

WATER RESILIENCE ASSESSMENT DI HULU DAS BATANG ARAU: ANALISIS KESEIMBANGAN SUPPLY – DEMAND BERBASIS PEMODELAN SWAT

Water Resilience Assessment in the Upstream of Batang Arau Watershed: Supply - Demand Balance Analysis Based on SWAT Modeling

Eri Stiyanto^{1*}, Fadli Irsyad², Rusnam², Deni Saputra³, Salma Tri Maharani⁴, Febriani Guchi⁴

¹ Teknik Perencanaan Irigasi dan Rawa, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Padang

² Teknik Pertanian dan Biosistem, Teknologi Pertanian, Universitas Andalas

³ Teknik Pertanian, Pertanian, Universitas Sriwijaya

⁴ Mahasiswa Teknik Pertanian dan Biosistem, Teknologi Pertanian, Universitas Andalas

Email: eristiyanto@pnp.ac.id

ABSTRAK

Perubahan iklim dan aktivitas antropogenik menyebabkan tekanan signifikan terhadap sumber daya air, mempengaruhi keseimbangan ketersediaan dan kebutuhan air di berbagai daerah aliran sungai. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi ketahanan sumber daya air (*water resilience*) di hulu DAS Batang Arau, Kota Padang dengan menggunakan pendekatan terpadu berbasis pemodelan hidrologi SWAT dan analisis *Reliability, Resilience, Vulnerability* (RRV). Metode penelitian meliputi: (1) karakterisasi morfometri DAS dengan menganalisis 19 parameter morfometri; (2) pemodelan SWAT dengan kalibrasi-validasi yang menghasilkan nilai performa bervariasi ($R^2 = 0,54-0,97$) dan sangat baik (NSE = 0,79-0,89); (3) analisis keseimbangan *supply-demand*; serta (4) evaluasi ketahanan air dengan pendekatan RRV. Hasil analisis morfometri menunjukkan DAS memiliki bentuk memanjang (Form Factor 0,25) dengan kerapatan drainase sedang (1,40 km/km²). Pemodelan SWAT menghasilkan debit andalan Q80 sebesar 1,51 m³/s yang masih mencukupi total kebutuhan air 0,63 m³/s (domestik 0,0234 m³/s; pertanian 0,4252 m³/s; industri 0,1811 m³/s), dengan *Water Availability Ratio* (WAR) 1,427. Analisis RRV menghasilkan Indeks Keberlanjutan DAS (IKDAS) sebesar 0,85 (sangat baik), didukung oleh keandalan tinggi (1,0), ketahanan baik (0,84) dengan tutupan hutan 87,9%, namun masih menghadapi kerentanan signifikan (0,65) terutama akibat tingkat erosi tinggi (385,6 ton/ha/tahun) dan area rawan banjir (34,63%). Rekomendasi pengelolaan meliputi teknik konservasi tanah-air, sistem peringatan dini banjir, perluasan zona riparian, dan penguatan kelembagaan pengelolaan kolaboratif untuk mengintegrasikan kepentingan berbagai pemangku kepentingan. Pendekatan RRV terbukti efektif untuk evaluasi komprehensif kondisi DAS dan perumusan prioritas intervensi strategis. Kata kunci— Water Resilience; SWAT; Supply-Demand; RRV; DAS Batang Arau

ABSTRACT

Climate change and anthropogenic activities have caused significant pressure on water resources, affecting the balance between availability and demand in watersheds. This research evaluates water resilience in the upstream area of the Batang Arau watershed, Padang City, using SWAT hydrological modeling and *Reliability, Resilience, Vulnerability* (RRV) analysis. Methods include: (1) watershed morphometric characterization analyzing 19 parameters; (2) SWAT modeling with calibration-validation ($R^2 = 0.54-0.97$, NSE = 0.79-0.89); (3) supply-demand balance analysis; and (4) water resilience evaluation using RRV. Morphometric analysis shows the watershed has an elongated shape (Form Factor 0.25) with moderate drainage density (1.40 km/km²). SWAT modeling produced a dependable flow (Q80) of 1.51 m³/s, sufficient for the total water demand of 0.63 m³/s (domestic 0.0234 m³/s; agriculture 0.4252 m³/s; industry 0.1811 m³/s), with a *Water Availability Ratio* of 1.427. The RRV analysis resulted in a Watershed Sustainability Index of 0.85 (very good), supported by high reliability (1.0) and good resilience (0.84) with 87.9% forest cover, but facing vulnerability (0.65) due to high erosion rates (385.6 tons/ha/year) and flood-prone areas (34.63%). Management recommendations include soil and water conservation techniques, flood early warning systems, riparian zone expansion, and strengthening collaborative management institutions. The RRV approach has proven effective for comprehensive evaluation of watershed conditions and formulation of strategic intervention priorities to enhance water resource sustainability in the face of increasing climate and anthropogenic pressures. Keywords— Water Resilience; SWAT; Supply-Demand; RRV; Batang Arau Watershed

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global dan aktivitas antropogenik telah mengakibatkan tekanan yang signifikan terhadap sumber daya air di berbagai belahan dunia (Basuki et al., 2022; Heryani et al., 2022; IPCC, 2023; Nobre et al., 2016; Pawitan, 2018). Pola curah hujan yang semakin tidak menentu, peningkatan frekuensi kejadian ekstrem, dan degradasi lingkungan hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) menyebabkan kerentanan pada sistem penyediaan air yang menjadi penopang berbagai kebutuhan masyarakat (Konapala et al., 2020; UNESCO, 2023). Dalam kondisi ketidakpastian tersebut, konsep ketahanan air (*water resilience*) muncul sebagai paradigma baru yang menekankan kemampuan sistem sumber daya air untuk bertahan dan beradaptasi terhadap berbagai gangguan, sekaligus mempertahankan fungsi ekologis dan sosio-ekonominya (Boltz et al., 2019; Falkenmark et al., 2019; Li et al., 2024).

Di Indonesia, permasalahan ketahanan air semakin kompleks dengan berbagai kepentingan yang saling berkompetisi untuk mendapatkan akses terhadap sumber daya air yang sama (Asdak et al., 2023; Kurniawan et al., 2024). Sebagian besar DAS di Indonesia mengalami penurunan debit andalan sebagai akibat dari perubahan tutupan lahan, intensifikasi pertanian, dan pertumbuhan perkotaan (Astuti et al., 2019; Ridwansyah et al., 2020, 2023; Yuono et al., 2020). Indonesia memiliki kelemahan yang signifikan dalam perencanaan sumber daya air karena analisis *supply-demand* air seringkali mengabaikan proyeksi jangka panjang dan variabilitas iklim (Poerbandono et al., 2014; Remondi et al., 2016; Setyorini et al., 2017). Data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan menunjukkan bahwa 62% dari 458 DAS di seluruh negeri berada dalam kondisi kritis, dan jumlah bencana hidrometeorologi telah meningkat sebesar 37% dalam sepuluh tahun terakhir (Akmal, 2025). Kasus DAS Batang Arau di Sumatera Barat menjadi contoh menarik karena memiliki kompleksitas penggunaan air yang tinggi, dengan keberadaan industri besar (PT Semen Padang), permukiman penduduk, dan areal pertanian yang semuanya bergantung pada ketersediaan air dari kawasan hulu yang sama.

DAS Batang Arau memiliki luas wilayah sekitar 174,62 km² dengan panjang sungai utama 29,72 km. Secara geografis, DAS ini terletak pada 0°54' - 1°3' LS dan 100°21' - 100°34' BT (Afifa et al., 2020; Irsyad et al., 2023). Kawasan hulu DAS bagian utara ini meliputi Sub DAS Lubuk Paraku, Sub DAS Padang Besi, dan Daerah Tangkapan Air (DTA) Padayo yang memiliki peran vital sebagai daerah tangkapan air, sekaligus menjadi sumber air utama bagi PT Semen Padang dan masyarakat sekitar (Guchi, 2024; Irsyad et al., 2023; Trimaharani, 2024), dan bagian selatan adalah Sub DAS Padang Ides yang terpengaruh oleh area tambang Bukit Karang Putih. Meskipun beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan di kawasan ini seperti kajian hidrologi dan analisis kualitas air (Erniwati, 2018; Nurhamidah et al., 2018; Pertiwi & Siregar, 2018), namun belum ada penelitian komprehensif yang mengintegrasikan pemodelan hidrologi berbasis fisik dengan analisis keseimbangan *supply-demand* air untuk menilai ketahanan air jangka panjang di kawasan tersebut.

Pendekatan pemodelan menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) menawarkan kerangka analisis yang kuat untuk memprediksi dinamika hidrologi DAS dengan mempertimbangkan berbagai faktor biofisik dan antropogenik (Abbaspour et al., 2017; Sisay et al., 2017). SWAT telah berhasil diterapkan di berbagai DAS di dunia dan terbukti mampu memprediksi perubahan debit sungai akibat variasi iklim dan perubahan tutupan lahan (Bhatta et al., 2019; Kiamba et al., 2023; Rufino et al., 2023; Stiyoanto et al., 2015). Aplikasi SWAT telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti di Indonesia khususnya pulau Sumatera (Nurdin et al., 2023; Ridwansyah et al., 2023; Wardiman et al., 2020), namun aplikasinya untuk analisis ketahanan air di kawasan industri pada daerah hulu masih sangat terbatas.

