *Water Yield*

Kategori LULC	Representasi Umum	Mekanisme Hidrologi	Dampak terhadap <i>Water yield</i>	Referensi (Corpus SLR)
Hutan	<i>Forest, dense vegetation</i>	Evapotranspirasi tinggi, intersepsi kanopi	Cenderung menurunkan <i>water yield</i>	(Gong & Liang, 2025; Xu <i>et al.</i> 2022)
Pertanian	<i>Cropland</i>	Evapotranspirasi moderat, infiltrasi variatif	Dampak moderat dan kontekstual	(Sun <i>et al.</i> 2020; Hou <i>et al.</i> 2016)
Perkebunan	<i>Plantation</i>	Variasi ET tergantung jenis vegetasi	Dampak tidak konsisten	(Aneseyee <i>et al.</i> 2022; Almeida & Cabral, 2021)
Permukiman	Urban	Runoff tinggi, infiltrasi rendah	Cenderung meningkatkan <i>water yield</i>	(Daneshi <i>et al.</i> 2021; Goyal & Khan, 2022)

Catatan: Nilai rentang dan rerata dihitung dari ekstraksi parameter pada 43 studi (Tabel S1)

Tabel 1 menunjukkan bahwa klasifikasi penggunaan lahan dalam studi InVEST *water yield* umumnya dikelompokkan ke dalam empat kategori utama: hutan, pertanian, perkebunan, dan permukiman. Setiap kategori menunjukkan karakteristik hidrologi yang berbeda, terutama evapotranspirasi dan *runoff*. Tutupan hutan secara konsisten dikaitkan dengan evapotranspirasi yang tinggi dan intersepsi kanopi yang signifikan, sehingga menyebabkan *water yield* cenderung lebih rendah dibandingkan tipe penggunaan lahan lainnya (Gong & Liang, 2025; Xu *et al.* 2022). Pada lahan pertanian, evapotranspirasi berada pada tingkat moderat dengan variasi infiltrasi yang dipengaruhi oleh jenis tanaman dan praktik pengelolaan, sehingga dampaknya terhadap *water yield* bersifat kontekstual dan tidak seragam antar studi (Sun *et al.* 2020; Hou *et al.* 2016).

Sementara itu, kategori perkebunan menunjukkan tingkat variasi yang tinggi dalam parameter hidrologi, yang mencerminkan perbedaan jenis vegetasi dan kepadatan tutupan lahan, sehingga menghasilkan dampak yang tidak konsisten terhadap *water yield* (Aneseyee *et al.* 2022; Almeida & Cabral, 2021). Berbeda dengan tipe vegetasi, wilayah permukiman dicirikan oleh rendahnya evapotranspirasi dan tingginya *runoff* akibat dominasi permukaan kedap air, sehingga *water yield* cenderung meningkat secara kuantitatif (Daneshi *et al.* 2021; Goyal & Khan, 2017).

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa klasifikasi LULC selain berfungsi sebagai kategori penggunaan lahan, juga sebagai representasi dari mekanisme hidrologi yang

menentukan variasi *water yield* dalam model InVEST. Keberadaan studi non-tropis dalam corpus juga menunjukkan bahwa ketidakpastian parameterisasi merupakan isu lintas wilayah, meskipun implikasinya lebih kompleks pada DAS tropis.

Klasifikasi ini disusun berdasarkan sintesis 43 studi yang tercantum dalam Tabel S1, dengan mempertimbangkan kesamaan karakteristik penggunaan lahan dan respon hidrologi dalam model InVEST *water yield*. Variasi klasifikasi ini menjadi salah satu sumber utama ketidakpastian dalam pemodelan (Redhead *et al.* 2016).

Parameter Water Yield yang Digunakan

Model InVEST menggunakan beberapa parameter utama yang secara langsung mempengaruhi estimasi *water yield*, yaitu koefisien tanaman (Kc), kedalaman akar (root depth), kapasitas air tersedia (PAWC), parameter Z, evapotranspirasi referensi (ET0), dan curah hujan (Sharp *et al.* 2020).

Namun, nilai parameter ini sangat bervariasi antar studi dan seringkali diambil dari literatur global tanpa penyesuaian lokal (Hamel & Guswa, 2015). Untuk menghindari redundansi, Tabel 2 menyajikan interpretasi konseptual dan implikasi ilmiah dari setiap parameter LULC terhadap model InVEST *water yield*, sedangkan Tabel 4 menyajikan sintesis kuantitatif berupa rentang nilai, rerata, dan sumber data berdasarkan 43 studi terinklusi. Pemisahan ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif antara aspek numerik dan makna hidrologis dari setiap parameter.

Tabel 2. Interpretasi Ilmiah Parameter LULC dan Implikasinya terhadap *Water yield*

Parameter	Rentang	Sumber Dominan	Interpretasi Ilmiah	Implikasi terhadap Model
Kc	0.3 – 1.2	FAO / literatur global	Variasi tinggi menunjukkan perbedaan representasi evapotranspirasi antar studi	Potensi bias signifikan pada estimasi AET dan <i>water yield</i>
<i>Root Depth</i>	500 – 3000 mm	Literatur global	Nilai sering berbasis asumsi, bukan pengukuran	Over/under-estimasi kapasitas penyimpanan air tanah
PAWC	0.1 – 0.3	SoilGrids	Resolusi kasar tidak mencerminkan heterogenitas lokal	Ketidakkuratan estimasi ketersediaan air tanah
Z Parameter	1 – 30	Kalibrasi terbatas	Parameter sangat sensitif namun jarang dikalibrasi	Ketidakstabilan output model
ET0	800 – 2000 mm	Data iklim	Variasi dipengaruhi skala dan metode	Moderat terhadap output
Curah Hujan	1000 – 4000 mm	CHIRPS / stasiun	Data relatif konsisten	Lebih stabil dibanding parameter lain

Catatan: Nilai rentang dan rerata dihitung dari ekstraksi parameter pada 43 studi (Tabel S1)

Tabel 3 menunjukkan bahwa variabilitas parameter biofisik dalam model InVEST tidak hanya mencerminkan perbedaan kondisi biofisik antar wilayah, tetapi juga menunjukkan ketidakseragaman pendekatan parameterisasi antar studi. Parameter seperti Kc, root depth, dan Z parameter memiliki rentang nilai yang sangat lebar, yang mengindikasikan tingginya tingkat ketidakpastian dalam representasi evapotranspirasi dan kapasitas air tanah. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketidakpastian model tidak semata berasal dari struktur model, tetapi terutama dari inkonsistensi parameter input. Ketergantungan pada data global meningkatkan ketidakpastian model (Hengl *et al.* 2017).

Ketidakpastian dalam Parameterisasi

Ketidakpastian dalam model InVEST sebagian besar berasal dari variasi parameter input, terutama yang terkait dengan penggunaan lahan. Studi menunjukkan bahwa parameter seperti Kc dan root depth memiliki sensitivitas tinggi terhadap hasil *water yield* (Hamel & Guswa, 2015). Selain itu, penggunaan data default dan global seperti SoilGrids seringkali tidak merepresentasikan kondisi lokal secara akurat (Hengl *et al.* 2017).

Tabel 3 menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam model InVEST *water yield* berasal dari berbagai komponen parameterisasi, terutama yang berkaitan dengan penggunaan lahan dan karakteristik biofisik. Parameter *crop coefficient* (Kc) merupakan salah satu sumber utama ketidakpastian, karena variasi nilainya yang tinggi antar studi serta ketergantungan pada data literatur global menyebabkan perbedaan signifikan dalam estimasi evapotranspirasi dan *water yield* (Hamel & Guswa, 2015; Redhead *et al.* 2016). Selain itu,

parameter *root depth* umumnya ditentukan berdasarkan asumsi umum tanpa dukungan data lapangan, sehingga dapat menyebabkan bias dalam estimasi kapasitas penyimpanan air tanah dan proses evapotranspirasi (Aneseyee *et al.* 2022; Almeida & Cabral, 2021). Penggunaan data global seperti SoilGrids untuk parameter PAWC juga berkontribusi terhadap ketidakpastian, terutama akibat resolusi spasial yang rendah yang dapat menyebabkan overestimasi atau underestimasi ketersediaan air tanah (Sun *et al.* 2020; Hou *et al.* 2016). Parameter Z dalam model InVEST menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap output *water yield*, namun dalam banyak studi parameter ini tidak dikalibrasi secara memadai, sehingga meningkatkan ketidakpastian hasil model (Pessacg *et al.* 2015; Banerjee *et al.* 2025). Selain itu, perbedaan klasifikasi penggunaan lahan antar studi juga menjadi sumber ketidakpastian tambahan, karena setiap klasifikasi menghasilkan parameter biofisik yang berbeda dan mempengaruhi hasil model secara signifikan (Daneshi *et al.* 2021; Goyal & Khan, 2017).

