

# Dinamika Debit Mata Air dalam Menghadapi Perubahan Iklim: Identifikasi Kerentanan dan Kerangka Konservasi Berkelanjutan

Andi Renata Ade Yudono\*, Dheliana Aprilia Dwi Lintang, Isma Khan'sa Maulia, dan Rohmatul Risqi Agustin

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, DIY, Indonesia; e-mail: [ade.yudono@upnyk.ac.id](mailto:ade.yudono@upnyk.ac.id)

## ABSTRAK

Mata air rentan terhadap perubahan iklim. Penelitian ini menganalisis dinamika debit dua mata air pada akuifer kontras, yaitu Cikahuripan di Karawang (celah-retakan muda, responsif) dan sistem Kali Nyetuk-Njero Uwik di Kulon Progo (batuan kompak, stabil), untuk mengidentifikasi kerentanan air pada 2024-2053. Metode mencakup scoring daerah imbuhan, proyeksi curah hujan dengan *Statistical Downscaling* (SDSM) skenario RCP 4.5, dan simulasi neraca air. Cikahuripan berinfiltrasi tinggi namun rentan fluktuasi antartahun, sedangkan Kali Nyetuk-Njero Uwik stabil tetapi berimbuhan terbatas. Berdasarkan kerentanan itu disusun kerangka konservasi berbasis alam spesifik lokasi dan rekomendasi kebijakan empat pilar untuk mendukung SDG 6 tentang air bersih dan sanitasi.

**Kata kunci:** mata air, perubahan iklim, kerentanan akuifer, solusi berbasis alam, kebijakan terintegrasi

## ABSTRACT

Springs are vulnerable to climate change. This study analyses the discharge dynamics of two springs on contrasting aquifers, Cikahuripan in Karawang (young fractured-fissure, responsive) and the Kali Nyetuk-Njero Uwik system in Kulon Progo (competent-rock, stable), to identify their water-quantity vulnerability over 2024-2053. The methods comprise recharge-area scoring, rainfall projection using the Statistical Downscaling Model (SDSM) under RCP 4.5, and water-balance discharge simulation. Cikahuripan shows high infiltration but interannual fluctuation, whereas Kali Nyetuk-Njero Uwik is stable but limited in recharge capacity. From this vulnerability, a location-specific nature-based-solutions conservation framework and four-pillar policy recommendations were developed to support Sustainable Development Goal 6 (SDG 6) on clean water and sanitation.

**Keywords:** springs, climate change, aquifer vulnerability, nature-based solutions, integrated policy

**Citation:** Yudono, A. R. A., Lintang, D. A. D., Maulia, I. K., dan Agustin, R. R. (2026). Dinamika Debit Mata Air dalam Menghadapi Perubahan Iklim: Identifikasi Kerentanan dan Kerangka Konservasi Berkelanjutan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 1010-1021, doi:10.14710/jil.24.4.1010-1021

## 1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim menjadi salah satu tantangan lingkungan yang berdampak langsung pada sumber daya air, termasuk mata air. Meningkatnya frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem seperti kekeringan dan hujan lebat mengubah pola ketersediaan air pada banyak wilayah. Mata air menjadi tumpuan air bersih bagi banyak komunitas pedesaan, sehingga kerentanannya terhadap perubahan iklim perlu dipahami melalui pendekatan yang berkelanjutan dan berbasis alam (Buma et al., 2024). Pemahaman atas karakteristik debit dan daerah tangkapan mata air menjadi dasar untuk menilai risiko yang timbul akibat pergeseran iklim.

Perubahan pola curah hujan dan suhu berpengaruh pada volume debit mata air, khususnya

pada sistem akuifer yang responsif terhadap masukan hujan. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat menurunkan ketersediaan air dan mengganggu keseimbangan ekosistem (Liu et al., 2024). Pengelolaan daerah tangkapan yang kurang tepat memperburuk kondisi tersebut, sehingga diperlukan pendekatan konservasi yang adaptif. Akan tetapi, penerapan strategi mitigasi berbasis alam masih terkendala lemahnya keterhubungan antara kebijakan dan praktik di lapangan (Alves et al., 2022).

Kajian yang secara khusus memproyeksikan dampak perubahan iklim terhadap debit mata air dalam jangka panjang masih terbatas (Penny et al., 2023). Sebagian besar kajian solusi berbasis alam juga masih memperlakukan akuifer secara seragam dan belum membedakan respons antartipe akuifer.

Padahal, akuifer celah-retakan muda yang responsif dan akuifer batuan kompak yang stabil memiliki mekanisme imbuhan dan pola pemunculan mata air yang berbeda, sehingga kerentanannya terhadap perubahan iklim pun tidak sama. Perbandingan langsung antara kedua tipe akuifer dalam satu kerangka proyeksi dan konservasi masih jarang dilakukan (Wingfield et al., 2021; Gebremichael et al., 2023). Celah inilah yang penelitian ini coba isi, dengan menautkan proyeksi iklim, respons debit, dan strategi konservasi pada dua tipe akuifer yang kontras.