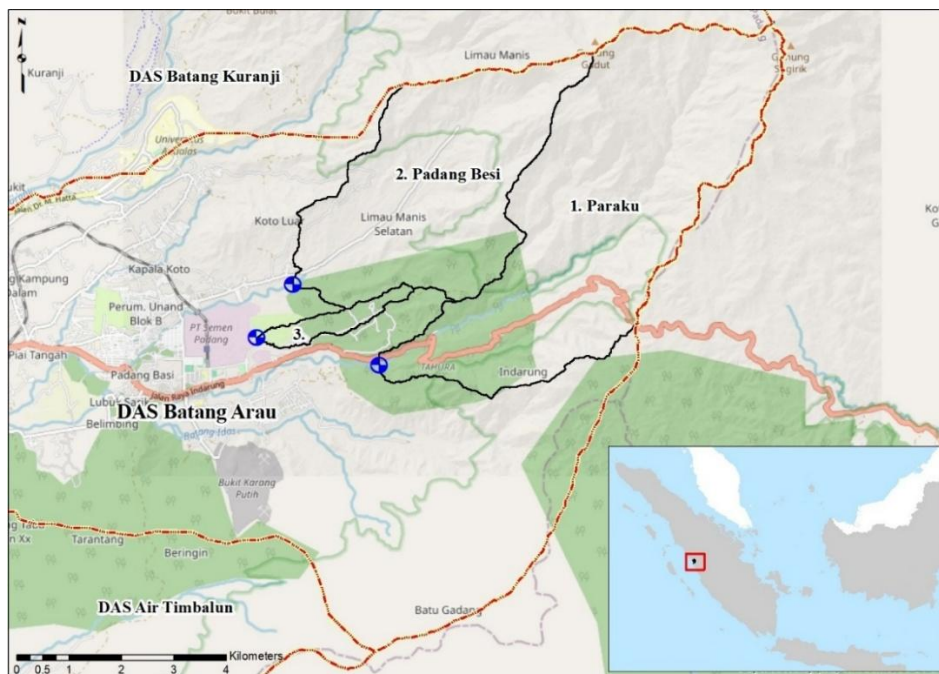
Kesenjangan penelitian terlihat jelas dalam konteks pengelolaan sumber daya air di hulu DAS Batang Arau. Pertama, meskipun terdapat studi hidrologi parsial di beberapa sub-DAS, belum ada upaya komprehensif untuk mengintegrasikan karakteristik ketiga sub-DAS utama (Lubuk Paraku, Padang Besi, dan Padayo) dalam satu kerangka pemodelan SWAT. Kedua, meskipun PT Semen Padang telah melakukan beberapa kajian internal tentang pemanfaatan air, analisis ilmiah tentang keseimbangan *supply-demand* air yang melibatkan seluruh pengguna di kawasan tersebut belum pernah dilakukan. Ketiga, proyeksi ketersediaan air jangka panjang yang mempertimbangkan perubahan iklim dan dinamika penggunaan lahan belum tersedia untuk mendukung perencanaan pengelolaan sumber daya air berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan mengatasi kesenjangan pengetahuan melalui evaluasi ketahanan sumber daya air (*water resilience*) di hulu DAS Batang Arau, Kota Padang dengan menggunakan pendekatan terpadu berbasis pemodelan hidrologi SWAT dan analisis Reliability, Resilience, Vulnerability (RRV) dengan pemodelan SWAT dan analisis keseimbangan *supply-demand*. Penelitian akan menganalisis karakteristik morfometri-hidrologi ketiga sub-DAS, mengembangkan model SWAT terkalibrasi, memproyeksikan ketersediaan air, dan merumuskan strategi peningkatan ketahanan air. Secara spesifik, penelitian ini akan menghasilkan Indeks Keberlanjutan DAS (IKDAS) berdasarkan analisis *Reliability, Resilience, dan Vulnerability* (RRV) Hasil penelitian diharapkan menjadi landasan ilmiah bagi pengelolaan sumber daya air berkelanjutan yang mengintegrasikan kepentingan industri, masyarakat, dan lingkungan di kawasan tersebut.

METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan hulu DAS Batang Arau bagian utara yang mencakup tiga sub-DAS utama: Sub DAS Lubuk Paraku (2.459,93 ha), Sub DAS Padang Besi (1.526,76 ha), dan DTA Padayo (125,85 ha). Secara geografis, kawasan penelitian terletak pada 0° 53' 33,506" - 0°57' 40,019" LS dan 100° 28' 19,014" - 100° 34' 12,061" BT, berada di wilayah administratif Kecamatan Lubuk Kilangan dan Kecamatan Pauh, Kota Padang, Sumatera Barat seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pengumpulan data lapangan dilakukan selama periode September-Oktober 2023, bertepatan dengan akhir musim kemarau hingga awal musim hujan, untuk mendapatkan variasi kondisi hidrologi yang representatif. Analisis data dan pemodelan dilaksanakan hingga Januari 2024 di Laboratorium prodi Teknik Perencanaan Irigasi dan Rawa, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Padang.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian menunjukkan tiga sub-DAS di hulu DAS Batang Arau

B. Alat dan Bahan

Penggunaan alat dalam penelitian terbagi atas *Hardware* (alat ukur) dan *Software* (pendukung proses analisis). Hardware diantaranya : Current meter untuk mendapatkan kecepatan aliran, Drone untuk pengambilan foto udara validasi tutupan lahan. Sedangkan software yang digunakan dalam penelitian diantaranya: ArcGIS versi 10 untuk semua proses analisis spasial dan penyajian data, Agisoft Metashape Profesional untuk pengolahan hasil Drone.

Bahan dalam penelitian adalah berupa data, baik data primer hasil observasi maupun data sekunder. Data primer diantaranya adalah pengukuran debit sungai untuk menilai kinerja model SWAT dan validasi tutupan lahan. Sedangkan data skunder yaitu: *Digital Elevation Model* (DEM) dengan

resolusi spasial 30 m dari DEMNAS (BIG) digunakan sebagai input dasar analisis spasial. Peta tutupan lahan diolah dari citra Landsat 8 OLI/TIRS tahun 2022 dan diklasifikasikan menjadi 6 kelas utama sesuai standar SNI 7645:2010: hutan, perkebunan, semak belukar, lahan pertanian, lahan terbangun, dan badan air. Peta jenis tanah bersumber dari Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian (BBSDLP) dengan skala 1:50.000 sesuai klasifikasi USDA Soil Taxonomy. Data iklim periode 2011-2023 mencakup curah hujan harian dan bulanan dari stasiun Ladang Padi (PSDA Prov. Sumbar), serta temperatur, kelembaban udara, radiasi matahari, dan kecepatan angin dari WPBA (Semen Padang), ditambah data validasi dari stasiun BMKG Padang. Data kependudukan Kelurahan Indarung dan Limau Manis Selatan tahun 2012-2022 diperoleh dari BPS Kota Padang untuk memproyeksikan pertumbuhan penduduk hingga 2028. Data kebutuhan air PT Semen Padang meliputi catatan historis pengambilan air dari Sungai Paraku dan Padang Besi, data konsumsi air pabrik Indarung IV, V, dan VI, serta laporan internal tentang pengelolaan sumber daya air.

C. Prosedur Penelitian

Penelitian diawali melakukan eksplorasi data sekunder dari sumber data yang dapat dipertanggung jawabkan seperti yang sudah dijelaskan pada kebutuhan bahan penelitian. Selanjutnya menyesuaikan data untuk kebutuhan permodelan SWAT, diantaranya menyesuaikan format data iklim, melakukan penyesuaian proyeksi spasial DEM, membuat peta tutupan lahan yang divalidasi dengan drone. Selanjutnya melakukan *running* model SWAT seperti yang akan dijelaskan pada analisis data pemodelan SWAT, hingga melakukan kalibrasi dan validasi model dengan debit observasi untuk mendapatkan nilai performa model. Hasil pemodelan SWAT tidak hanya debit namun karakteristik biofisik juga didapat, sehingga digunakan untuk melakukan karakteristik morfometri dan hidrologi DAS dan improvisasi teknis yang diperlukan untuk melengkapi kebutuhan karakteristik morfologi dan hidrologi DAS. Dilanjutkan melakukan analisis ketersediaan dan kebutuhan untuk mendapatkan rasio nilai yang terjadi lebih detail pada analisis data bagian ketersediaan dan kebutuhan. Dari semua parameter akan dilakukan kuantifikasi kembali terhadap nilai yang telah didapat untuk analisis RRV, sehingga didapatkan nilai Indeks Keberlanjutan DAS (IKDAS) untuk dilanjutkan memberi pertimbangan strategi pengelolaan yang berkelanjutan.

D. Analisis Data

1. Karakterisasi Morfometri dan Hidrologi DAS

Morfometri DAS, termasuk topografi dan bentuk lahan, memiliki pengaruh signifikan terhadap aliran air dan proses hidrologi. Misalnya, penelitian menunjukkan bahwa karakteristik morfometri seperti kemiringan dan panjang aliran utama dapat digunakan untuk memprediksi parameter hidrograf unit, seperti puncak aliran dan waktu menuju puncak (Del Rio et al., 2020).