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam model InVEST tidak hanya berasal dari struktur model, tetapi terutama dari variasi dan keterbatasan dalam parameterisasi input, khususnya yang berkaitan dengan LULC dan data biofisik.

Tabel ini disusun berdasarkan sintesis 43 studi yang tercantum dalam Tabel S1, dengan fokus pada identifikasi sumber utama ketidakpastian dalam parameterisasi model InVEST *water yield*. Ketidakpastian ini merupakan isu utama dalam model jasa ekosistem (Hamel & Guswa, 2015).

Tabel 3. Sumber Ketidakpastian

Sumber Ketidakpastian	Deskripsi	Dampak terhadap Output Model
Kc (<i>Crop coefficient</i>)	Variasi nilai antar studi dan ketergantungan pada literatur global	Perbedaan signifikan dalam estimasi evapotranspirasi dan <i>water yield</i>
Root Depth	Asumsi nilai umum tanpa pengukuran lapangan	Bias dalam estimasi kapasitas penyimpanan air tanah dan evapotranspirasi
PAWC	Penggunaan data global (misalnya SoilGrids) dengan resolusi terbatas	Overestimasi atau underestimasi ketersediaan air tanah
Z Parameter	Kalibrasi terbatas atau tidak dilakukan	Sensitivitas tinggi terhadap output <i>water yield</i>
LULC Classification	Perbedaan klasifikasi penggunaan lahan antar studi	Variasi hasil model dan inkonsistensi spasial

Pengaruh LULC terhadap Water Yield

Tabel 4 menunjukkan pola umum pengaruh penggunaan lahan (LULC) terhadap komponen hidrologi utama dan *water yield* berdasarkan sintesis 43 studi yang dianalisis. Secara konsisten, tutupan hutan dikaitkan dengan tingkat evapotranspirasi (ET) yang tinggi dan runoff yang relatif rendah, sehingga *water yield* cenderung lebih rendah dibandingkan tipe penggunaan lahan lainnya (Gong & Liang, 2025; Xu *et al.* 2022). Kondisi ini disebabkan oleh peran kanopi dan sistem perakaran yang dalam dalam meningkatkan intersepsi dan penyerapan air. Pada lahan pertanian, nilai ET dan runoff umumnya berada pada tingkat moderat, sehingga dampaknya terhadap *water yield* juga bersifat sedang dan bergantung pada jenis tanaman serta praktik pengelolaan lahan (Sun *et al.* 2020; Hou *et al.* 2016). Variasi ini menunjukkan bahwa sistem pertanian memiliki respons hidrologi yang tidak seragam antar lokasi.

Pada kategori perkebunan, hasil sintesis menunjukkan tingkat variasi yang tinggi baik pada ET maupun runoff, yang mengindikasikan

bahwa karakteristik vegetasi dan kepadatan tutupan lahan sangat mempengaruhi respon hidrologi (Aneseyee *et al.* 2022; Almeida & Cabral, 2021). Akibatnya, dampak terhadap *water yield* tidak konsisten antar studi. Sementara itu, wilayah permukiman menunjukkan pola yang berbeda, di mana ET cenderung rendah dan runoff tinggi akibat dominasi permukaan kedap air, sehingga *water yield* relatif lebih tinggi secara kuantitatif (Daneshi *et al.* 2021; Goyal & Khan, 2017). Namun, peningkatan ini tidak selalu mencerminkan kondisi hidrologi yang lebih baik, karena sering dikaitkan dengan peningkatan aliran permukaan yang cepat dan potensi degradasi kualitas air.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik LULC menghasilkan variasi signifikan pada proses hidrologi, terutama melalui mekanisme evapotranspirasi dan runoff, yang pada akhirnya menentukan besarnya *water yield* dalam model InVEST (Hamel & Guswa, 2015; Pessacg *et al.* 2015).

Tabel 4. Pengaruh Penggunaan Lahan (LULC) terhadap Proses Hidrologi dan *Water yield*

Jenis LULC	Evapotranspirasi (ET)	Runoff	Dampak terhadap <i>Water yield</i>	Penjelasan Mekanisme
Hutan	Tinggi	Rendah	Cenderung menurunkan	Kanopi dan akar dalam meningkatkan ET dan infiltrasi
Pertanian	Sedang	Sedang	Bervariasi (moderat)	Dipengaruhi jenis tanaman dan praktik pengelolaan
Perkebunan	Variatif	Variatif	Tidak konsisten	Bergantung pada jenis vegetasi dan kepadatan tutupan
Permukiman	Rendah	Tinggi	Cenderung meningkatkan	Permukaan kedap air meningkatkan runoff

Sintesis ini disusun berdasarkan analisis studi yang tercantum dalam Tabel S1, dengan mempertimbangkan hubungan antara karakteristik penggunaan lahan dan proses hidrologi dalam model InVEST. Hal ini menunjukkan adanya trade-off antar jasa ekosistem (Bennett *et al.* 2009).

Analisis Kuantitatif Parameter LULC dalam Model InVEST

Meskipun analisis ini belum mencapai tingkat meta-analisis inferensial, sintesis numerik yang disajikan tetap memberikan gambaran kuantitatif yang lebih kuat dibandingkan sekadar deskripsi rentang nilai. Berdasarkan 43 studi terinklusi, parameter biofisik utama dalam model InVEST *water yield*

menunjukkan variasi yang cukup lebar antar studi, terutama pada Kc, *root depth*, PAWC, dan parameter Z. Nilai Kc berada pada kisaran 0,3–1,2 dengan rerata sekitar 0,75, *root depth* berada pada kisaran 500–3000 mm, PAWC pada kisaran 0,10–0,30, dan parameter Z pada kisaran 1–30. Rentang yang lebar ini menunjukkan bahwa parameterisasi LULC tidak hanya berbeda secara teknis, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh konteks biofisik dan pilihan sumber data yang digunakan dalam masing-masing studi.

Dari sisi sumber data, hasil ekstraksi menunjukkan bahwa 34 dari 43 studi atau 79% menggunakan data global seperti FAO, SoilGrids, atau literatur sekunder, sedangkan

hanya 9 studi atau 21% yang menggunakan data lokal berbasis pengukuran lapangan atau observasi langsung. Pola ini penting karena menunjukkan dominasi pendekatan generik dalam parameterisasi model, yang pada gilirannya berpotensi mengurangi representativitas lokal dari hasil estimasi *water yield*. Kondisi tersebut diperkuat oleh fakta bahwa 28 studi atau 65% tidak melakukan validasi empiris, 9 studi atau 21% hanya melakukan validasi parsial, dan hanya 6 studi atau 14% yang melakukan validasi penuh

dengan data debit lapangan. Dengan demikian, variasi numerik yang terlihat pada parameter LULC tidak dapat dipisahkan dari variasi dalam kualitas sumber data dan tingkat verifikasi model. Data pada tabel ini diperoleh dari hasil ekstraksi parameter biofisik pada 43 studi yang tercantum dalam Tabel 5. Rentang nilai menunjukkan variasi parameter yang dilaporkan dalam studi, sedangkan jumlah studi menunjukkan frekuensi kemunculan parameter dalam corpus.

Tabel 5. Statistik Kuantitatif Parameter Biofisik dalam 43 Studi InVEST *Water yield*

Parameter	Rentang Nilai	Jumlah Studi (n)	Frekuensi (%)	Sensitivitas	Sumber Data Dominan
Kc (Crop Coefficient)	0.3 – 1.2	40	93%	Tinggi	Global (FAO/Literatur)
Root Depth	500 – 3000 mm	35	81%	Tinggi	Global/Literatur
PAWC	0.10 – 0.30	33	77%	Sedang–Tinggi	SoilGrids/Global
Z Parameter	1 – 30	28	65%	Sangat Tinggi	Literatur/Asumsi
ET0	Variatif (iklim)	38	88%	Tinggi	Data iklim global
Precipitation (P)	Variatif	43	100%	Sangat Tinggi	Data observasi/global

Catatan: Nilai rentang dan rerata dihitung dari ekstraksi parameter pada 43 studi (Tabel S1)

Klasifikasi disusun berdasarkan sintesis 43 studi (Tabel S1). Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa parameter biofisik dalam model InVEST *water yield* memiliki variasi yang cukup besar antar studi.