Signifikansi penelitian ini berkaitan langsung dengan kualitas hidup masyarakat yang bergantung pada mata air (Sukmawati et al., 2023). Kebaruannya terletak pada tiga hal. Pertama, kerangka konservasi disusun spesifik menurut tipe akuifer, bukan secara umum, sehingga strategi untuk akuifer responsif berbeda dari strategi untuk akuifer stabil. Kedua, proyeksi curah hujan hasil *Statistical Downscaling* dipadukan dengan analisis neraca air untuk menilai respons debit jangka panjang. Ketiga, hasil proyeksi digunakan sebagai dasar penyusunan kebijakan pada wilayah dengan keterbatasan data. Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya memberikan panduan adaptasi lokal, tetapi juga menawarkan kerangka yang dapat diterapkan pada sistem akuifer heterogen di wilayah tropis lain.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik (tipe, klasifikasi, dan debit) serta daerah imbuhan kedua sistem mata air. Selanjutnya dilakukan proyeksi dinamika debit akibat dampak perubahan iklim pada periode 2024-2053 menggunakan *Statistical Downscaling* dan neraca air, sekaligus memetakan tingkat kerentanan dari masing-masing sistem akuifer. Berdasarkan hasil proyeksi dan identifikasi kerentanan tersebut, disusun kerangka

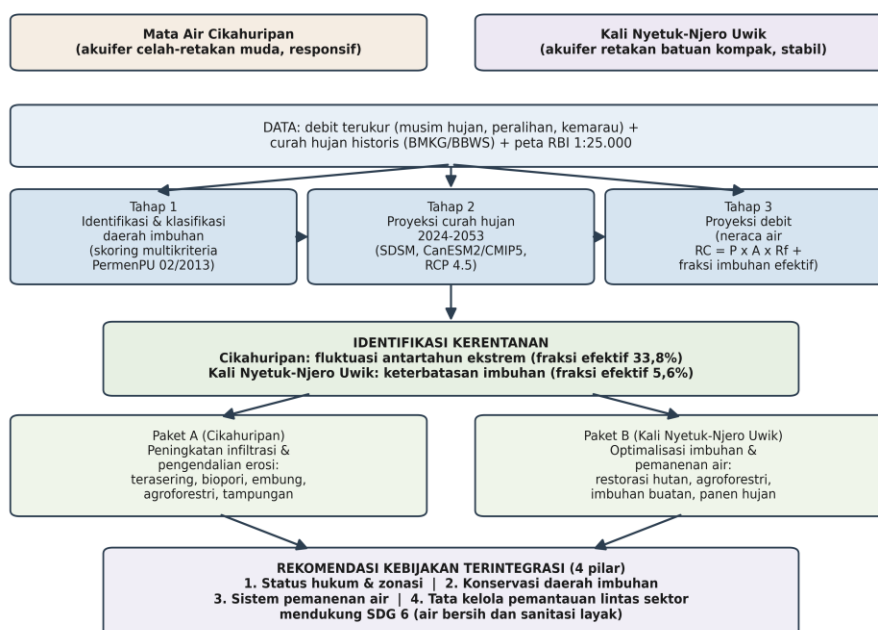
konservasi berkelanjutan yang spesifik pada lokasi berbasis *nature-based solutions*. Rangkaian analisis ini kemudian akan bermanfaat untuk melakukan perumusan rekomendasi kebijakan terintegrasi guna mendukung pengelolaan daerah tangkapan air secara berkelanjutan.