Tabel 1. Parameter morfometri (Kurzah et al., 2024; Sujarwo et al., 2019; Triany et al., 2024)

No	Parameter Morfometri	Keterangan	Rujukan
Aspek Linier			
1	Ordo Sungai (U)	Urutan hirarki aliran	(Strahler, 1964)
2	Panjang aliran (Lu)	Panjang aliran Sungai (km)	(Horton, 1945)
3	Panjang aliran rata-rata (Lsm)	$L_{ms} = Lu / Nu$ dengan Lu = Panjang aliran orde 'u', dan Nu = jumlah segmen orde 'u'	(Horton, 1945)
4	Rasio panjang aliran (Rl)	$Rl = Lu / Lu-1$ dengan Lu = Total panjang aliran orde 'u', $Lu-1$ = Total panjang aliran orde 'u', 1 = Panjang aliran orde yang lebih rendah berikutnya.	(Horton, 1945)
5	Rasio percabangan (Rb)	$Rb = Nu / Nu+1$; dengan, Nu = Jumlah total segmen aliran orde 'u'; $Nu+1$ = Jumlah segmen orde yang lebih tinggi berikutnya	(Schumm, 1956)
Aspek Relief			
6	Relief DAS (Bh)	Jarak vertikal antara titik terendah dan tertinggi dari daerah aliran sungai	(Schumm, 1956)
7	Rasio Relief	$Rh = Bh / Lb$; dengan, Bh = Relief DAS; Lb = Panjang DAS	(Schumm, 1956)
8	Indeks Kekasaran / <i>Ruggedness number</i> (Rn)	$Rn = Bh * Dd$ dengan, Bh = Relief DAS; Dd = Drainage Density	(Schumm, 1956)

No	Parameter Morfometri	Keterangan	Rujukan
Aspek Areal			
9	Kerapatan drainase (Dd)	$Dd = Lu/A$ dengan, Lu= Jumlah panjang semua sungai; A= Luas DAS (km^2)	(Horton, 1932)
10	Stream frequency (Fs)	$Fs = Nu/A$ dengan, Nu= Jumlah segmen sungai orde 'u'; A= Luas DAS (km^2)	(Horton, 1932)
11	Texture rasio (T)	$T = N1/P$ dengan, N1=Jumlah Sungai orde1, P = Keliling DAS	(Horton, 1945)
12	Faktor bentuk (Rf)	$Rf = A/(Lb)^2$ dengan, A=Luas DAS (km^2); Lb= Panjang DAS	(Horton, 1932)
13	Circularity rasio (Rc)	$Rc = 4\pi A/P^2$ dengn, A= Luas DAS (km^2); $\pi = 3.14$, P = Keliling DAS (km)	(Miler, 1953)
14	Elongation rasio (Re)	$Re = 2 * (A/\pi)^{0.5} / Lb$ dengan A=Luas DAS (km^2); Lb= Basin length	(Schumm, 1956)
15	Constant channel maintenance (C)	$C = 1/Dd$ dengan, Dd= Drainage density	(Schumm, 1956)
16	Length of overland flow (Lof)	$Lof = 1/Dd * 2$ where, Dd=Drainage density	(Horton, 1945)
17	Indeks Infiltrasi (IF)	$IF = Fs * Dd$ where, Stream frequency (Fs), Drainage density (Dd)	(Horton, 1945)
18	Compactness (Cc)	constant $Cc = 0,2821 * P / A^{0,5}$ dengan, A= Area, P= Basin perimeter (km)	(Horton, 1945)

Kajian sifat morfometri dan hidrologi DAS memberikan wawasan penting untuk pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan. Perubahan iklim dan aktivitas manusia terus menjadi faktor penting yang mempengaruhi dinamika DAS, menekankan perlunya strategi adaptasi dan mitigasi yang efektif (Gomes et al., 2024; Mahala, 2020; Shrestha et al., 2020).

2. Pemodelan SWAT

Pemodelan hidrologi menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) adalah metode yang umum digunakan untuk menganalisis debit sungai, sedimentasi, dan kualitas air dalam suatu daerah aliran sungai. SWAT, yang awalnya dikembangkan di Amerika, telah dimodifikasi untuk menyesuaikan dengan kondisi hidrologi di Indonesia (Fausan et al., 2022; Stiyanto et al., 2015).

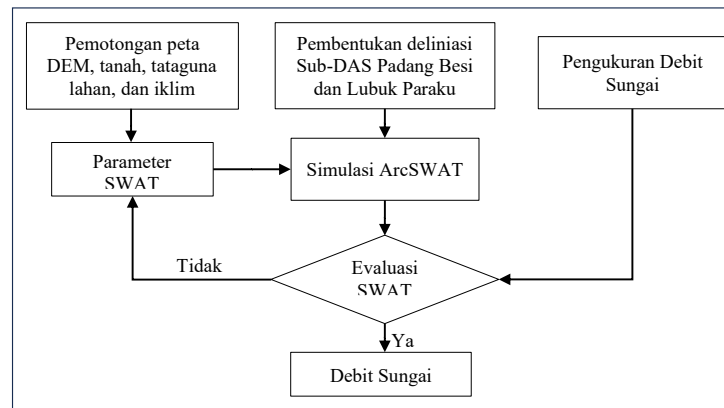
Model SWAT menggambarkan interaksi dari setiap elemen terkecil DAS yakni berupa *Hydrological Response Unit* (HRU). HRU menggambarkan respon hidrologi yang terjadi pada satu satuan wilayah. Pembagian HRU tersebut berdasarkan *overlay* dari karakteristik tanah, tata guna lahan, dan kemiringan lahan. Model SWAT menganalisis keseluruhan HRU yang ada pada DAS tersebut, sehingga dapat menggambarkan kondisi DAS secara menyeluruh namun dapat menganalisis kondisi DAS dari elemen terkecilnya yakni HRU. Adapun tahapan dalam analisis SWAT adalah sebagai berikut:

1. Penggambaran Daerah Aliran Sungai (DAS)
Daerah Aliran Sungai dibuat dengan metode *Automatic Watershed Delineation* pada aplikasi SWAT. Peta DEM wilayah DAS dengan resolusi 30m x 30m dijadikan *input* untuk mempresentasikan beda elevasi dari setiap titik untuk melihat arah aliran air permukaan. Aliran sungai yang terbentuk akan membentuk suatu daerah aliran sungai.
2. Pembuatan wilayah hidrologi (HRU)
Wilayah hidrologi dibentuk berdasarkan pembuatan HRU pada aplikasi SWAT. *Input* data berupa peta tanah dan *landuse* dan kemiringan lahan. Kemiringan yang digunakan dalam menentukan HRU dibagi dalam beberapa pembagian yakni 0-3 ; 3-8 ; 8-15; 5-30; 30-45; 45-65 (Asdak, 2010). *Threshold* dari persentase total luasan yang digunakan untuk *landuse* (10%), jenis tanah (5 %), dan *Slope* (5%) yang memiliki persentase luasan yang lebih kecil dari *threshold* yang ditentukan untuk diabaikan.
3. Evaluasi SWAT
Pada tahapan ini *input* data yang digunakan adalah periode simulasi tahun 2022-2023. File data mencakup data stasiun iklim (.txt), file data hujan harian (.pcp), temperatur harian (.tmp) dan file *weather generator* (.wgn).

4. Visualisasi hasil simulasi.

Pada tahapan visualisasi parameter *output* yang dikehendaki dapat ditampilkan dalam ArcGIS, adapun parameter output yang akan dihitung yakni aliran dasar (*Base Flow*).

Model SWAT dapat dijadikan pedoman dalam analisis ketersediaan air (debit tersedia). Hal ini dikarenakan hasil simulasi yang dilakukan akan menggambarkan kondisi HRU dari sub DAS Padang Besi, Sub DAS Lubuk Paraku, dan padayo terkait *run off*, erosi, evapotranspirasi dan *ground water recharge* yang terjadi. Adapun diagram alir (*flow chart*) untuk simulasi SWAT dapat dilihat pada Gambar 2. Dalam penelitian ini yang akan ditinjau lebih jauh yaitu nilai *run off* atau debit yang tersedia di sungainya.



Gambar 2. Diagram alir simulasi SWAT

Selanjutnya nilai debit yang didapat akan dievaluasi menggunakan model parameter koefisien determinasi (R^2) dan *Nash Efisiensi – Sutcliffe Index* (NSE). Secara matematis koefisien determinasi (R^2) dan *Nash Efisiensi – Sutcliffe Index* (NSE) dihitung dengan persamaan berikut (Loague & Green, 1991; Nash & Sutcliffe, 1970) :

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad \text{dan} \quad NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (1)$$

dimana:

Q_m : debit observasi (m^3/s)

Q_s : debit simulasi (m^3/s)

$\bar{Q}_m$: rata – rata debit observasi (m^3/s)

$\bar{Q}_s$: rata – rata debit simulasi (m^3/s)

Nilai determinasi (R^2) memiliki rentang nilai 0 – 1, R^2 bernilai memuaskan jika nilainya diatas 0,6 (Moriassi et al., 2007; Santhi et al., 2001). Kategori nilai NSE menurut Motovilov et al. (1999), baik jika nilainya $\geq 0,75$; memuaskan $0,75 \geq NSE \geq 0,36$; dan kurang memuaskan $NSE < 0,36$ (Motovilov et al., 1999).