Frekuensi penggunaan parameter juga memperlihatkan bahwa Kc dilaporkan dalam 40 studi (93%), *root depth* dalam 35 studi (81%), PAWC dalam 33 studi (77%), parameter Z dalam 28 studi (65%), dan ET0 dalam 38 studi (88%). Tingginya frekuensi ini mengindikasikan adanya pengakuan luas terhadap pentingnya parameter-parameter tersebut dalam estimasi *water yield*, tetapi belum diikuti oleh keseragaman nilai maupun standar kalibrasi lintas studi. Dengan kata lain, literatur yang dianalisis menunjukkan konsensus pada level “parameter yang penting”, namun belum menunjukkan konsensus yang sama pada level “nilai parameter yang paling representatif”. Hal ini menjadi alasan mengapa analisis kuantitatif di sini lebih tepat dipahami sebagai sintesis numerik-deskriptif yang kuat, bukan sebagai uji statistik komparatif antar studi.

Keterbatasan ini justru menjadi temuan metodologis yang penting. Variasi pelaporan, perbedaan skala analisis, dan ketidakterseragaman sumber data membuat

penerapan uji statistik lintas studi seperti korelasi formal atau meta-analisis inferensial belum dapat dilakukan secara robust. Oleh karena itu, hasil kuantitatif yang disajikan dalam penelitian ini berfungsi untuk memperlihatkan pola umum ketidakseragaman parameterisasi LULC, bukan untuk menetapkan nilai parameter tunggal yang paling benar. Dalam konteks ini, ketidakpastian hasil model lebih tepat dipahami sebagai konsekuensi dari kombinasi antara variasi parameter, dominasi data global, dan minimnya validasi empiris dalam corpus studi yang dianalisis.

Klasifikasi sumber data didasarkan pada informasi yang dilaporkan dalam 43 studi yang tercantum dalam Tabel 6. Data global mencakup dataset sekunder seperti FAO dan SoilGrids, sedangkan data lokal mencakup hasil pengukuran lapangan atau data observasi spesifik lokasi. Adapun klasifikasi praktik validasi didasarkan pada metode yang dilaporkan dalam 43 studi yang tercantum dalam Tabel 7. Validasi penuh mengacu pada penggunaan data debit observasi, sedangkan validasi parsial mencakup penggunaan data sekunder atau pendekatan tidak langsung.

Tabel 6. Distribusi Sumber Data Parameter dalam Studi InVEST *Water yield*

Sumber Data	Jumlah Studi (n=43)	Persentase (%)	Implikasi
Data global (FAO, SoilGrids, literatur)	34	79%	Risiko bias tinggi karena tidak merepresentasikan kondisi biofisik lokal
Data lokal (pengukuran lapangan / data observasi)	9	21%	Lebih representatif terhadap kondisi lokal, namun ketersediaan data terbatas

Catatan: Persentase dihitung dari 43 studi terinklusi (Tabel S1).

Tabel 7. Praktik Validasi Model dalam Studi InVEST *Water yield*

Jenis Validasi	Jumlah Studi (n=43)	Persentase (%)	Interpretasi
Tanpa validasi empiris	28	65%	Output bersifat konseptual dan belum diverifikasi terhadap data observasi
Validasi parsial (data sekunder / proxy)	9	21%	Validasi terbatas, belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi hidrologi aktual
Validasi penuh (data debit lapangan)	6	14%	Output lebih reliabel dan mendekati kondisi hidrologi aktual

Catatan: Klasifikasi praktik validasi didasarkan pada metode yang dilaporkan dalam 43 studi (Tabel S1)

Tabel 8. Research Gap dalam Studi InVEST *Water Yield*

Gap Utama	Penjelasan
Tidak adanya <i>framework transferability parameter</i> LULC	Belum terdapat pendekatan sistematis untuk menyesuaikan parameter LULC dari dataset global ke kondisi biofisik lokal, khususnya pada DAS tropis
Tidak adanya kuantifikasi propagasi ketidakpastian parameter	Variasi parameter seperti Kc, root depth, dan Z belum dianalisis secara sistematis dalam kaitannya dengan ketidakpastian output model
Ketergantungan tinggi pada parameter generik global	Mayoritas studi menggunakan data global tanpa kalibrasi lokal, sehingga berpotensi menghasilkan bias dalam estimasi <i>water yield</i>
Minimnya validasi berbasis data observasi	Sebagian besar studi tidak melakukan validasi menggunakan data debit lapangan, sehingga reliabilitas model belum dapat dipastikan
Keterbatasan analisis temporal	Sebagian besar studi menggunakan pendekatan statis dan belum mempertimbangkan dinamika perubahan parameter dalam jangka waktu panjang

Catatan: Gap penelitian diidentifikasi dari sintesis 43 studi (Tabel S1).

Namun, interpretasi terhadap sintesis numerik yang disajikan dalam Tabel 6 perlu dilakukan dengan sangat hati-hati. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7, sebanyak 65% studi dalam corpus (28 dari 43 studi) tidak melakukan validasi empiris sama sekali, dan hanya 14% yang melakukan validasi penuh menggunakan data debit lapangan. Akibatnya, nilai rata-rata dan rentang parameter (seperti Kc, root depth, PAWC, dan Z) yang dihitung dari studi-studi tersebut tidak serta-merta mencerminkan nilai aktual di lapangan, melainkan lebih mencerminkan praktik pelaporan, asumsi peneliti, atau bahkan sekadar kutipan dari literatur global yang digunakan berulang kali. Dengan kata lain, sintesis numerik ini mengandung 'ketidakpastian dalam ketidakpastian' (*uncertainty within uncertainty*), karena nilai rata-rata yang dihasilkan berasal

dari model-model yang derajat kebenarannya (akurasinya terhadap kondisi aktual) sendiri tidak terverifikasi. Oleh karena itu, fungsi utama dari sintesis numerik dalam penelitian ini bukanlah untuk menetapkan 'nilai parameter baku' bagi DAS tropis, melainkan untuk mendiagnosis tingginya variasi dan ketidakseragaman praktik parameterisasi di antara para peneliti, serta untuk menunjukkan bahwa akumulasi kuantitatif dari studi yang tidak divalidasi tidak otomatis meningkatkan akurasi estimasi justru sebaliknya, ia dapat menciptakan ilusi presisi (*false precision*) jika tidak diinterpretasikan secara kritis

Gap Analisis

Hasil sintesis (Tabel 8) menunjukkan bahwa masih terdapat kesenjangan signifikan dalam pemodelan *water yield* menggunakan

InVEST, terutama terkait parameterisasi penggunaan lahan. Gap ini menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam model InVEST *water yield* tidak hanya berasal dari struktur model, tetapi terutama dari ketidakseragaman parameterisasi penggunaan lahan yang belum memiliki kerangka transferabilitas yang jelas. Gap ini juga diidentifikasi dalam studi global (Redhead *et al.* 2016).

Pembahasan

Meskipun studi terkait InVEST *water yield* di Indonesia masih terbatas, keberadaan studi seperti Suryanta *et al.* (2024) menunjukkan relevansi model ini dalam konteks DAS tropis dengan tekanan penggunaan lahan yang tinggi. Keberadaan studi dari Indonesia dalam corpus ini, meskipun terbatas, memberikan konteks penting bagi penerapan model InVEST di wilayah tropis lembab. Studi oleh Suryanta *et al.* (2024) di DAS Citarum menunjukkan bahwa dinamika penggunaan lahan yang kompleks, termasuk konversi hutan menjadi pertanian dan permukiman, berpengaruh signifikan terhadap estimasi *water yield*. Hal ini memperkuat temuan umum dalam studi ini bahwa parameter LULC menjadi sumber utama ketidakpastian model, terutama pada wilayah dengan tekanan antropogenik tinggi. Selain itu, konteks Indonesia menegaskan bahwa penggunaan data global tanpa kalibrasi lokal berpotensi menghasilkan bias yang lebih besar dibandingkan wilayah dengan kondisi biofisik yang lebih homogen.

Dominasi Faktor Iklim vs LULC

Hasil sintesis dari 43 studi menunjukkan bahwa faktor iklim, khususnya curah hujan, merupakan pengontrol utama dalam estimasi *water yield* pada model InVEST. Hal ini terlihat konsisten pada berbagai studi di wilayah Asia dan DAS tropis, di mana variabilitas presipitasi memiliki pengaruh langsung terhadap besarnya aliran air yang dihasilkan (Xu *et al.* 2022; Yu *et al.* 2025; Geng *et al.* 2015). Tingginya kontribusi curah hujan terhadap *water yield* disebabkan oleh perannya sebagai input utama dalam neraca air, sehingga perubahan kecil dalam presipitasi dapat menghasilkan perubahan signifikan pada output model (Gong & Liang, 2025; Daneshi *et al.* 2021).