## 2. METODE PENELITIAN

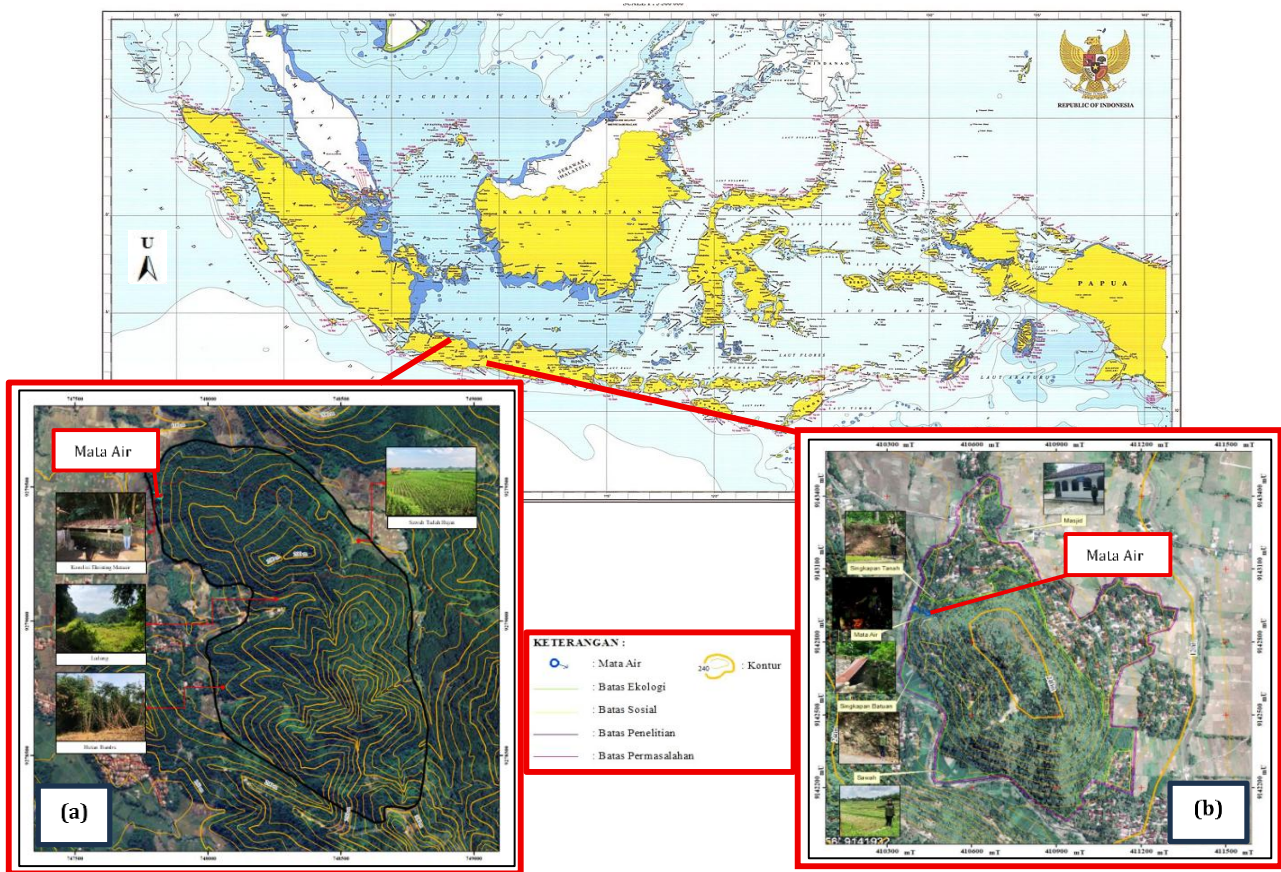
Penelitian ini menempuh alur analisis bertahap yang menautkan data masukan, proyeksi iklim, penilaian kerentanan, hingga perumusan strategi konservasi dan kebijakan. Keluaran setiap tahap menjadi masukan bagi tahap berikutnya. Hasil identifikasi daerah imbuhan dan proyeksi debit langsung menuntun pemilihan solusi berbasis alam yang sesuai untuk tiap tipe akuifer, yang selanjutnya diterjemahkan menjadi rekomendasi kebijakan. Gambaran menyeluruh tahapan tersebut disajikan pada **Gambar 1**.

### 2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada dua lokasi yang dipilih untuk mewakili variasi kondisi geomorfologi dan hidrogeologi yang memengaruhi debit mata air. Kedua lokasi mencakup tiga mata air. Mata Air Cikahuripan berada di Desa Cintawargi, Kecamatan Tegalwaru, Kabupaten Karawang, Jawa Barat, sedangkan Mata Air Kali Nyetuk dan Njero Uwik berada di Dusun Ngrancah, Kalurahan Pendoworejo, Kapanewon Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Peta lokasi dan tutupan lahan daerah imbuhan kedua sistem disajikan pada **Gambar 2**. Kali Nyetuk dan Njero Uwik diperlakukan sebagai satu sistem hidrogeologi karena berada pada tatanan akuifer dan daerah imbuhan yang sama.



**Gambar 1.** Diagram Alir Tahapan, dari Data Masukan hingga Rekomendasi Kebijakan



**Gambar 2.** Peta lokasi dan tutupan lahan daerah imbuhan. (a) Mata Air Cikahuripan, Karawang; (b) sistem Mata Air Kali Nyetuk-Njero Uwik, Kulon Progo

Lokasi pertama, Karawang, dicirikan oleh perbukitan denudasional dengan lereng curam (15-55%) dan batuan andesit-basalt yang membentuk akuifer celah-retakan. Kemiringan lereng yang besar meningkatkan aliran permukaan dan menurunkan laju infiltrasi, sehingga debit mata air sensitif terhadap variasi curah hujan dan berfluktuasi tajam antarmusim (Gambar 2a).

Lokasi kedua, Kulon Progo, berkembang pada perbukitan terisolasi yang tersusun oleh Formasi Andesit Tua (Kebobutak) yang kompak dan resisten. Mata air muncul sebagai mata air gravitasi pada zona tekuk lereng. Sifat batuan yang tua dan kompak mendorong aliran air tanah yang lebih dalam dan stabil sehingga debit relatif tetap sepanjang tahun (*perennial*), tetapi kapasitas imbuhan terbatas (Gambar 2b).

Perbandingan kedua lokasi memungkinkan identifikasi kerentanan pada dua tipe sistem akuifer yang berbeda. Karawang mewakili sistem responsif dengan debit dinamis yang rentan terhadap anomali iklim jangka pendek, sedangkan Kulon Progo mewakili sistem stabil yang rentan terhadap keterbatasan imbuhan dalam jangka panjang.