3. Analisis Ketersediaan dan Kebutuhan

Hasil simulasi dihitung untuk nilai minimum, maksimum, dan rata-rata harian. Jika hasilnya lebih dari 0,5, proyeksi untuk ketersediaan air dapat dibuat. Untuk proyeksi masa depan ketersediaan air, debit rata-rata ini akan digunakan sebagai debit acuan. Dengan menggunakan model Verhulst, yang menunjukkan kurva sigmoid dari waktu ke waktu dengan nilai batasan pada waktu tak terbatas, histori debit sungai digunakan untuk memproyeksikan ketersediaan air (Puripat & Sarikavanij, 2018). Analisis kecenderungan perubahan iklim pada Sub DAS dapat digunakan untuk menghitung perubahan arah ketersediaan air.

$$P(t) = P_\infty \left[1 + \left(\frac{P_\infty}{P_0} - 1 \right) \cdot \exp(-\gamma t) \right]^{-1} \quad (2)$$

dimana :

P_∞ : Debit minimum mula-mula

P_0 : Debit minimum dari seluruh tahun

γ : nilai *gamma*

t : rentang tahun

Perhitungan kebutuhan diantaranya domestik, industry, dan pertanian. Untuk kebutuhan domestik perhitungan didasarkan pada perhitungan jumlah penduduk, kebutuhan air perkapita, dan tingkat pertumbuhan. Jumlah penduduk pada tahun tertentu dapat dihitung dengan menggunakan metode geometric (PU, 2006).

$$P_n = P_0(1 + r)^n \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

P_n : Jumlah penduduk pada tahun n

P_0 : Jumlah penduduk awal

r : Tingkat pertumbuhan penduduk per tahun (dalam %)

n : Jangka waktu dalam tahun

$$Q_{DM} = 365 \text{ hari} \times \left\{ \frac{q}{1000} \times P \right\} \dots\dots\dots(4)$$

dimana :

Q_{DM} = Kebutuhan air domestik (m^3 / tahun)

q = Kebutuhan air (liter/kapita/hari)

p = jumlah penduduk

Perhitungan kebutuhan air pertanian menggunakan persamaan berikut (BSN, 2002):

$$Q_{IR} = L \times it \times a \dots\dots\dots(5)$$

dimana :

Q_{IR} : Kebutuhan air untuk irigasi sawah (m^3 / tahun)

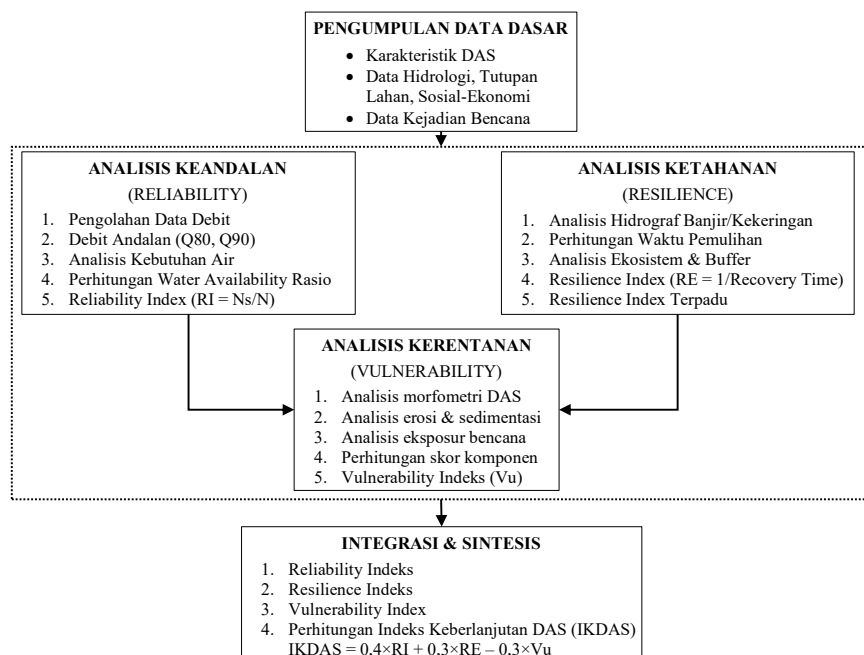
L : Luas lahan pertanian (ha)

it : Intensitas penanaman dalam semusim / tahun (3600det/jam x 24 jam /hari 120 hari /musim)

a : standar penggunaan air irigasi (1 L /detik/ha)

4. Water Resilience Analysis

Mengelola sumber daya air dan ekosistem terkait membutuhkan penilaian kondisi DAS. Untuk mengevaluasi kondisi DAS secara komprehensif *Water Resiliensi* harus didamping dengan analisis lingkungan lainnya, sehingga konsep keandalan (*reliability*), ketahanan (*resilience*), dan kerentanan (*vulnerability*), atau RRV, sangat sesuai digunakan. Hasil dari RRV merupakan rekomendasi untuk mencapai keberlanjutan (*sustainability*) DAS dan sumber daya air pada umumnya. Kerangka ini membantu dalam memahami bagaimana DAS menanggapi perubahan iklim, penggunaan lahan yang berubah, dan tindakan manusia lainnya (Farzi et al., 2023; Ogasawara et al., 2024; Pramono et al., 2025). Analisis RRV mengikuti prosedur seperti pada Gambar 3 berikut.

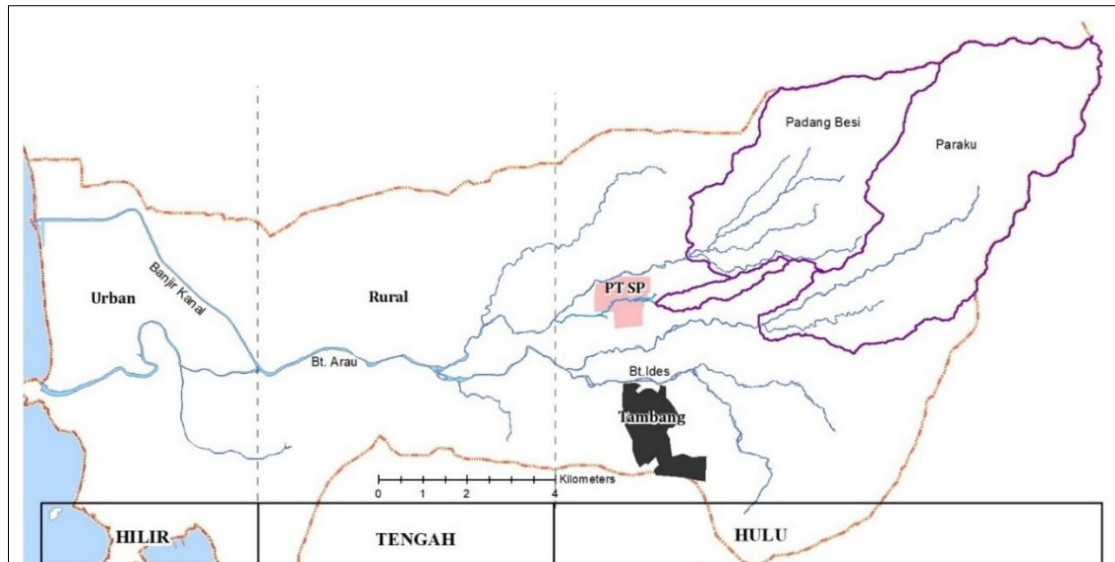


Gambar 3. Analisis RRV DAS

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Morfometri DAS

Penilaian mendalam tentang karakteristik morfometri yang ditinjau dari aspek linier, relief dan areal secara komprehensif telah dilakukan terhadap Sub DAS Hulu Batang Arau dengan hasil seperti pada Tabel 2 berikut, dengan dasar pembagian segmentasi DAS Arau untuk lokasi penelitian seperti pada Gambar 4. Segmentasi DAS merepresentasikan aktifitas antropogenik yang mempengaruhi karakteristik, dihilir merupakan kawasan urban, tengah dominan dengan rural dan bagian hulu justru memiliki kompleksitas lebih tinggi dengan adanya PT SP, tambang dan persaingan kebutuhan air lainnya di hulu DAS.



Gambar 4. Segmentasi DAS Batang Arau

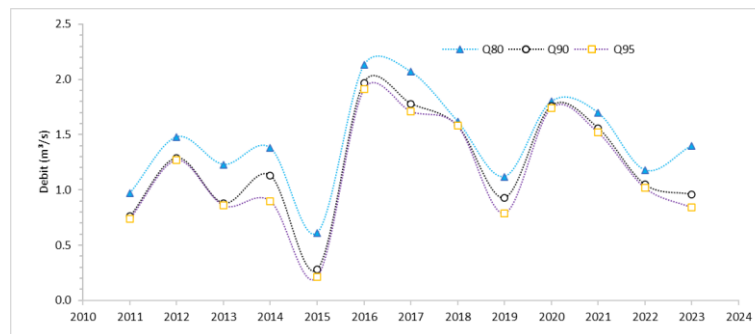
Tabel 2. Karakteristik Morfometri

No		Parameter Morfometri	Nama Sub DAS			Hulu DAS
Aspek Linier			Paraku	Padayo	Padang Besi	Arau
1	Ordo Sungai (U)		3	1	3	3
2	Panjang aliran Utama		2,51	2,59	0,96	
	Panjang semua sungai (Lu)		28,88		25,75	
3	Panjang aliran rata-rata (Lsm)		3,02	2,07	1,89	2,57
4	Rasio panjang aliran (RL)		11,11	1,00	6,65	9,19
5	Rasio percabangan (Rb)		9,962		7,05	8,62
Aspek Relief						
6	Relief DAS (Bh)		1560	2,20	1585	1529
7	Rasio Relief		0,14987	0,00069	0,21751	0,17
8	Indeks Kekasaran (Rn)		1,83	0,01	2,67	2,10
Aspek Areal			60%	3%	37%	
9	Luas DAS (A)		24,6216	1,0536	15,2672	
10	Kerapatan drainase (Dd)		1,1729	2,4541	1,6864	1,40
11	Stream frequency (Fs)		1,3809	0,9491	1,3100	1,34
12	Texture rasio (T)		0,3814	0,1085	0,4089	0,38
13	Faktor bentuk (Rf)		0,2272	0,1047	0,2875	0,25
14	Circularity rasio (Rc)		0,2662	0,1558	0,3207	0,28
15	Elongation rasio (Re)		0,5380	0,3651	0,6052	0,56
16	Constant channel maintenance (C)		0,8526	0,4075	0,5930	0,74
17	Length of overland flow (Lof)		1,7052	0,8150	1,1860	1,49
18	Indeks Infiltrasi (IF)		1,6196	2,3292	2,2091	1,86
19	Compactness constant (Cc)		0,1953	1,2338	0,2259	0,23