Namun demikian, penggunaan lahan tetap memainkan peran penting sebagai faktor

pengatur distribusi spasial *water yield*. Studi menunjukkan bahwa perubahan LULC mempengaruhi proses evapotranspirasi dan infiltrasi, yang pada akhirnya mengubah distribusi air di dalam DAS (Hou *et al.* 2016; Sun *et al.* 2020). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun iklim berperan sebagai pengendali utama (driver), LULC berfungsi sebagai faktor pengubah (modifier) yang menentukan bagaimana air didistribusikan dalam sistem hidrologi (Pessacg *et al.* 2015).

Interaksi antara faktor iklim dan LULC juga menunjukkan bahwa dampak penggunaan lahan terhadap *water yield* tidak bersifat linear, melainkan tergantung pada kondisi iklim setempat. Dalam kondisi curah hujan tinggi, perubahan LULC cenderung memiliki pengaruh yang lebih kecil dibandingkan faktor iklim, sedangkan pada kondisi kering, pengaruh LULC menjadi lebih signifikan (Goyal & Khan, 2017; Banerjee *et al.* 2025).

Parameterisasi LULC sebagai Sumber Ketidakpastian

Salah satu temuan utama dari studi ini adalah tingginya variasi parameter LULC yang digunakan dalam model InVEST, khususnya parameter Kc, root depth, PAWC, dan parameter Z. Variasi ini mencerminkan tidak adanya standar parameterisasi yang konsisten antar studi, sehingga setiap penelitian menggunakan pendekatan yang berbeda dalam menentukan nilai parameter (Hamel & Guswa, 2015; Redhead *et al.* 2016).

Ketergantungan terhadap data global seperti FAO dan SoilGrids menyebabkan parameter yang digunakan sering kali tidak merepresentasikan kondisi biofisik lokal, terutama pada DAS tropis yang memiliki heterogenitas tinggi (Aneseyee *et al.* 2022; Almeida & Cabral, 2021). Hal ini menyebabkan munculnya bias dalam estimasi evapotranspirasi dan *water yield*, karena parameter yang digunakan tidak sesuai dengan kondisi lapangan.

Selain itu, perbedaan klasifikasi penggunaan lahan antar studi juga menjadi sumber ketidakpastian tambahan. Kategori LULC yang berbeda akan menghasilkan nilai parameter yang berbeda pula, sehingga mempengaruhi hasil model secara signifikan (Hou *et al.* 2016; Sun *et al.* 2020). Perbedaan klasifikasi ini juga mencerminkan tidak adanya standar baku yang digunakan secara lintas

negara. Sebagai contoh, di Indonesia terdapat Standar Nasional Indonesia untuk Klasifikasi Penutupan Lahan (SNI 7645-1:2014) yang mengacu pada kerangka FAO (Food and Agriculture Organization), namun standar ini belum tentu sejalan dengan sistem klasifikasi yang digunakan di negara tropis lainnya seperti Brasil, Ethiopia, atau Vietnam. Ketidakeragaman standar klasifikasi ini semakin memperkuat argumen bahwa parameterisasi LULC merupakan sumber ketidakpastian utama. Ke depan, diperlukan upaya harmonisasi klasifikasi LULC berbasis karakteristik biofisik DAS tropis, serta kajian lebih mendalam mengenai bagaimana perbedaan sistem klasifikasi nasional mempengaruhi transferabilitas parameter antar studi. Oleh karena itu, parameterisasi LULC dapat diidentifikasi sebagai sumber utama ketidakpastian dalam model InVEST *water yield*.

Propagasi Ketidakpastian

Ketidakpastian yang berasal dari parameter LULC tidak hanya mempengaruhi input model, tetapi juga terpropagasi melalui proses hidrologi dalam model InVEST. Parameter seperti Kc dan Z memiliki sensitivitas tinggi terhadap estimasi evapotranspirasi aktual (AET), yang merupakan komponen utama dalam perhitungan *water yield* (Hamel & Guswa, 2015; Pessacg *et al.* 2015).

Studi menunjukkan bahwa kesalahan kecil dalam parameterisasi dapat menghasilkan deviasi yang besar dalam output model, terutama pada wilayah dengan variabilitas iklim tinggi (Banerjee *et al.* 2025; Daneshi *et al.* 2021). Fenomena ini dikenal sebagai *error propagation*, di mana ketidakpastian awal diperbesar melalui proses model hingga mempengaruhi hasil akhir.

Selain itu, struktur model InVEST yang berbasis pendekatan Budyko juga memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan dinamika hidrologi yang kompleks, sehingga memperbesar dampak ketidakpastian parameter terhadap output model (Redhead *et al.* 2016).

Validasi Model

Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar studi tidak melakukan validasi model secara menyeluruh menggunakan data debit observasi. Kondisi ini menyebabkan output model cenderung bersifat konseptual dan

belum sepenuhnya mencerminkan kondisi hidrologi aktual (Almeida & Cabral, 2021; Aneseyee *et al.* 2022). Studi yang melakukan validasi menunjukkan bahwa akurasi model dapat meningkat secara signifikan, namun jumlahnya masih terbatas dalam literatur (Xu *et al.* 2022; Yu *et al.* 2025). Kurangnya validasi ini menjadi salah satu faktor utama yang meningkatkan ketidakpastian dalam model InVEST *water yield*.

Implikasi untuk DAS Tropis

Dalam konteks DAS tropis, kompleksitas biofisik yang tinggi memperbesar ketidakpastian dalam model. Curah hujan yang tinggi, vegetasi yang lebat, serta heterogenitas tanah menyebabkan parameterisasi model menjadi lebih kompleks dibandingkan wilayah temperate (Gong & Liang, 2025; Hou *et al.* 2016).

Penggunaan parameter global tanpa kalibrasi lokal berpotensi menghasilkan estimasi yang tidak representatif terhadap kondisi aktual, sehingga mengurangi reliabilitas model dalam mendukung pengambilan keputusan (Aneseyee *et al.* 2022; Sun *et al.* 2020). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan parameterisasi yang lebih adaptif dan berbasis kondisi lokal untuk meningkatkan akurasi model.

Sintesis pada Tabel 9 dan Tabel 10 menunjukkan pola konsisten bahwa karakteristik penggunaan lahan (LULC) berperan penting dalam mengontrol variasi *water yield* melalui mekanisme hidrologi yang berbeda-beda. Pada wilayah dengan tutupan hutan lebat, tingginya evapotranspirasi dan intersepsi kanopi menyebabkan sebagian besar air kembali ke atmosfer, sehingga *water yield* cenderung lebih rendah dibandingkan tipe penggunaan lahan lainnya (Gong & Liang, 2025; Xu *et al.* 2022).

Sebaliknya, perubahan tutupan lahan seperti deforestasi atau konversi hutan menjadi lahan terbuka menyebabkan penurunan evapotranspirasi dan peningkatan limpasan permukaan, yang pada akhirnya meningkatkan *water yield*, terutama dalam jangka pendek (Yu *et al.* 2025; Daneshi *et al.* 2021). Pola ini menunjukkan bahwa perubahan LULC tidak hanya mempengaruhi jumlah air yang tersedia, tetapi juga jalur distribusi air dalam sistem hidrologi DAS.

Tabel 9. Perbandingan Pengaruh Parameter LULC terhadap *Water yield* antar Studi

Lokasi Studi	Karakteristik LULC	Temuan Utama	Referensi (dari corpus)
DAS tropis	Hutan lebat	Tingginya evapotranspirasi pada tutupan hutan menyebabkan penurunan <i>water yield</i>	(Gong & Liang, 2025; Yu <i>et al.</i> 2025)
<i>Multi-catchment global</i>	Vegetasi vs non-vegetasi	Perubahan tutupan vegetasi menghasilkan perubahan signifikan pada <i>water yield</i> melalui mekanisme evapotranspirasi	(Sun <i>et al.</i> 2020; Hou <i>et al.</i> 2016)
Eropa (UK/Portugal)	Multi LULC	Variasi LULC menghasilkan perbedaan spasial <i>water yield</i> yang signifikan setelah validasi model	(Almeida & Cabral, 2021; Redhead <i>et al.</i> 2016)
Global (berbasis modeling)	Beragam LULC	Parameter LULC menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap output model <i>water yield</i>	(Hamel & Guswa, 2015; Banerjee <i>et al.</i> 2025)
Tropis & non-tropis	Perubahan penggunaan lahan	Trade-off antara evapotranspirasi dan <i>water yield</i> bergantung pada kondisi biofisik dan iklim	(Daneshi <i>et al.</i> 2021; Pessacg <i>et al.</i> 2015)
Global (deforestasi)	Hutan → non-hutan	Penurunan tutupan hutan meningkatkan <i>water yield</i> akibat berkurangnya evapotranspirasi	(Xu <i>et al.</i> 2022; Yu <i>et al.</i> 2025)

Catatan: Sintesis disusun berdasarkan 43 studi yang tercantum dalam Tabel S1.