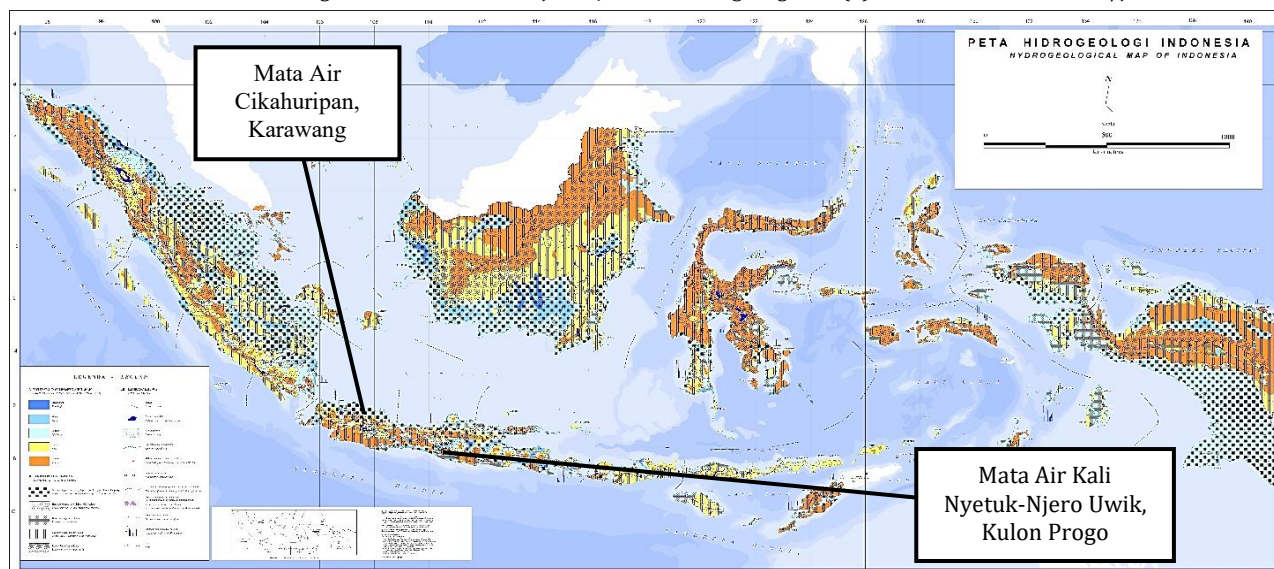
## 2.2. Kondisi Hidrogeologi Daerah Penelitian

Sebelum menganalisis karakteristik dan daerah imbuhan, penting dipahami tatanan hidrogeologi kedua lokasi karena tatanan tersebut mengendalikan mekanisme imbuhan dan pemunculan mata air.

Kedudukan kedua lokasi pada peta hidrogeologi Indonesia disajikan pada **Gambar 3**.

Di Karawang, akuifer terbentuk pada batuan vulkanik andesit-basalt yang mengalami rekahan. Air tanah tersimpan dan mengalir melalui jaringan celah dan retakan, sehingga kemampuan menyimpan air sangat bergantung pada kerapatan dan keterhubungan rekahan. Pada lapisan tak jenuh dengan solum tanah 3,2-3,9 m, aliran antara (*interflow*) menjadi sumber utama debit. Sistem seperti ini memberi respons cepat terhadap hujan, tetapi juga cepat surut pada musim kemarau. Pada peta hidrogeologi, kawasan perbukitan Sanggabuana tergolong akuifer dengan produktivitas rendah hingga setempat produktif melalui aliran rekahan.

Di Kulon Progo, akuifer berkembang pada Formasi Andesit Tua yang kompak. Rekahan mikro pada batuan dalam menjadi jalur utama aliran dengan mekanisme transit air yang lambat. Akibatnya, debit lebih rendah namun stabil sepanjang tahun. Kompaknya batuan membatasi laju imbuhan, sehingga keberlanjutan ketersediaan air dalam jangka panjang menjadi isu kritis. Pada peta hidrogeologi, Perbukitan Kulon Progo tergolong akuifer produktivitas rendah dengan aliran melalui rekahan pada batuan kompak. Pola aliran melalui rekahan pada batuan vulkanik dengan daerah imbuhan pada elevasi lebih tinggi ini sejalan dengan temuan pada mata air vulkanik lain di Indonesia (Simpén et al., 2025).



**Gambar 3.** Kedudukan Kedua Lokasi Penelitian pada Peta Hidrogeologi Indonesia

**Tabel 1.** Variabel, Skor, dan Bobot Parameter Analisis Daerah Imbuhan Air Tanah

| Parameter         | Klasifikasi            | Deskripsi             | Skor | Bobot |
|-------------------|------------------------|-----------------------|------|-------|
| Curah Hujan       | >3000 mm/th            | Sangat tinggi         | 5    | 30%   |
|                   | 2000-3000 mm/th        | Tinggi                | 4    |       |
|                   | 1000-2000 mm/th        | Sedang                | 3    |       |
|                   | 500-1000 mm/th         | Rendah                | 2    |       |
| Kemiringan Lereng | <500 mm/th             | Sangat rendah         | 1    | 15%   |
|                   | <5%                    | Datar                 | 5    |       |
|                   | 5-20%                  | Landai                | 4    |       |
|                   | 20-40%                 | Bergelombang          | 3    |       |
| Penggunaan Lahan  | 40-60%                 | Curam                 | 2    | 40%   |
|                   | >60%                   | Sangat curam          | 1    |       |
|                   | Hutan                  | Sangat tinggi         | 5    |       |
|                   | Semak belukar          | Tinggi                | 4    |       |
| Tekstur Tanah     | Ladang, kebun campuran | Sedang                | 3    | 15%   |
|                   | Sawah, tambak, rawa    | Rendah                | 2    |       |
|                   | Permukiman             | Sangat rendah         | 1    |       |
|                   | Pasir                  | Infiltrasi besar      | 5    |       |
|                   | Pasir berlempung       | Infiltrasi agak besar | 4    |       |
|                   | Lempung berpasir       | Infiltrasi sedang     | 3    |       |
|                   | Lempung berpasir halus | Infiltrasi agak kecil | 2    |       |
|                   | Lempung                | Infiltrasi kecil      | 1    |       |