Hulu DAS Batang Arau dicirikan oleh jaringan sungai ordo 3 dengan rasio percabangan 8,62, menciptakan sistem drainase tersegmentasi yang mendistribusikan volume aliran secara merata dan mengurangi intensitas debit puncak di outlet. Konfigurasi topografis dengan elevasi 1529 m, rasio relief 0,17 dan indeks kekasaran 2,10 menghasilkan gradien energi potensial tinggi yang mengakselerasi aliran permukaan dan proses erosi, terutama pada zona bervegetasi minim (Brocard et al., 2023). Karakteristik geometris memanjang ($R_f=0,25$, $R_e=0,56$, $R_c=0,28$) berkontribusi pada elongasi waktu konsentrasi, menghasilkan hidrodinamika dengan puncak debit teredam kondisi ideal untuk antisipasi banjir. Parameter infiltrasi 1,86 dan constant channel maintenance 0,74km²/km menunjukkan kapasitas resapan memadai. Intervensi ekohidrologis melalui konservasi vegetasi dan rekayasa biogeoteknik menjadi imperatif untuk mempertahankan kesetimbangan mekanisme runoff-infiltrasi dan resiliensi DAS (Jarosiewicz et al., 2022).

B. Debit hasil pemodelan SWAT

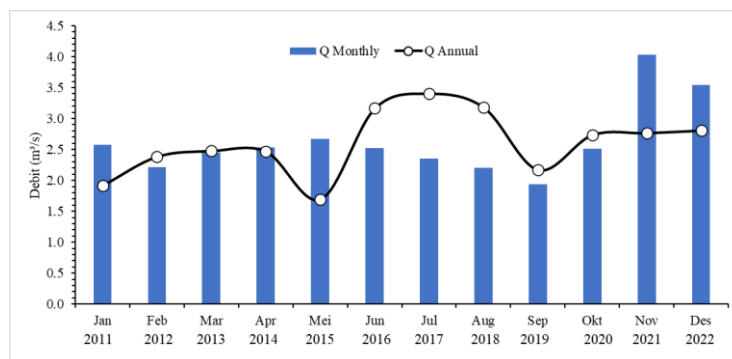
Nilai debit Hulu DAS Batang Arau didapatkan dengan pembobotan terhadap nilai dari persen luas masing – masing sub DAS, secara berurutan bobot persen untuk Sub DAS Paraku, Padang Besi dan Paraku adalah 60%, 37%, dan 3% dengan nilai debit Q80, Q90, dan Q95 untuk tahun 2011 hingga 2023, penilaian persentil debit dilakukan untuk memastikan debit yang digunakan pada analisis RRV nantinya dengan peluang yang baik, untuk distribusi debit tahun simulasi seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Debit Hulu DAS Batang Arau

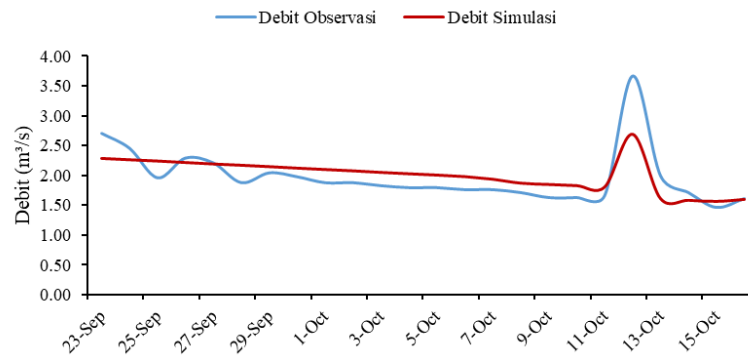
1. Sub DAS Paraku

Aliran sungai Paraku sejak adanya PT Semen Padang sudah menjadi andalan sumber air yang menyediakan untuk kebutuhan operasional pabrik dan dukungan kebutuhan air lainnya melalui pengambilan air yang ada dibendung lubuk baling dan terus dialirkan dengan saluran pembawa hingga ke *Water Plan* (WP) Bukit atas untuk didistribusikan dengan perpipaan untuk kebutuhan pabrik dan domestik yang ada di PT Semen Padang. Kondisi tersebut mempengaruhi hasil simulasi yang dilakukan berikut merupakan nilai rata – rata debit untuk bulanan (dengan bar) dan tahunan (line) untuk tahun pengamatan, agar seimbang data tahunan hanya divisualkan sampai 2022 saja (Gambar 6).



Gambar 6. Debit rata bulanan dan tahunan Paraku

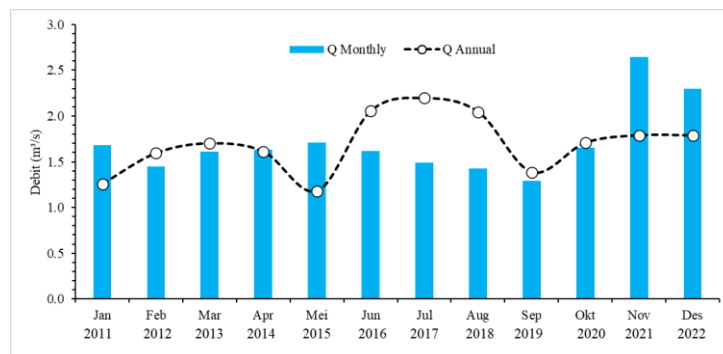
Berdasarkan analisis debit tahunan untuk sub DAS Paraku didapatkan rerata debit harian 2,61 m³/s dengan nilai debit terendah pada tahun 2015 yang mencapai 0,16 m³/s, sedangkan debit bulanan terendah berada pada bulan September. Evaluasi performa debit didapat diperoleh nilai $R^2 = 0,9693$ dan NSE sebesar 0,86 seperti pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Kalibrasi dan validasi debit Paraku

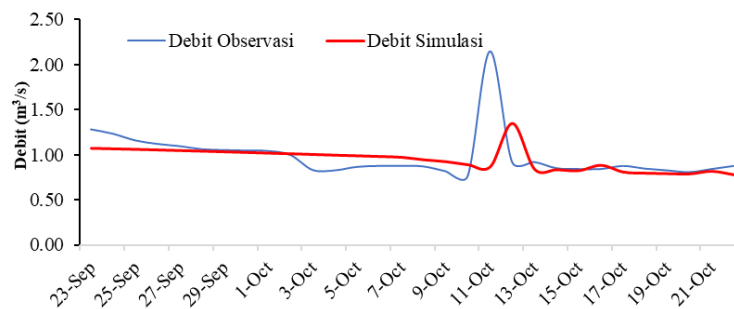
2. Sub DAS Padang Besi

Dinamika air di sub DAS Sungai Padang Besi cukup fluktuatif, apalagi sub DAS ini pernah dijadikan alternatif sumber air yang dialirkan ke WP Indarung VI, namun karena kondisi persaingan pengambilan air yang cukup banyak diantaranya terdapat intake untuk kebutuhan air bersih oleh Pemerintah Kota Padang sehingga intake untuk ke WP Indarung VI tidak bisa terpenuhi secara optimal dari aliran Sungai Padang Besi dan WP Indarung VI masih menampung air yang didistribusikan dari WP Bukit atas yang mana berasal dari Sungai Paraku, hal tersebut sangat mempengaruhi kondisi debit aliran yang terjadi di sub DAS ini. Hasil simulasi untuk kondisi debit bulanan dan tahunan disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Debit rerata bulanan dan tahunan Padang Besi

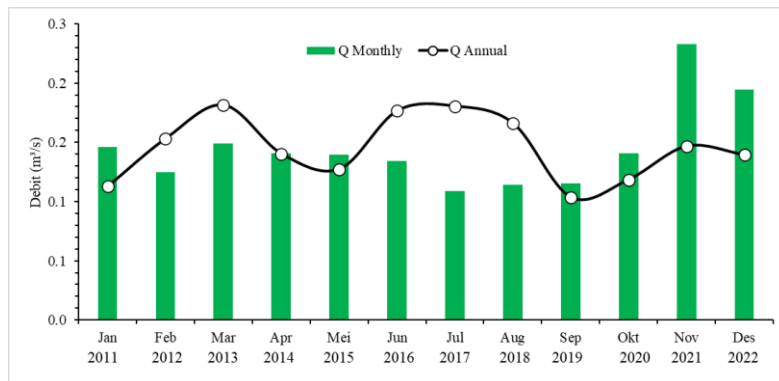
Berdasarkan tren debit tahunan maka Debit maksimum pada sub DAS Padang Besi didapatkan sebesar 1,19 m³/s, debit minimum sebesar 0,37 m³/s, dan debit rata-rata sebesar 0,62 m³/s, sedangkan debit bulanan terendah terjadi bulan September. Evaluasi kinerja model didapatkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,5435 dan *Nash Coefficient of Efficiency* (NSE) sebesar 0,79 (Gambar 9).