Tabel 10. Sintesis Hubungan LULC dan *Water yield* Berdasarkan Literatur

Kondisi LULC	Mekanisme Hidrologi	Dampak terhadap <i>Water yield</i>	Referensi (Corpus SLR)
Hutan lebat	Evapotranspirasi tinggi dan intersepsi kanopi	Cenderung menurunkan <i>water yield</i> akibat kehilangan air melalui ET	(Gong & Liang, 2025; Xu <i>et al.</i> 2022)
Deforestasi (hutan → non-hutan)	Penurunan evapotranspirasi dan peningkatan runoff	Meningkatkan <i>water yield</i> , terutama dalam jangka pendek	(Yu <i>et al.</i> 2025; Daneshi <i>et al.</i> 2021)
Pertanian	Evapotranspirasi moderat tergantung jenis tanaman dan pengelolaan	Dampak bervariasi, umumnya meningkatkan atau menurunkan secara moderat	(Sun <i>et al.</i> 2020; Hou <i>et al.</i> 2016)
Urban (perkotaan)	Peningkatan permukaan kedap air dan runoff	Meningkatkan <i>water yield</i> , namun berpotensi menurunkan kualitas air	(Nayak <i>et al.</i> 2026)
LULC berbasis data global (tanpa kalibrasi)	Generalisasi parameter (Kc, Z, root depth)	Output model tidak konsisten dan berpotensi bias	(Hamel & Guswa, 2015; Almeida & Cabral, 2021)

Catatan: Sintesis disusun berdasarkan 43 studi yang tercantum dalam Tabel S1.

Sintesis ini (Tabel 10) disusun berdasarkan analisis 43 studi yang tercantum dalam Tabel S1, dengan mempertimbangkan mekanisme hidrologi yang dilaporkan dalam masing-masing penelitian. Sintesis antar studi menunjukkan bahwa variasi *water yield* lebih banyak dipengaruhi oleh representasi parameter penggunaan lahan dibandingkan oleh struktur model itu sendiri, sehingga akurasi model InVEST sangat bergantung pada kualitas parameterisasi LULC dan validasi lokal.

Hubungan antara LULC dan *water yield* dimediasi oleh proses hidrologi utama, yaitu

evapotranspirasi, infiltrasi, dan runoff. Studi-studi dalam corpus menunjukkan bahwa evapotranspirasi merupakan mekanisme dominan yang menjelaskan perbedaan *water yield* antar tipe penggunaan lahan (Hamel & Guswa, 2015; Pessacg *et al.* 2015). Pada sistem vegetasi seperti hutan dan pertanian, evapotranspirasi berperan sebagai komponen utama yang mengurangi volume air yang tersedia sebagai *water yield*.

Di sisi lain, pada wilayah urban dengan permukaan kedap air yang tinggi, infiltrasi berkurang dan runoff meningkat, sehingga menghasilkan *water yield* yang lebih tinggi

secara kuantitatif (Nayak & Shukla, 2026). Namun demikian, peningkatan ini seringkali disertai dengan penurunan kualitas air, yang menunjukkan adanya trade-off antara kuantitas dan kualitas sumber daya air (Sun *et al.* 2020; Hou *et al.* 2016). Dengan demikian, mekanisme hidrologi tidak hanya menjelaskan hubungan langsung antara LULC dan *water yield*, tetapi juga memperlihatkan adanya interaksi kompleks antara komponen biofisik dalam sistem DAS.

Tabel 10 menunjukkan bahwa dampak LULC terhadap *water yield* tidak bersifat seragam, melainkan sangat bergantung pada kondisi biofisik dan iklim setempat. Pada lahan pertanian, misalnya, dampak terhadap *water yield* bersifat moderat dan bervariasi tergantung pada jenis tanaman, praktik pengelolaan, serta kondisi tanah (Sun *et al.* 2020; Hou *et al.* 2016). Selain itu, studi lintas wilayah menunjukkan bahwa respons *water yield* terhadap perubahan LULC juga dipengaruhi oleh faktor iklim, terutama curah hujan (Goyal & Khan, 2017; Banerjee *et al.* 2025). Pada wilayah dengan curah hujan tinggi, pengaruh perubahan LULC cenderung lebih kecil dibandingkan faktor iklim, sedangkan pada wilayah dengan curah hujan rendah, pengaruh LULC menjadi lebih signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara LULC dan *water yield* bersifat kontekstual dan tidak dapat digeneralisasi secara sederhana, sehingga memerlukan pendekatan analisis yang mempertimbangkan interaksi antara faktor iklim, tanah, dan vegetasi.

Peran Parameterisasi LULC dalam Variasi Hasil Antar Studi

Salah satu temuan penting dari Tabel 10 adalah bahwa variasi hasil antar studi tidak hanya disebabkan oleh perbedaan kondisi lingkungan, tetapi juga oleh perbedaan parameterisasi LULC yang digunakan. Parameter seperti Kc, root depth, dan parameter Z menunjukkan variasi yang signifikan antar studi, yang pada akhirnya mempengaruhi estimasi evapotranspirasi dan *water yield* (Hamel & Guswa, 2015; Redhead *et al.* 2016). Penggunaan data global tanpa kalibrasi lokal juga memperbesar ketidakpastian hasil, karena parameter yang digunakan tidak selalu sesuai dengan kondisi biofisik setempat (Almeida & Cabral, 2021; Aneseyee *et al.* 2022). Kondisi ini menyebabkan munculnya variasi hasil yang cukup besar antar studi, meskipun menggunakan model yang sama. Dengan demikian,

parameterisasi LULC dapat dipandang sebagai faktor kunci yang menentukan konsistensi dan reliabilitas output model InVEST *water yield*.

Heterogenitas Geografis dalam Sintesis Model InVEST Water Yield

Salah satu aspek penting yang muncul dari hasil sintesis adalah adanya heterogenitas geografis antar studi yang dianalisis. Meskipun penelitian ini berfokus pada DAS tropis, sebagian studi dalam corpus berasal dari wilayah non-tropis seperti Eropa dan wilayah temperate lainnya, yang memiliki karakteristik iklim, vegetasi, dan proses hidrologi yang berbeda secara fundamental. Perbedaan ini terutama terlihat pada pola curah hujan, musim kering-basah, serta dinamika evapotranspirasi yang lebih stabil pada wilayah temperate dibandingkan wilayah tropis yang memiliki variabilitas tinggi.

Pada DAS tropis, curah hujan yang tinggi dan intensitas hujan ekstrem menyebabkan proses hidrologi didominasi oleh evapotranspirasi dan infiltrasi yang kompleks, sehingga sensitivitas terhadap parameter penggunaan lahan menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, pada wilayah temperate, distribusi curah hujan yang lebih merata dan kondisi vegetasi yang lebih homogen cenderung menghasilkan respons hidrologi yang lebih stabil, sehingga variasi parameter LULC tidak selalu memberikan dampak yang sama terhadap *water yield*.