Sumber: Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 02/PRT/M/2013

### 2.3. Metode Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui survei lapangan dan studi literatur, terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer berupa debit mata air yang diukur secara berkala pada musim hujan, peralihan, dan kemarau untuk menangkap variasi temporal. Pengukuran menggunakan metode volumetrik sebagaimana lazim diterapkan pada kajian mata air (Sukmawati et al., 2023):

$$Q = \frac{v}{t}$$

Keterangan:

Q = Debit mata air (m<sup>3</sup>/detik)

v = Volume wadah (m<sup>3</sup>)

t = Waktu pengisian wadah hingga penuh (detik).

Data sekunder mencakup data curah hujan historis dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) serta Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS). Data curah hujan ini menjadi dasar kalibrasi model untuk proyeksi iklim dengan horizon 30 tahun ke

depan (2024-2053). Rekaman harian bersumber dari Stasiun Citeko untuk Mata Air Cikahuripan (periode 1998-2023, sebanyak 9.496 hari) dan Stasiun Plaosan milik BBWS Serayu Opak untuk sistem Kali Nyetuk-Njero Uwik, yang dilengkapi data curah hujan bulanan Kapanewon Girimulyo periode 2013-2022. Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1:25.000 digunakan sebagai peta dasar untuk pemetaan dan analisis spasial. Aspek kualitas air disinggung hanya sebagai konteks perlindungan sumber daya dan tidak menjadi fokus analisis pada naskah ini, sesuai ruang lingkup keempat tujuan penelitian yang berpusat pada kuantitas air.

### 2.4. Metode Analisis

Analisis dilakukan secara berurutan, dengan keluaran satu tahap menjadi masukan bagi tahap berikutnya.

#### a. Identifikasi dan Klasifikasi Daerah Imbuhan

Daerah imbuhan diidentifikasi melalui skoring dan pembobotan empat parameter yang mengacu pada Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 02/PRT/M/2013, yaitu curah hujan (bobot 30%), kemiringan lereng (bobot 15%), penggunaan lahan (bobot 40%), dan tekstur tanah (bobot 15%). Pendekatan skoring dan pembobotan multikriteria untuk delineasi zona imbuhan pada akuifer vulkanik telah digunakan pada berbagai kajian terkini, termasuk pada akuifer vulkanik di Cekungan Air Tanah Yogyakarta-Sleman (Razi et al., 2024). Setiap parameter diberi skor sesuai pengaruhnya terhadap imbuhan: skor tinggi untuk karakteristik yang mendukung infiltrasi (hutan, lereng landai, tekstur kasar) dan skor rendah untuk yang menghambat (lahan terbangun, lereng terjal, tekstur liat). Hasil tumpang susun (*overlay*) keempat peta parameter menghasilkan peta zona imbuhan air tanah yang diklasifikasikan menurut tingkat kesesuaian. Rincian variabel, skor, dan bobot disajikan pada **Tabel 1**.

#### b. Proyeksi Curah Hujan dengan Statistical Downscaling

Proyeksi curah hujan menggunakan *Statistical Downscaling Model* (SDSM), yaitu model prediktor-prediktor yang menghubungkan keluaran model iklim global berskala besar dengan variabel iklim lokal (Wilby dan Dawson, 2007; Singh et al., 2023). Model iklim global yang digunakan adalah *Canadian Earth System Model* versi 2 (CanESM2) dari CMIP5 pada skenario *Representative Concentration Pathways* (RCP) 4.5, yaitu skenario emisi moderat yang diperkirakan mencapai puncak sekitar 2040 dan menurun bertahap. Perlu ditegaskan bahwa angka 30 tahun pada penelitian ini merujuk pada horizon proyeksi (2024-2053), bukan panjang rekaman historis. Panjang rekaman untuk kalibrasi mengikuti ketersediaan data pada rentang standar analisis iklim, yang lazimnya berkisar sekitar tiga dekade; sebagai pembandingan, Faquseh et al. (2024) menggunakan basis data 1990-2020 dan Sahu et al. (2024) memakai rekaman 40 tahun. Untuk Cikahuripan, kalibrasi memakai rekaman harian Stasiun Citeko 1998-2023 (26 tahun) yang berada dalam rentang standar tersebut. Untuk Kali Nyetuk-Njero Uwik, rekaman harian Stasiun Plaosan lebih pendek sehingga hasil proyeksinya diperlakukan dengan lebih hati-hati; proyeksi debit mata air pada kondisi data terbatas seperti ini juga telah dilakukan oleh Kovács et al. (2025) dan Zeydalinejad et al. (2025). Keluaran tahap ini berupa seri curah hujan harian terproyeksi untuk 30 tahun ke depan (2024-2053) yang menjadi masukan pemodelan debit, mengikuti pendekatan yang lazim menghubungkan proyeksi iklim ke model hidrologi (Gebremichael et al., 2023). Pendekatan serupa yang memadukan proyeksi model iklim dengan pemodelan debit mata air telah diterapkan pada berbagai tatanan akuifer (Kovács et al., 2025; Faquseh et al., 2024).