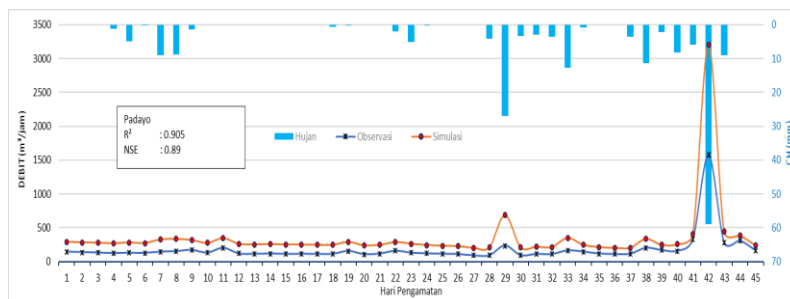
Gambar 9. Kalibrasi dan validasi debit Padang Besi

3. Sub DAS Padayo

Sub DAS ini merupakan bagian sub DAS Padang Besi yang diamati tersendiri karena berpengaruh langsung terhadap ketersediaan air khususnya industri yang ada di hulu DAS Batang Arau. Hasil analisis SWAT dilakukan untuk 13 tahun simulasi mulai dari 2011 hingga 2023 yang akan dikalibrasi dan validasi dengan menggunakan data pengamatan 1 bulan pada tahun 2023, hal ini juga diberlakukan untuk sub DAS sebelumnya. Mendapatkan debit rata – rata tahunan 0.144 m³/s, baik bulanan maupun tahunan terendah terjadi di bulan September seperti pada Gambar 10. Kalibrasi dan Validasi dengan debit Observasi untuk tanggal 14 Sep 2023 sampai 28 Oct 2023 dengan hasil statistik yang sangat baik dengan R² = 0,905 dan NSE = 0,89 seperti Gambar 11 berikut.



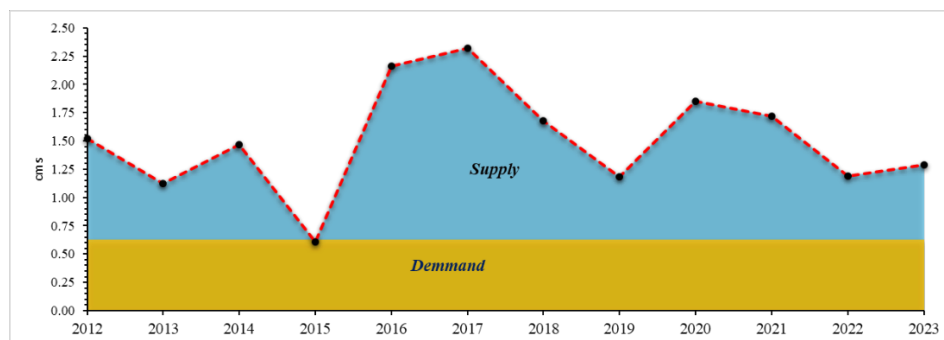
Gambar 20. Debit rerata bulanan dan tahunan Padayo



Gambar 31. Evaluasi debit Padayo

C. Neraca Supply-Demand

DAS Batang Arau merupakan salah satu DAS dengan nilai sejarah tertinggi di Kota Padang, dikarenakan awal peradaban berada di wilayah urbannya (Ginting et al., 2025). Perkembangan secara pesat sehingga hanya satu-satunya DAS di Kota Padang yang memiliki kompleksitas permintaan air untuk menunjang aktivitas manusia. Dari hasil analisis *Supply-Demand* didapat rerata kebutuhan domestik mencapai 0,0234 m³/s; pertanian 0,4252 m³/s; dan industri dalam hal ini PT Semen Padang 0,1811 m³/s. Secara keseluruhan kebutuhan air di hulu DAS Batang Arau adalah 0,6297 m³/s. Berdasarkan analisis SWAT didapat debit 80% mencapai 1,5092 m³/s dengan tren waktu seperti Gambar 12.



Gambar 42. Neraca Air Hulu DAS Batang Arau

Berdasarkan Gambar 12 dapat dilihat bahwa kebutuhan air dari waktu ke waktu masih terpenuhi, kendati pada tahun 2015 hampir seimbang antara kebutuhan dan ketersediaan namun ini merupakan simulasi dengan debit Q80 artinya ini merupakan jaminan ketersediaan 80% di hulu DAS Batang Arau.

D. RRV Hulu DAS Batang Arau

Hulu DAS Batang Arau (luas 40,94 km²) memiliki karakteristik topografi curam (35%), curah hujan tinggi (4651 mm/tahun), dan tutupan hutan dominan (87,90%). Pendekatan *Reliability, Resilience, Vulnerability* (RRV) digunakan untuk evaluasi keberlanjutan sumber daya air secara komprehensif (De Gracia & Serrano, 2024). Lebih lanjut lagi untuk kebutuhan RRV seperti yang disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Karakteristik Utama Hulu DAS Batang Arau untuk Parameter RRV

Parameter	Nilai
Luas DAS	40,94 km ²
Tutupan Hutan	87,90%
Tingkat Erosi ^a	385,6 ton/ha/tahun
Area Rawan Banjir ^b	34,63%
Lahan Kritis ^c	33,59%
Waktu Pemulihan	45 hari
Water Availability Ratio	1,427
Base Flow Index	0,5771
Indeks Keandalan	1,00
Indeks Keandalan	0,84
Indeks Kerentanan	0,65
IKDAS	0,85

Sumber: ^a(Dityamiko, 2018); ^b(Eka Putri et al., 2023); ^c(Utama et al., 2021)

1. Keandalan (*Reliability*)

Hulu DAS Batang Arau menunjukkan keandalan sangat tinggi (Indeks 1,0) dengan *Water Availability Ratio* (WAR) 1,427 yang menurut (Liu et al., 2017) menunjukkan kondisi "aman" dari tekanan air. *Base Flow Index* (BFI) 0,5771 mengindikasikan kapasitas penyimpanan air tanah yang baik, sementara *Coefficient of Variation* (CV) 0,3960 menunjukkan fluktuasi debit yang relatif stabil. Total kebutuhan air 0,6297 m³/s dapat dipenuhi oleh debit andalan Q80 (1,5092 m³/s).

2. Ketahanan (*Resilience*)

Resilience Index Terpadu 0,8398 (sangat tinggi) terutama ditopang oleh tutupan hutan (87,90%) yang menurut (Singh et al., 2022) signifikan meningkatkan ketahanan hidrologi. Terdapat kontras antara waktu pemulihan panjang (45 hari) dengan waktu konsentrasi singkat (0,457 jam), menunjukkan sistem dengan respons cepat terhadap hujan namun pemulihan lambat pasca-banjir.

3. Kerentanan (*Vulnerability*)

Vulnerability Index 0,65 (tinggi) terutama disebabkan oleh tingkat erosi sangat tinggi (385,6 ton/ha/tahun) yang jauh melampaui batas toleransi. Meskipun memiliki bentuk DAS memanjang (Form Factor 0,25) yang cenderung memiliki puncak banjir lebih rendah, kerentanan tetap tinggi dengan 34,63% area rawan banjir dan lahan kritis 33,59%.

IKDAS sebesar 0,85 menunjukkan keberlanjutan sangat baik, meskipun memiliki kerentanan tinggi, DAS ini memiliki keandalan dan ketahanan yang sangat baik sehingga menghasilkan IKDAS kategori sangat baik. Hasil ini sesuai dengan temuan (Zhu et al., 2022) bahwa daya dukung ekologis yang baik dapat mengompensasi kerentanan fisik.

Implementasi strategi pengelolaan perlu dilakukan secara terpadu dengan pendekatan jangka pendek (mitigasi erosi dan banjir), jangka menengah (konservasi tanah dan air, pengelolaan zona rawan), dan jangka panjang (restorasi ekosistem, institusionalisasi pengelolaan kolaboratif) untuk itu disusun prioritas intervensi dan strategi pengelolaan hulu DAS Batang Arau seperti pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Prioritas Intervensi dan Strategi Pengelolaan

Prioritas	Kondisi Saat Ini	Strategi Pengelolaan	Rujukan
Pengendalian Erosi	Tingkat erosi 385,6 ton/ha/tahun, Lahan kritis 33,59%	• Teknik vegetatif (agroforestri) • Teknik mekanis (terasering, checkdam) • Konservasi tanah dan air lahan >15% kemiringan	(Ikhwal et al., 2023)
Mitigasi Banjir	Area rawan banjir 34,63%, Waktu konsentrasi 0,457 jam	• Natural flood management • Sistem peringatan dini terintegrasi • Zonasi pemanfaatan lahan berbasis risiko	(Aroca-Jiménez et al., 2018)
Pengelolaan Ekosistem	Zona riparian ±15m	• Perluasan zona riparian minimum 30m • Restorasi vegetasi riparian multistrata	(Fraaije et al., 2019)
Pengelolaan Sosial-Ekonomi	Kepadatan penduduk 2597 jiwa/km ² , Penduduk miskin 17,53%	• Pembayaran Jasa Lingkungan • Diversifikasi ekonomi berbasis ekosistem • Penguatan kelembagaan pengelolaan kolaboratif	(Asbjornsen et al., 2015; Sunaedi et al., 2022)