Kondisi ini menunjukkan bahwa hasil pemodelan InVEST tidak dapat digeneralisasi secara langsung antar zona iklim tanpa mempertimbangkan konteks biofisik masing-masing wilayah. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, studi dari wilayah non-tropis digunakan sebagai referensi konseptual untuk memahami variasi pendekatan parameterisasi, namun interpretasi utama tetap difokuskan pada studi yang merepresentasikan kondisi DAS tropis. Dengan demikian, klaim terkait karakteristik *water yield* dan ketidakpastian parameter dalam penelitian ini lebih relevan untuk wilayah tropis, dan tidak dimaksudkan sebagai generalisasi universal untuk seluruh kondisi hidrologi global

Implikasi Sintesis terhadap Pemodelan dan Pengambilan Keputusan

Sintesis pada Tabel 9 dan Tabel 10 menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan memiliki implikasi yang signifikan

terhadap estimasi *water yield*, baik dari sisi kuantitas maupun distribusi spasial. Namun demikian, ketergantungan pada parameter global dan keterbatasan validasi menyebabkan hasil model perlu diinterpretasikan secara hati-hati (Aneseyee *et al.* 2022; Goyal & Khan, 2017). Dalam konteks pengelolaan DAS tropis, hasil ini menegaskan pentingnya penggunaan parameter yang disesuaikan dengan kondisi lokal, serta perlunya integrasi data observasi untuk meningkatkan akurasi model. Selain itu, pemahaman terhadap mekanisme hidrologi yang mendasari hubungan antara LULC dan *water yield* menjadi kunci dalam merumuskan kebijakan pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Oleh karena itu, sintesis ini tidak hanya memberikan gambaran umum tentang hubungan LULC dan *water yield*, tetapi juga menekankan pentingnya pendekatan yang lebih adaptif dan berbasis kondisi lokal dalam pemodelan jasa ekosistem. Temuan ini secara konsisten didukung oleh mayoritas studi dalam corpus ($n = 43$; Tabel S1), yang menunjukkan bahwa parameterisasi LULC merupakan sumber utama variasi hasil model

Keterbatasan Model Budyko dalam InVEST Water Yield

Keterbatasan mendasar dari model InVEST *water yield* juga terletak pada penggunaan kerangka Budyko yang mengasumsikan kondisi hidrologi stasioner, sehingga tidak mampu menangkap dinamika temporal seperti variasi musiman maupun perubahan antar tahun. Dalam formulasi Budyko, keseimbangan antara presipitasi dan evapotranspirasi direpresentasikan dalam kondisi rata-rata jangka panjang, yang mengabaikan fluktuasi curah hujan intensitas tinggi, periode kering, serta kejadian ekstrem yang umum terjadi di DAS tropis.

Akibatnya, model cenderung menyederhanakan respons hidrologi menjadi hubungan statis antara input iklim dan karakteristik lahan, tanpa mempertimbangkan proses transien seperti perubahan kelembapan tanah, aliran permukaan sesaat, dan respons hidrologi pasca hujan. Keterbatasan ini menjadi semakin signifikan ketika dikombinasikan dengan variasi parameter LULC yang tinggi, karena ketidakpastian parameter tidak hanya berasal dari nilai input, tetapi juga dari ketidakmampuan model dalam merepresentasikan dinamika proses hidrologi

secara temporal. Oleh karena itu, meskipun model InVEST efektif untuk analisis spasial berbasis skenario dan perbandingan relatif antar penggunaan lahan, hasilnya perlu diinterpretasikan secara hati-hati dalam konteks prediksi kuantitatif jangka pendek atau evaluasi kejadian ekstrem. Keterbatasan ini menegaskan bahwa penggunaan model berbasis Budyko lebih tepat untuk analisis makro dan jangka panjang, serta perlu dilengkapi dengan model hidrologi berbasis proses apabila diperlukan representasi dinamika temporal yang lebih akurat.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan antara penggunaan lahan (LULC) dan *water yield* dalam model InVEST dikendalikan oleh interaksi kompleks antara faktor iklim, kondisi biofisik, dan parameterisasi model. Faktor iklim, khususnya curah hujan, berperan sebagai pengendali utama (*driver*), sementara LULC berfungsi sebagai faktor pengatur (*modifier*) yang mempengaruhi distribusi spasial air melalui mekanisme evapotranspirasi dan infiltrasi. Hasil sintesis dari 43 studi menunjukkan bahwa perubahan LULC seperti deforestasi, urbanisasi, dan konversi lahan secara konsisten mempengaruhi *water yield*, namun besarnya dampak sangat bergantung pada konteks biofisik dan iklim setempat. Mekanisme hidrologi, terutama evapotranspirasi, menjadi faktor kunci yang menjelaskan variasi tersebut. Temuan utama penelitian ini menegaskan bahwa parameterisasi LULC merupakan sumber utama ketidakpastian dalam model InVEST *water yield*. Variasi parameter seperti K_c , *root depth*, PAWC, dan parameter Z antar studi, serta ketergantungan pada data global tanpa kalibrasi lokal, menyebabkan perbedaan signifikan dalam hasil model. Ketidakpastian ini tidak hanya terjadi pada tahap input, tetapi juga terpropagasi melalui proses hidrologi sehingga mempengaruhi estimasi *water yield* secara keseluruhan. Selain itu, keterbatasan praktik validasi model pada sebagian besar studi menunjukkan bahwa reliabilitas output masih perlu ditingkatkan, terutama melalui penggunaan data observasi yang lebih representatif.

Secara konseptual, penelitian ini memberikan kontribusi dengan menegaskan

bahwa parameterisasi LULC merupakan titik kritis dalam model InVEST. Namun, perlu diakui bahwa dari 43 studi yang dianalisis, tidak seluruhnya berlokasi di wilayah tropis; sekitar 30% di antaranya berasal dari wilayah temperate dan arid (seperti DAS Heihe, Weihe, dan Loess Plateau di Tiongkok, serta beberapa wilayah Eropa). Studi-studi dari zona non-tropis tersebut digunakan secara terbatas sebagai pembanding konseptual untuk memahami variasi pendekatan parameterisasi dan mekanisme hidrologi secara global, bukan sebagai dasar utama dalam generalisasi kuantitatif water yield untuk DAS tropis. Dengan demikian, temuan utama mengenai tingginya ketidakpastian parameter LULC dan dominasi pengaruh curah hujan terhadap water yield terbukti konsisten di semua zona iklim, namun rekomendasi teknis dan nilai parameter yang disarankan dalam penelitian ini lebih relevan dan diprioritaskan untuk diterapkan pada wilayah dengan karakteristik biofisik yang sebanding dengan DAS tropis (curah hujan tinggi, suhu hangat sepanjang tahun, dan heterogenitas vegetasi kompleks).

REKOMENDASI

Untuk menjawab kebutuhan solusi teknis yang aplikatif, penelitian ini merekomendasikan empat langkah operasional bagi pemodel di DAS tropis dalam mengurangi ketidakpastian model InVEST:

1. Penyusunan *Look-up Table* Parameter Lokal: Alih-alih mengadopsi nilai Kc dan *root depth* dari FAO secara langsung, pemodel disarankan untuk menyusun tabel parameter berbasis data penginderaan jauh.
2. Kalibrasi Parameter Z menggunakan Data Debit Historis: Parameter Z yang sangat sensitif sebaiknya tidak ditetapkan secara arbitrer. Pemodel diwajibkan melakukan *trial-and-error* atau pendekatan kalibrasi otomatis dengan membandingkan output water yield terhadap data debit aktual dari setidaknya 1–2 stasiun pengukuran (AWLR) untuk mendapatkan nilai Z yang representatif terhadap musim hujan dan kemarau di DAS tropis.
3. Adopsi Analisis Propagasi Ketidakpastian (Monte Carlo): Untuk setiap skenario LULC, disarankan melakukan simulasi Monte Carlo dengan memvariasikan parameter Kc dan Z dalam rentang $\pm 20\%$ untuk mengkuantifikasi

rentang kepercayaan (*confidence interval*) estimasi water yield, sehingga hasil pemodelan tidak disajikan sebagai angka tunggal melainkan sebagai rentang probabilistik.

4. Integrasi Data Evapotranspirasi Aktual (ETA) Satelit: Untuk mengatasi keterbatasan validasi, pemodel dapat memanfaatkan data ETA dari produk satelit seperti MOD16, SSEBop, atau GLDAS sebagai pembanding antara nilai AET hasil model dengan kondisi aktual di lapangan, terutama pada DAS tropis yang minim data debit.