#### c. Proyeksi Debit dengan Pendekatan Neraca Air

Debit terproyeksi disimulasikan berdasarkan hubungan antara curah hujan sebagai masukan dan debit sebagai keluaran. Untuk kondisi data terbatas digunakan estimasi debit sederhana dengan nilai imbuhan dihitung memakai formula Todd dan Mays (2005):

$$RC = P \times A \times Rf$$

Keterangan:

RC = Imbuhan (m<sup>3</sup>/tahun)

P = Curah hujan tahunan (mm/tahun)

A = Luas daerah imbuhan (m<sup>2</sup>)

Rf = Faktor imbuhan (%)

Faktor imbuhan ditetapkan 14% (0,14) untuk kedua lokasi dengan justifikasi hidrogeologis berikut. Kali Nyetuk-Njero Uwik berkembang pada Formasi Andesit Tua (Kebobutak) yang tergolong batuan vulkanik tua per definisi geologis Van Bemmelen (1949) dan Rahardjo dkk. (1995). Kondisi ini sesuai langsung dengan klasifikasi SNI 19-6728.1-2002 untuk akuifer vulkanik tua di Jawa dengan curah hujan sekitar 3.100 mm/tahun, yang memiliki Rf 14% (**Tabel 2**). Cikahuripan berada pada kaki kompleks Gunung Sanggabuana dengan batuan andesit-basalt yang mengalami rekahan (Achdan dan Sudana, 1992). Karakter hidrogeologisnya, yaitu aliran melalui rekahan pada batuan padat dengan permeabilitas rendah, lebih dekat kepada perilaku vulkanik tua daripada vulkanik piroklastik resen; nilai 14% dipilih sebagai estimasi konservatif yang tetap berada dalam rentang wajar untuk akuifer batuan vulkanik pada **Tabel 2**. Luas daerah imbuhan yang dimasukkan pada rumus adalah zona dengan kelas kesesuaian yang mendukung resapan, yaitu 446.369 m<sup>2</sup> untuk Cikahuripan dan 753.778 m<sup>2</sup> untuk Kali Nyetuk-Njero Uwik.

Setelah nilai imbuhan diperoleh, ditentukan fraksi imbuhan efektif, yaitu bagian dari imbuhan yang muncul kembali sebagai debit mata air. Fraksi ini dihitung dengan membandingkan debit terukur pada tiga waktu pengukuran terhadap nilai imbuhan pada waktu yang sama, kemudian dirata-ratakan. Nilai inilah yang menjadi dasar konversi imbuhan terproyeksi menjadi debit terproyeksi. Dengan cara ini, Rf 14% berperan sebagai faktor imbuhan awal, sedangkan fraksi imbuhan efektif mencerminkan karakteristik pemunculan mata air di tiap lokasi, sehingga nilainya berbeda antarlokasi meskipun Rf awalnya sama.

Konsekuensi metodologis penting dari pendekatan ini adalah bahwa proyeksi debit tidak peka terhadap pemilihan Rf. Karena Rf dan A muncul baik pada perhitungan imbuhan terproyeksi ( $P \times A \times Rf$ ) maupun pada perhitungan fraksi imbuhan efektif (debit terukur dibagi  $P \times A \times Rf$ ), keduanya saling menghilangkan pada operasi akhir. Uji sensitivitas numerik pada rentang Rf 8-50% (**Tabel 7**) menunjukkan bahwa debit terproyeksi tetap identik dengan variasi kurang dari 0,001 L/det. Pilihan Rf 14% karenanya lebih berperan sebagai konstanta

perantara berbasis klasifikasi baku, bukan sebagai parameter yang mengendalikan hasil proyeksi

**Tabel 2.** Persentase Imbuhan Berdasarkan Jenis Akuifer dan Curah Hujan

| Jenis Akuifer                                                | Lokasi      | Curah Hujan (mm/tahun) | Rf (%) |
|--------------------------------------------------------------|-------------|------------------------|--------|
| Vulkanik resen                                               | Jawa        | 2206                   | 30     |
|                                                              | Jawa Barat  | 2500                   | 50     |
|                                                              | Jawa Tengah | 3500                   | 50     |
|                                                              | Jawa Tengah | 2500                   | 36     |
| Campuran vulkanik dan sedimen                                | Jawa Tengah | 2400                   | 11     |
|                                                              | Jawa Timur  | 1997                   | 27     |
|                                                              | Jawa Tengah | 3500                   | 33     |
| Vulkanik tua<br>Sedimen tersier<br>(lempung, pasir, gamping) | Jawa        | 3100                   | 14     |
|                                                              | Jawa        | 3400                   | 7      |
|                                                              | Jawa Barat  | 3098                   | 15     |

Sumber: SNI 19-6728.1-2002

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Karakteristik dan Daerah Imbuhan

##### a. Tipe dan Klasifikasi Mata air

Ketiga mata air tergolong mata air gravitasi depresi yang muncul pada topografi menurun dan mengalir sepanjang tahun (perennial). Perbedaan mendasar terletak pada sistem akuifer dan respons hidrologinya. Cikahuripan berada pada akuifer celah-retakan muda yang responsif terhadap hujan. Debit terukurnya menurun seiring pergantian musim, dari 3,046 L/det pada musim hujan (November 2023), 2,092 L/det pada masa peralihan (Februari 2024), hingga 2,085 L/det pada musim kemarau (Mei 2024). Rentang debit antarmusim mencapai sekitar 1,0 L/det, yang menunjukkan variabilitas musiman yang besar. Sumber aliran utamanya adalah aliran antara pada lapisan tak jenuh dengan solum tanah 3,2-3,9 m.