KESIMPULAN

Penelitian ketahanan sumber daya air di hulu DAS Batang Arau telah berhasil mengintegrasikan analisis morfometri-hidrologi, pemodelan SWAT, evaluasi supply-demand, dan penilaian RRV dalam satu kerangka komprehensif. Karakterisasi morfometri menunjukkan DAS berbentuk memanjang (Form Factor 0,25) dengan kemiringan curam (35%) menyebabkan respon hidrologi cepat namun pemulihan lambat. Pemodelan SWAT dengan performa baik (R^2 0,54-0,97; NSE 0,79-0,89) menghasilkan debit andalan Q80 sebesar 1,51 m³/s, mencukupi total kebutuhan air 0,63 m³/s dengan Water Availability Ratio 1,427. Evaluasi RRV menghasilkan Indeks Keberlanjutan DAS (IKDAS) 0,85 yang menunjukkan kondisi sangat baik, didukung keandalan tinggi (1,0) dan ketahanan baik (0,84) dari tutupan hutan dominan (87,9%), namun dengan kerentanan signifikan (0,65) dari aspek erosi (385,6 ton/ha/tahun) dan area rawan banjir (34,63%). Pengelolaan terpadu dengan prioritas pengendalian erosi, mitigasi banjir, revitalisasi riparian, dan penguatan kelembagaan kolaboratif menjadi kunci untuk mempertahankan dan meningkatkan ketahanan air jangka panjang. Pendekatan RRV terbukti efektif untuk evaluasi komprehensif kondisi DAS dan dapat diadopsi untuk kajian serupa di daerah aliran sungai lain di Indonesia yang menghadapi kompleksitas penggunaan air dan tekanan antropogenik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., & Srinivasan, R. (2017). A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. In *Water (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Afifa, M., Dina, A., Roza, E., & Wisafri, S. &. (2020). Analisa Debit Andalan Pada Das Batang Arau Dengan Menggunakan Model Soil And Water Assessment Tool (SWAT) Mainstay Discharge Analysis at The Bottom of the Stem Using the Soil Water Assessment Tool (SWAT). *Jurnal Ilmiah Poli Rekayasa*, 16(1).
- Akmal, S. G. (2025, March 12). *Antara Bencana, Lingkungan, dan Pangan*. CNBC Indonesia. <https://www.cnbcindonesia.com/opini/20250312152349-14-617993/antara-bencana-lingkungan-dan-pangan>
- Aroca-Jiménez, E., Bodoque, J. M., García, J. A., & Díez-Herrero, A. (2018). A quantitative methodology for the assessment of the regional economic vulnerability to flash floods. *Journal of Hydrology*, 565, 386–399. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.029>

- Asbjornsen, H., Mayer, A. S., Jones, K. W., Selfa, T., Saenz, L., Kolka, R. K., & Halvorsen, K. E. (2015). Assessing Impacts of Payments for Watershed Services on Sustainability in Coupled Human and Natural Systems. *BioScience*, 65(6), 579–591. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv051>
- Asdak, C. (2010). *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Gadjah Mada University Press.
- Asdak, C., Yulizar, & Subiyanto. (2023). A National Policy On Indonesia's Integrated Water Resource Conservation Management. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 10(2), 151–162. <https://doi.org/10.59465/ijfr.2023.10.2.151-162>
- Astuti, I. S., Sahoo, K., Milewski, A., & Mishra, D. R. (2019). Impact of Land Use Land Cover (LULC) Change on Surface Runoff in an Increasingly Urbanized Tropical Watershed. *Water Resources Management*, 33(12), 4087–4103. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02320-w>
- Basuki, T. M., Nugroho, H. Y. S. H., Indrajaya, Y., Pramono, I. B., Nugroho, N. P., Supangat, A. B., Indrawati, D. R., Savitri, E., Wahyuningrum, N., Purwanto, Cahyono, S. A., Putra, P. B., Adi, R. N., Nugroho, A. W., Auliyani, D., Wuryanta, A., Riyanto, H. D., Harjadi, B., Yudilastyantoro, C., ... Simarmata, D. P. (2022). Improvement of Integrated Watershed Management in Indonesia for Mitigation and Adaptation to Climate Change: A Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 16). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14169997>
- Bhatta, B., Shrestha, S., Shrestha, P. K., & Talchabhadel, R. (2019). Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. *CATENA*, 181, 104082. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104082>
- Boltz, F., LeRoy Poff, N., Folke, C., Kete, N., Brown, C. M., St. George Freeman, S., Matthews, J. H., Martinez, A., & Rockström, J. (2019). Water is a master variable: Solving for resilience in the modern era. In *Water Security* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100048>
- BSN, Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 6728.1:2002 Penyusunan Neraca Spasial Sumber Daya Alam – Bagian 1: Sumber Daya Air Air Spasial. Jakarta
- Brocard, G., Willebring, J. K., & Scatena, F. N. (2023). Shaping of topography by topographically-controlled vegetation in tropical montane rainforest. *PLoS ONE*, 18(3 March). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281835>
- De Gracia, H., & Serrano, V. (2024). Evaluation of resilience in the Chiriqui Viejo River basin, Chiriqui, Panama in the context of climate change and extreme weather events. *2024 9th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, 372–377. <https://doi.org/10.1109/IESTEC62784.2024.10820267>
- Del Rio, A. A., Ramirez, A. I., & Sanchez, M. A. (2020). The role of topography on the shape of unit hydrographs in small and medium sized watersheds through a physical model. *Water (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/w12082270>
- Dityamiko, W. (2018). Kajian Pengendalian Erosi dan Sedimentasi Sungai Batang Arau. *Jurnal ArTSip*, 1(1).
- Eka Putri, S., Corp, A. F., Rembrandt, Dasman Lanin, Genius Umar, & Mulya Gusman. (2023). Kota Padang : Identifikasi Potensi Bencana Banjir Dan Upaya Mitigasi. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Nusantara (JIMNU)*, 1(3), 116–122. <https://doi.org/10.59435/jimnu.v1i3.56>
- Erniwati, E. (2018). Studi Dinamika Kualitas Air Daerah Aliran Sungai Batang Arau di Propinsi Sumatera Barat. *Dampak*, 15(1), 37–42. <https://doi.org/10.25077/dampak.15.1.37-42.2018>
- Falkenmark, M., Wang-Erlandsson, L., & Rockström, J. (2019). Understanding of water resilience in the Anthropocene. *Journal of Hydrology X*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100009>
- Farzi, P., Sadeghi, S. H., & Jomehpour, M. (2023). Spatial and temporal zoning of watershed resilience using a multidimensional composition approach. *Natural Resource Modeling*, 36(2). <https://doi.org/10.1111/nrm.12362>
- Fausan, A., Sapei, A., Suharnoto, Y., & Pandjaitan, N. H. (2022). Analysis of Maros River Discharge Using the Modified Soil and Water Assessment Tools (SWAT) Program. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 11(1), 146. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v11i1.146-160>
- Fraaije, R. G. A., Poupin, C., Verhoeven, J. T. A., & Soons, M. B. (2019). Functional responses of aquatic and riparian vegetation to hydrogeomorphic restoration of channelized lowland streams and their valleys. *Journal of Applied Ecology*, 56(4), 1007–1018. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13326>

- Ginting, J. H., Afrida, & Arifin, Z. (2025). Banda Bekali and local knowledge in flood management: 100 years of social and environmental interaction in Padang City. *E3S Web of Conferences*, 604. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560402004>
- Gomes, P. V. O., Figueiredo, F. T., Fambrini, G. L., Pupim, F., Grohmann, C. H., Vedana, L. A., & Franco, L. S. (2024). Hydrological and morphological responses in the São Francisco River Basin (Northeast Brazil) resulting from river damming and climate changes in a tropical region. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(15), 5339–5361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.6003>
- Guchi, F. (2024). *Analisis Ketersediaan Air di Sub DAS Lubuk Paraku Dengan Menggunakan Metode Soil And Water Assesment Tools (SWAT)*. <https://drive.google.com/file/d/1VpMGefK1cn3iUq9A2KV9rO5Cs1xX1uI9/view?usp=sharing>
- Heryani, N., Kartiwa, B., Sosiawan, H., Rejekiningrum, P., Adi, S. H., Apriyana, Y., Pramudia, A., Yufdy, M. P., Tafakresnanto, C., Rivaie, A. A., Suratman, Dariah, A., Malik, A., Yusuf, & Setiani, C. (2022). Analysis of Climate Change Impacts on Agricultural Water Availability in Cimanuk Watershed, Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142316236>
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Bulletin of The Geological Society Of America*, 56(3), 275–370.
- Ikhwal, M. F., Azhari, B., Khari, A., Nur, S., Hamdan, A. M., & Prommacot, K. (2023). *The Application and Relevancy of Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model in Indonesia*. <https://doi.org/10.22373/ekw.v9i1.14577>
- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Irsyad, F., Yanti, D., Stiyo, E., Saputra, D., Budiman, R., Noldi, H., & Winata, T. A. (2023). *Final Report Rekayasa Konservasi Sumber Daya Air PT Semen Padang*. <https://drive.google.com/file/d/1gyHrLN2K6IR3dU0m7cjMjcaGl6KqwlVt/view?usp=sharing>
- Jarosiewicz, P., Fazi, S., & Zalewski, M. (2022). How to boost Ecohydrological Nature-Based Solutions in water quality management. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 22(2), 226–233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.11.005>
- Kiamba, D. M., Kipkorir, E. C., Kosgei, J. R., Njoroge, S. M., & Nyandwaro, G. N. (2023). Application of SWAT and WEAP Models for Sustainable Management of Water Resources in the Two Rivers Dam Catchment, Uasin Gishu County, Kenya. *East African Journal of Environment and Natural Resources*, 6(1), 262–276. <https://doi.org/10.37284/eajenr.6.1.1336>
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Kurniawan, T. A., Bandala, E. R., Othman, M. H. D., Goh, H. H., Anouzla, A., Chew, K. W., Aziz, F., Al-Hazmi, H. E., & Khoir, A. N. (2024). Implications of climate change on water quality and sanitation in climate hotspot locations: A case study in Indonesia. In *Water Supply* (Vol. 24, Issue 2, pp. 517–542). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.008>
- Kurzah, M. Y. I., Nurhayati, N., & Yulianto, E. (2024). Morphology and Morphometry Characteristic of Raya Watershed. *Jurnal Teknik Sipil*, 24(1), 839. <https://doi.org/10.26418/jts.v24i1.75707>
- Li, J., He, W., Jiang, E., Qu, B., Yuan, L., Degefu, D. M., & Ramsey, T. S. (2024). Spatio-Temporal Evaluation of Water Resources System Resilience and Identification of Its Driving Factors in the Yellow River Basin. *Water (Switzerland)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/w16030414>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kumm, M., Flörke, M., Pfister, S., Hanasaki, N., Wada, Y., Zhang, X., Zheng, C., Alcamo, J., & Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. In *Earth's Future* (Vol. 5, Issue 6, pp. 545–559). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>