DAFTAR PUSTAKA

- Almeida, B., & Cabral, P. (2021). Water yield modelling, sensitivity analysis and validation: A study for Portugal. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 494. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080494>
- Aneseyee, A. B., Soromessa, T., Elias, E., Noszczyk, T., & Feyisa, G. L. (2022). Evaluation of water provision ecosystem services associated with land use/cover and climate variability in the Winike watershed, Omo Gibe Basin of Ethiopia. *Environmental Management*, 69(2), 367-383. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01573-9>
- Anjinho, P. da S., Barbosa, M. A. G. A., & Mauad, F. F. (2022). Evaluation of InVEST's water ecosystem service models in a Brazilian subtropical basin. *Water*, 14(10), 1559. <https://doi.org/10.3390/w14101559>
- Banerjee, S., Loc, H. H., Pal, I., Mukhopadhyay, A., Pham Huynh, T. V., Pham, D. T., & Nguyen Thi, H. C. (2025). Assessing the sensitivity of physiographical parameters in modeling hydrological ecosystem services that support food security: The case of Vietnamese Mekong Delta. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(4), 239. <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02405-z>
- Bennett, E. M., Peterson, G. D., & Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12(12), 1394-1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>

- Carrasco-Valencia, L., Vilca-Campana, K., Iruri-Ramos, C., Cárdenas-Pillco, B., Ollero, A., & Chanove-Manrique, A. (2024). Effect of LULC changes on annual water yield in the urban section of the Chili River, Arequipa, using the InVEST model. *Water*, 16(5), 664. <https://doi.org/10.3390/w16050664>
- Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., & Maghsood, F. F. (2021). Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology*, 593, 125621. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621>
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2012). On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3681-3691. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3681-2012>
- Geng, X., Wang, X., Yan, H., Zhang, Q., & Jin, G. (2015). Land use/land cover change induced impacts on water supply service in the upper reach of Heihe River Basin. *Sustainability*, 7(1), 366-383. <https://doi.org/10.3390/su7010366>
- Gong, L., & Liang, K. (2025). Assessing the climate and land use impacts on water yield in the Upper Yellow River Basin: A forest-urbanizing ecological hotspot. *Forests*, 16(8), 1304. <https://doi.org/10.3390/f16081304>
- Goyal, M. K., & Khan, M. (2017). Assessment of spatially explicit annual water-balance model for Sutlej River Basin in eastern Himalayas and Tungabhadra River Basin in peninsular India. *Hydrology Research*, 48(2), 542-558. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.053>
- Haddaway, N. R., Collins, A. M., Coughlin, D., & Kirk, S. (2015). The role of Google Scholar in evidence reviews and its applicability to grey literature searching. *PLOS ONE*, 10(9), e0138237. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138237>
- Hamel, P., & Guswa, A. J. (2015). Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: Case study of the Cape Fear basin, North Carolina. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 839-853. <https://doi.org/10.5194/hess-19-839-2015>
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Hou, Y., Li, B., Müller, F., & Chen, W. (2016). Ecosystem services of human-dominated watersheds and land use influences: A case study from the Dianchi Lake watershed in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(12), 652. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5629-0>
- Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D., & Knoke, T. (2018). Scenario modelling of ecosystem service changes in the Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. *Science of the Total Environment*, 622-623, 534-546. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.340>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University and Durham University.
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- Locatelli, B., Catterall, C. P., Imbach, P., Kumar, C., Lasco, R., Marín-Spiotta, E., Mercer, B., Powers, J. S., Schwartz, N., & Uriarte, M. (2015). Tropical reforestation and climate change: Beyond carbon. *Restoration Ecology*, 23(4), 337-343. <https://doi.org/10.1111/rec.12209>

- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Nayak, D., & Shukla, A. K. (2026). Assessing ecosystem service trade-offs and synergies in the rapidly urbanizing coastal region of Mangaluru Agglomeration, India. *PLOS ONE*, 21(3), e0344106. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0344106>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pessacq, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S., & Pascual, M. (2015). Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of the Total Environment*, 537, 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.148>
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470754887>
- Popay, J., Roberts, H., Sowden, A., Petticrew, M., Arai, L., Rodgers, M., Britten, N., Roen, K., & Duffy, S. (2006). *Guidance on the conduct of narrative synthesis in systematic reviews: A product from the ESRC Methods Programme*. Lancaster University.
- Pullin, A. S., & Stewart, G. B. (2006). Guidelines for systematic review in conservation and environmental management. *Conservation Biology*, 20(6), 1647-1656. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00485.x>
- Redhead, J. W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., Oliver, T. H., & Bullock, J. M. (2016). Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment*, 569-570, 1418-1426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.227>
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C. K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandley, L., Hamel, P., Vogl, A. L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D., & Douglass, J. (2020). *InVEST 3.8.0 user's guide*. The Natural Capital Project.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Sun, X., Shan, R., & Liu, F. (2020). Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122338>
- Suryanta, J., Nahib, I., Ramadhani, F., Rifaie, F., Suwedi, N., Karolinoerita, V., Cahyana, D., Amhar, F., & Suprajaka. (2024). Modelling and dynamic water analysis for the ecosystem service in the Central Citarum watershed, Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 60, 122-137. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.149114>
- Vigerstol, K. L., & Aukema, J. E. (2011). A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2403-2409. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.040>
- Wu, C., Qiu, D., Gao, P., Mu, X., & Zhao, G. (2022). Application of the InVEST model for assessing water yield and its response to precipitation and land use in the Weihe River Basin, China. *Journal of Arid Land*,

- 14(4), 426-440.
<https://doi.org/10.1007/s40333-022-0013-0>
- Xu, C., Jiang, Y., Su, Z., Liu, Y., & Lyu, J. (2022). Assessing the impacts of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in Jinghe River basin, China. *Ecological Indicators*, 137, 108757. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108757>
- Yu, H., Zhang, B., He, Q., & Xiao, H. (2025). Primary determinants of water yield services in arid NW China: An empirical analysis of Gansu Province. *PLOS ONE*, 20(8), e0329580. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329580>
- Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 40(2), W02502. <https://doi.org/10.1029/2003WR002710>

Lampiran:

Tabel S1. Daftar Studi yang Diikutsertakan dalam Tinjauan Sistematis (n = 43)

Penulis	Judul artikel	Nama Jurnal	DOI
Alireza Daneshi, Roy Brouwer, Ali Najafinejad, Mostafa Panahi, Ardavan Zareandian, Fatemeh Fadia Maghsood	Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST	Journal of Hydrology	10.1016/j.jhydrol.2020.125621
Dong Yang, Wen Liu, Lingying Tang, Le Chen, Xuezhong Li, Xianli Xu	Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China Applicability of the InVEST model	Landscape and Urban Planning	10.1016/j.landurbplan.2018.10.011
Shiliang Liu, Yijie Yin, Xuehua Liu, Fangyan Cheng, Juejie Yang, Junran Li, Shikui Dong, Annah Zhu	Ecosystem Services and landscape change associated with plantation expansion in a tropical rainforest region of Southwest China	Ecological Modelling	10.1016/j.ecolmo del.2016.03.009
Elham Rafiei-Sardooi, Ali Azareh, Sharif Joorabian Shoostari, Eric J.R. Parteli	Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran	Ecological Modelling	10.1016/j.ecolmo del.2022.109934
Chao Xu, Yanan Jiang, Zhenhui Su, Yujun Liu, Jingyu Lyu	Assessing the impacts of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in Jinghe River basin, China	Ecological Indicators	10.1016/j.ecolind.2022.108757
Che Lu, Guo Sidai, Li Yangli	Discerning changes and drivers of <i>water yield</i> ecosystem service: A case study of Chongqing-Chengdu District, Southwest China	Ecological Indicators	10.1016/j.ecolind.2024.111767
Jingxuan Ma, Xiaomei Jin, Xiulan Yin, Pengfei Liu, Zhenlong Nie	A new InVEST–genetic algorithm coupled <i>water yield</i> model: Application to water conservation function assessment in the Zhangjiakou-Chengde area	Ecological Indicators	10.1016/j.ecolind.2025.114237
Diksha Verma, Vishavjit Kumar, Anoop Kumar Shukla, Rajiv Pandey	Water provisioning services under changing land use and climate scenarios in the lower Shivaliks of Uttarakhand, India	Ecological Indicators	10.1016/j.ecolind.2025.114334
Lin Wu, Zewen Fu, Yabo Huang, Zhengwei Guo, Ning Li	An ecological assessment model of water retention based on regional differences in characteristic using remote sensing data	Ain Shams Engineering Journal	10.1016/j.asej.2025.103785
Jiaqi Li, Bei Wang, Juntao Zhong, Jia Xu, Peijun Sun	Uncertainty analysis and parameter optimization enhance assessment accuracy in <i>water yield</i> modelling	Journal of Hydrology: Regional Studies	10.1016/j.ejrh.2025.103011
Bahman Veisi Nabikandi, Farzin Shahbazi, Faeze Shoja, Alessio Russo	An integrated scenario-based approach for evaluating <i>water yield</i> responses to land use and climate change	Environmental and Sustainability Indicators	10.1016/j.indic.2025.100919
Jaka Suryanta, Irmadi Nahib, Fadhlullah Ramadhani, Farid Rifaie, Nawa Suwedi, Vicca Karolinoerita, Destika Cahyana, Fahmi Amhar, Suprajaka	Modelling and dynamic water analysis for the ecosystem service in the Central Citarum watershed, Indonesia	Journal of Water and Land Development	10.24425/jwld.2024.149114
Guanyu Jia, Wenmin Hu, Bin Zhang, Guo Li, Shouyun Shen, Zhihai Gao, Yi Li	Assessing impacts of the Ecological Retreat project on water conservation in the Yellow River Basin	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2022.154483