Sebaliknya, Kali Nyetuk dan Njero Uwik berada pada akuifer retakan batuan kompak. Debit kedua mata air lebih rendah dengan pola yang berbeda. Kali Nyetuk sangat kecil, berkisar 0,015-0,090 L/det, sedangkan Njero Uwik lebih besar dan lebih responsif terhadap hujan, berkisar 0,33 L/det pada musim kemarau hingga 1,39 L/det pada musim hujan. Aliran bersumber dari retakan mikro pada batuan dalam

dengan transit air yang lambat, sehingga secara sistem responsnya terhadap hujan tetap lebih moderat dibandingkan Cikahuripan. Perbandingan karakteristik kedua sistem disajikan pada **Tabel 3**.

##### b. Daerah Imbuhan

Evaluasi daerah imbuhan menunjukkan kontras hidro-geomorfologi. Daerah imbuhan Cikahuripan memiliki luas total 901.951 m<sup>2</sup> (sekitar 90,2 ha) dan didominasi hutan bambu seluas 799.743 m<sup>2</sup> (88,7%), diikuti ladang (82.811 m<sup>2</sup>), sawah tadah hujan (15.749 m<sup>2</sup>), dan permukiman (3.649 m<sup>2</sup>). Kapasitas infiltrasinya tinggi (rata-rata 43,6 cm/jam), tetapi topografinya curam (71,2% area berlereng lebih dari 40%) sehingga sebagian besar hujan menjadi aliran permukaan. Klasifikasi kesesuaian menghasilkan kategori cukup sesuai (49,49%, seluas 446.369 m<sup>2</sup>), kurang sesuai (49,17%), dan tidak sesuai (1,34%). Zona cukup sesuai inilah yang digunakan sebagai daerah imbuhan efektif dalam neraca air. Infiltrasi bervariasi menurut tutupan lahan, dengan hutan bervegetasi (55,6 cm/jam) lebih tinggi daripada ladang (41,8 cm/jam) maupun lahan tanpa vegetasi (33,4 cm/jam). Pola ini menegaskan peran vegetasi dalam meningkatkan resapan, sekaligus mendukung temuan bahwa tutupan pohon dengan kerapatan menengah dapat memaksimalkan imbuhan air tanah pada wilayah tropis bermusim kering (Ilstedt et al., 2016; Kebede et al., 2024).

Daerah imbuhan Kali Nyetuk-Njero Uwik seluas 753.778 m<sup>2</sup> (sekitar 75,4 ha) didominasi semak belukar seluas 45,55 ha (62,19%), disertai permukiman (25,25 ha) dan sawah (2,45 ha). Distribusi lerengnya lebih landai (dominan 0-40%), sehingga aliran permukaan lebih kecil dan peresapan efektif lebih tinggi meskipun kapasitas infiltrasinya lebih rendah daripada Cikahuripan.

Kedua daerah memiliki kesamaan curah hujan 1.000-3.000 mm/tahun, tekstur lempung berpasir halus, dan faktor imbuhan 14%. Namun, strategi konservasinya berbeda. Cikahuripan menuntut konservasi vegetatif dan pengendalian erosi pada lereng curam, sedangkan Kali Nyetuk-Njero Uwik menuntut optimalisasi imbuhan dan manajemen air hujan. Ringkasan disajikan pada **Tabel 4**.

**Tabel 3.** Perbandingan Karakteristik Kedua Sistem Mata Air

| Parameter                | Cikahuripan (sistem dinamis)              | Kali Nyetuk & Njero Uwik (sistem stabil)        |
|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Tipe mata air            | Gravitasi depresi                         | Gravitasi depresi                               |
| Sistem akuifer utama     | Celah-retakan muda                        | Retakan dalam batuan kompak                     |
| Sumber aliran            | Aliran antara lapisan tak jenuh (0-3,9 m) | Akuifer retakan dalam ( $\pm 10$ m)             |
| Debit musim hujan        | 3,046 L/det                               | Kali Nyetuk 0,090; Njero Uwik 1,143 L/det       |
| Debit musim kemarau      | 2,085 L/det                               | Kali Nyetuk 0,015; Njero Uwik 0,33 L/det        |
| Rentang debit antarmusim | ~1,0 L/det (variabilitas musiman tinggi)  | kecil pada Kali Nyetuk; moderat pada Njero Uwik |
| Kelas debit (Meinzer)    | Kelas V                                   | Kelas V-VII                                     |
| Respons terhadap hujan   | Cepat dan ekstrem                         | Moderat dan stabil                              |