- Loague, K., & Green, R. E. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(91\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0169-7722(91)90038-3)
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>
- Miler, V. C. (1953). *Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area. Virginia and Tennessee*. <https://doi.org/10.1086/626413>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., & Rodhe, A. (1999). Validation Of Distributed Hydrological Model Against Spatial Observations. *Agricultural Forest Meteorology*, 98–99, 257–277. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00102-1)
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nobre, C. A., Marengo, J. A., Seluchi, M. E., Cuartas, L. A., & Alves, L. M. (2016). Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, 08(02), 252–262. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>
- Nurdin, Suprayogi, I., Shalahuddin, M., Ermiyati, Siswanto, & Novan, A. (2023). Implementasi Model Soil dan Water Assessment Tool (SWAT) Dalam Pengelolaan Das Mikro Sei Tanduk. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 10(1), 38–44. <https://doi.org/10.31258/dli.10.1.p>
- Nurhamidah, Junaidi, A., & Kurniawan, M. (2018). Tinjauan Perubahan Tata Guna Lahan terhadap Limpasan Permukaan Kasus: DAS Batang Arau Padang. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 14(2), 131–138. <https://doi.org/10.25077/jrs.14.2.73-80.2018>
- Ogasawara, M. E. K., Mattos, E. M., Rocha, H. R., Wei, X., & Ferraz, S. F. B. (2024). Assessing Hydrological Response and Resilience of Watersheds as Strategy for Climatic Change Adaptation in Neotropical Region. *Sustainability (Switzerland)*, 16(20). <https://doi.org/10.3390/su16208910>
- Pawitan, H. (2018). Climate change impacts on availability and vulnerability of Indonesia water resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 200(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/200/1/012003>
- Pertiwi, A., & Siregar, P. M. (2018). *Analisis Kualitas Air Sungai Berdasarkan Aspek Meteorologi Studi Kasus DAS Batang Arau Kota Padang Sumatera Barat*. Researchgate.Net. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28141.23528>
- Poerbandono, Julian, M. M., & Ward, P. J. (2014). Assessment of the effects of climate and land cover changes on river discharge and sediment yield, and an adaptive spatial planning in the Jakarta region. *Natural Hazards*, 73(2), 507–530. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1083-x>
- Pramono, I. B., Santosa, B. H., Chulafak, G. A., Wuryanta, A., Lubis, R. F., & Setiawan, F. A. (2025). Development of A Simplified Watershed Health Assessment Framework: A Case Study In The Upper Citarum Watershed, Indonesia. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 59(6), 292–312. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.59.6.21>
- PU, Direktorat Jendral Cipta Karya (2006). *Petunjuk Praktis Perencanaan Pembangunan Sistem Penyediaan Air Bersih Perdesaan*. Penerbit Cipta Karya.Jakarta
- Puripat, C., & Sarikavanij, S. (2018). The Comparison of Grey System and the Verhulst Model for Rainfall and Water in Dam Prediction. *Advances in Meteorology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7169130>
- Remondi, F., Burlando, P., & Vollmer, D. (2016). Exploring the hydrological impact of increasing urbanisation on a tropical river catchment of the metropolitan Jakarta, Indonesia. *Sustainable Cities and Society*, 20, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.10.001>
- Ridwansyah, I., Apip, A., Wibowo, H., Rahmadya, A., Susiwidyaliza, S., Handoko, U., Setiawan, F., & Utami, N. (2023). The Impact of Land-Use and Climate Change on Water and Sediment Yields in Batanghari Watershed, Sumatra, Indonesia. *Sains Malaysiana*, 52(3), 705–721. <https://doi.org/10.17576/jsm-2023-5203-03>

- Ridwansyah, I., Yulianti, M., Apip, Onodera, S., Shimizu, Y., Wibowo, H., & Fakhrudin, M. (2020). The impact of land use and climate change on surface runoff and groundwater in Cimanuk watershed, Indonesia. *Limnology*, 21(3), 487–498. <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00629-9>
- Rufino, P. R., Gücker, B., Faramarzi, M., Boëchat, I. G., Cardozo, F. da S., Santos, P. R., Zanin, G. D., Mataveli, G., & Pereira, G. (2023). Evaluation of the SWAT Model for the Simulation of Flow and Water Balance Based on Orbital Data in a Poorly Monitored Basin in the Brazilian Amazon. *Geographies*, 3(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/geographies3010001>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of The SWAT Model On a Large River Basin With Point And Nonpoint Sources. In *Journal of The Amerocan Waer Resources Association* (Vol. 37, Issue 5).
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *GSA Bulletin*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Setyorini, A., Khare, D., & Pingale, S. M. (2017). Simulating the impact of land use/land cover change and climate variability on watershed hydrology in the Upper Brantas basin, Indonesia. *Applied Geomatics*, 9(3), 191–204. <https://doi.org/10.1007/s12518-017-0193-z>
- Shrestha, S., Imbulana, N., Piman, T., Chonwattana, S., Ninsawat, S., & Babur, M. (2020). Multimodelling approach to the assessment of climate change impacts on hydrology and river morphology in the Chindwin River Basin, Myanmar. *CATENA*, 188, 104464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104464>
- Singh, C., Van Der Ent, R., Lan, W.-E., & Fetzer, I. (2022). Hydroclimatic adaptation critical to the resilience of tropical forests. *Global Change Biology*, 28, 2930–2939. <https://doi.org/10.1111/gcb.16115>
- Sisay, E., Halefom, A., Khare, D., Singh, L., & Worku, T. (2017). Hydrological modelling of ungauged urban watershed using SWAT model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(2), 693–702. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0328-6>
- Stiyanto, E., Suharnoto, Y., & Sapei, A. (2015). Development of Paddy Field Module for Analysis Water Yield by using SWAT Program. In *Asian Journal of Applied Sciences*. www.ajournalonline.com
- Strahler, A. N. (1964). *Quantitative Geomorphology of Drainage Basin and Channel Networks*. In Chow, V.T. (ed.) *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129764714>
- Sujarwo, M. W., Indarto, I., Wiratama, E., & Teguh, B. (2019). Assesment of morphometric and hydrological properties of smalls watersheds in East Java Regions. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(2), 97–110. <https://doi.org/10.5614/jts.2019.26.2.2>
- Sunaedi, N., Hadi, S. P., & Bambang, A. N. (2022). Payment for Environmental Services in Indonesia: Mutually Beneficial Watershed Environmental Management Model. *Nature Environment and Pollution Technology*, 21(4), 1995–2004. <https://doi.org/10.46488/nept.2022.v21i04.054>
- Triany, N., Burhannudinnur, M., Jannah, A. A. F., Syaifullah, K. A., Ajiwijaya, T., Yuda, H. F., Nuryana, S. D., & Benyamin. (2024). Morphometric Analysis for Sustainable River Management: A Case Study of Ciujung Watershed, Banten, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 500. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450002021>
- Trimaharani, S. (2024). *Analisis Ketersediaan Air pada Sub DAS Padang Besi Menggunakan Metode Soil And Water Assesment Tool (SWAT)*. <https://drive.google.com/file/d/1dOW8GsUgM2iOQ0iZpTiWMEPqEEFQfE4K/view?usp=sharing>
- UNESCO, W. W. A. P. (2023). *Partnerships and cooperation for water The United Nations World Water Development Report 2023*. www.unwater.org.
- Utama, L., Mizwar, Z., & Prayitno, E. (2021). Perubahan Lahan Kritis Menjadi Lahan Hijau Sebagai Sumber Energi (Studi Kasus Das Arau Kota Padang). *Rekayasa Sipil*, 15, 175–184. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2021.015.03.3>
- Wardiman, D., Gas Ekaputra, E., & Yonariza, D. (2020). Simulasi Konservasi Lahan Kritis Terhadap Hasil Air (Water Yield) Daerah Aliran Sungai (DAS) Kuranji Menggunakan Model SWAT (Soil And Water Assesment Tool). *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 24(1), 76–84.

- Yuono, A. L., Putranto, D. D. A., & Tukirun, S. (2020). Effect of land use changes of upstream komering sub watershed on declining water availability. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 126–130. <https://doi.org/10.12911/22998993/116331>
- Zhu, Z., Mei, Z., Li, S., Ren, G., & Feng, Y. (2022). Evaluation of Ecological Carrying Capacity and Identification of Its Influencing Factors Based on Remote Sensing and Geographic Information System: A Case Study of the Yellow River Basin in Shaanxi. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land11071080>