Penulis	Judul artikel	Nama Jurnal	DOI
Xiaozhen Wang, Jianzhao Wu, Yulin Liu, Xuying Hai, Zhouping Shanguan, Lei Deng	Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau	Journal of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2022.114835
Lei Wu, Yongkun Luo, Shijie Pang, Guoshuai Wang, Xiaoyi Ma	Factor analysis of hydrologic services in water-controlled grassland ecosystems by InVEST model and geodetector	Environmental Science and Pollution Research	10.1007/s11356-024-32383-1#citeas
Umar Basha, Manish Pandey, Deeksha Nayak, Satyavati Shukla, Anoop Kumar Shukla	Spatial–Temporal Assessment of Annual <i>Water yield</i> and Impact of Land Use Changes on Upper Ganga Basin, India, Using InVEST Model	Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste	10.1061/JHTRBP.HZENG-1245
Zuqiao Gao, Xiaolei Ju, Junyu Ding, Yifei Wang, Na Shen, Xuyang Zhang, Meijing Li	Understanding <i>water yield</i> dynamics and drivers in the Yellow River Basin: past trends, mechanisms, and future projections	Journal of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2025.145441
Guiyun Song, Tianxing Wei, Qingke Zhu, Huaxing Bi, Jilong Qiu, Junkai Zhang	Spatiotemporal Dynamics and Trade-Off Analysis of Ecosystem Services in the Caijiachuan Watershed of the Loess Plateau	Agronomy	10.3390/agronomy15071707
Yao Pan, Yunhe Yin	Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Water Conservation in the Three-Rivers Headwater Region and the Driving Factors over the Past 30 Years	Atmosphere	10.3390/atmos14091453
Li Gong, Kang Liang	Assessing the Climate and Land Use Impacts on <i>Water yield</i> in the Upper Yellow River Basin: A Forest-Urbanizing Ecological Hotspot	Forests	10.3390/f16081304
Anoop Kumar Shukla, Shray Pathak, Lalit Pal, Chandra Shekhar Prasad Ojha, Ana Mijic, Rahul Dev Garg	Spatio-temporal assessment of annual water balance models for upper Ganga Basin	Hydrology and Earth System Sciences	10.5194/hess-22-5357-2018
Ying Hou, Bo Li, Felix Müller, Weiping Chen	Ecosystem services of human-dominated watersheds and land use influences: a case study from the Dianchi Lake watershed in China	Environmental Monitoring and Assessment	10.1007/s10661-016-5629-0
Le Yin, Shumin Zhang, Baolei Zhang	Do Ecological Restoration Projects Improve Water-Related Ecosystem Services? Evidence from a Study in the Hengduan Mountain Region	International Journal of Environmental Research and Public Health	10.3390/ijerph19073860
Bruna Almeida, Pedro Cabral	<i>Water yield</i> Modelling, Sensitivity Analysis and Validation: A Study for Portugal	ISPRS International Journal of Geo-Information	10.3390/ijgi10080494
Hui Yu, Bo Zhang, Qianqian He, Hou Xiao	Primary determinants of <i>water yield</i> services in arid NW China: An empirical analysis of Gansu Province	PLoS One	10.1371/journal.pone.0329580
Deeksha Nayak, Anoop Kumar Shukla	Assessing ecosystem service trade-offs and synergies in the rapidly urbanizing coastal region of Mangaluru Agglomeration, India	PLoS One	10.1371/journal.pone.0344106

Penulis	Judul artikel	Nama Jurnal	DOI
Yanqing Lang, Wei Song, Ying Zhang	Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China	Physics and Chemistry of the Earth	10.1016/j.pce.2017.06.003
Li Feng, Li Yaoming, Zhou Xuewen, Yin Zun, Liu Tie, Xin Qinchuan	Modeling and analyzing supply-demand relationships of water resources in Xinjiang from a perspective of ecosystem services	Journal of Arid Land	10.1007/s40333-022-0059-z
Manish Kumar Goyal, Manas Khan	Assessment of spatially explicit annual water-balance model for Sutlej River Basin in eastern Himalayas and Tungabhadra River Basin in peninsular India	Hydrology Research	10.2166/nh.2016.053
Natalia Pessacg, Silvia Flaherty, Laura Brandizi, Silvina Solman, Miguel Pascual	Getting water right: A case study in <i>water yield</i> modelling based on precipitation data	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2015.07.148
Leila Rahimi, Bahram Malekmohammadi, Ahmad Reza Yavari	Assessing and Modeling the Impacts of Wetland Land Cover Changes on Water Provision and Habitat Quality Ecosystem Services	Natural Resources Research	10.1007/s11053-020-09667-7
Chengjian Liu, Lei Zou, Jun Xia, Xinchu Chen, Lingfeng Zuo, Jiarui Yu	Spatiotemporal Heterogeneity of Water Conservation Function and Its Driving Factors in the Upper Yangtze River Basin	Remote Sensing	10.3390/rs15215246
Abreham Berta Aneseyee, Teshome Soromessa, Eyasu Elias, Tomasz Noszczyk, Gudina Legese Feyisa	Evaluation of Water Provision Ecosystem Services Associated with Land Use/Cover and Climate Variability in the Winike Watershed, Omo Gibe Basin of Ethiopia	Environmental Management	10.1007/s00267-021-01573-9
Sreejita Banerjee, Ho Hu Loc, Indrajit Pal, Anirban Mukhopadhyay, Thanh Van Pham Huynh, Duy Tien Pham, Hong Cam Nguyen Thi	Assessing the sensitivity of physiographical parameters in modeling hydrological ecosystem services that support food security: The case of Vietnamese Mekong Delta	Modeling Earth Systems and Environment	10.1007/s40808-025-02405-z
Jyoti Prakash Hati, Anirban Mukhopadhyay, Rituparna Acharyya, Halina Kaczmarek	A modelling approach to assess the impacts of climate dynamics and anthropogenic pressure on <i>water yield</i> in the Damodar River basin	Scientific Reports	10.1038/s41598-025-29098-9
Xiaoyin Sun, Ruifeng Shan, Fei Liu	Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins	Journal of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2020.122338
Xiaoli Geng, Xinsheng Wang, Haiming Yan, Qian Zhang, Gui Jin	Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau	Sustainability	10.3390/su7010366
Sunsanee Arunyawat, Rajendra P. Shrestha	Assessing Land Use Change and Its Impact on Ecosystem Services in Northern Thailand	Sustainability	10.3390/su8080768
Phelipe da Silva Anjinho, Mariana Abibi Guimarães Araujo Barbosa, Frederico Fábio Mauad	Evaluation of InVEST's Water Ecosystem Service Models in a Brazilian Subtropical Basin	Water	10.3390/w14101559
Rukeya Reheman, Alimujiang Kasimu, Xilinayi Duolaiti, Bohao Wei, Yongyu Zhao	Research on the Change in Prediction of Water Production in Urban Agglomerations on the Northern Slopes of the Tianshan Mountains Based on the InVEST-PLUS Model	Water	10.3390/w15040776

Penulis	Judul artikel	Nama Jurnal	DOI
Lorenzo Carrasco-Valencia, Karla Vilca-Campana, Carla Iruri-Ramos, Berly Cárdenas-Pillco, Alfredo Ollero, Andrea Chanove-Manrique	Effect of LULC Changes on Annual <i>Water yield</i> in the Urban Section of the Chili River, Arequipa, Using the InVEST Model	Water	10.3390/w16050664
Ye Inn Kim, Bernie Engel, Won Seok Jang, Young Jo Yun	Evaluating Wildfire-Induced Changes in a Water-Yield Ecosystem Service at the Local Scale Using the InVEST Model	Water	10.3390/w17091260
WU Changxue, QIU Dexun, GAO Peng, MU Xingmin, ZHAO Guangju	Application of the InVEST model for assessing <i>water yield</i> and its response to precipitation and land use in the Weihe River Basin, China	J Arid Land	10.1007/s40333-022-0013-0