Sumber: Hasil olahan data, 2024

**Tabel 4.** Ringkasan Karakteristik Daerah Imbuhan

| Parameter                | Cikahuripan                                | Kali Nyetuk & Njero Uwik          |
|--------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| Luas daerah imbuhan      | 901.951 m <sup>2</sup> (~90,2 ha)          | 753.778 m <sup>2</sup> (~75,4 ha) |
| Daerah imbuhan efektif   | 446.369 m <sup>2</sup> (zona cukup sesuai) | 753.778 m <sup>2</sup>            |
| Curah hujan              | 1.000-3.000 mm/tahun                       | 1.000-3.000 mm/tahun              |
| Penggunaan lahan dominan | Hutan bambu (88,7%; ~80 ha)                | Semak belukar (62,19%; 45,55 ha)  |
| Kemiringan lereng        | Dominan curam (40-60%)                     | Dominan landai (0-40%)            |
| Kapasitas infiltrasi     | Tinggi (rata-rata 43,6 cm/jam)             | Sedang (15-20 cm/jam)             |
| Klasifikasi kesesuaian   | Cukup sesuai (49,49%)                      | Baik dan sedang                   |

Sumber: Hasil olahan data, 2024

### 3.2. Proyeksi Dinamika Debit 2024-2053

Proyeksi 30 tahun (2024-2053) menggunakan SDSM pada skenario RCP 4.5. Hasilnya disajikan pada **Gambar 4**. Fraksi imbuhan efektif dihitung dari perbandingan debit terukur terhadap nilai imbuhan pada tiga waktu pengukuran, lalu dirata-ratakan. Untuk Cikahuripan diperoleh 33,797% dan untuk Kali Nyetuk-Njero Uwik 5,557% (**Tabel 5**). Fraksi inilah yang mengubah imbuhan terproyeksi menjadi debit terproyeksi.

**Tabel 5.** Perbandingan Debit Mata Air Terukur dengan Nilai Imbuhan untuk Penentuan Fraksi Imbuhan Efektif

| Lokasi                 | Debit terukur (L/det) | Imbuhan (L/det) | Persentase (%) |
|------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|
| Cikahuripan            | 3,046                 | 7,328           | 41,567         |
|                        | 2,092                 | 6,982           | 29,963         |
|                        | 2,085                 | 6,982           | 29,863         |
|                        | Rata-rata             |                 | 33,797         |
| Kali Nyetuk-Njero Uwik | tiga pengukuran       | Rata-rata       | 5,557          |

Sumber: Hasil olahan data, 2024

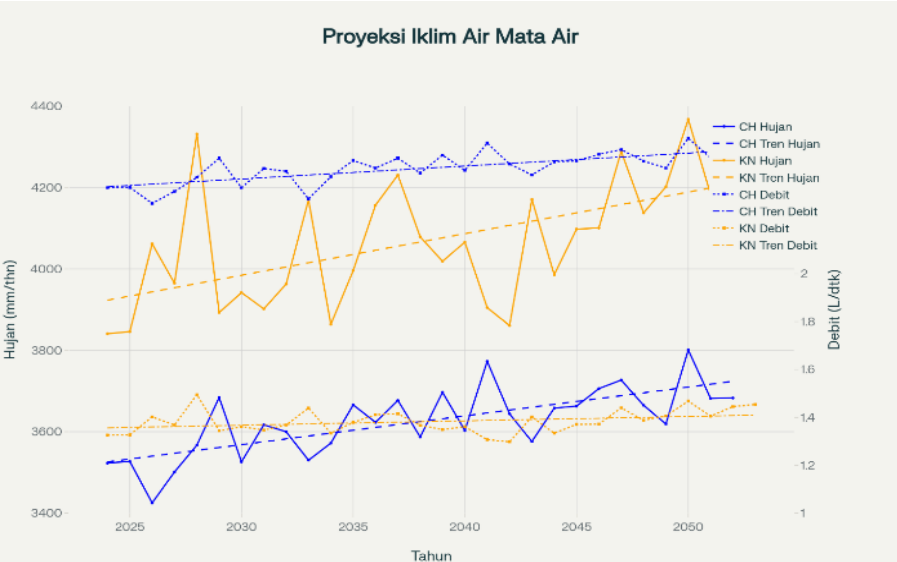
Pada Cikahuripan, curah hujan tahunan diproyeksikan meningkat moderat dari 3.523 menjadi 3.683 mm/tahun (naik 4,5%). Debit terproyeksi meningkat dari 2,360 L/det (2024) menjadi 2,467 L/det (2053), dengan debit minimum 2,294 L/det pada 2026 dan maksimum 2,546 L/det pada 2051. Sistem akuifer yang responsif menghasilkan fluktuasi antartahun sekitar 0,252 L/det (sekitar 11% dari rata-rata). Fraksi imbuhan efektif yang tinggi (33,8%) sejalan dengan kapasitas infiltrasi hutan bambu dan dominasi aliran antara. Implikasinya, diperlukan infrastruktur tampungan untuk meredam fluktuasi dan mengantisipasi periode defisit.

Pada Kali Nyetuk-Njero Uwik, curah hujan diproyeksikan meningkat lebih besar dari 3.841 menjadi 4.213 mm/tahun (naik 9,7%). Debit sistem terproyeksi berkisar 0,666 L/det (minimum, 2024) hingga 0,757 L/det (maksimum, 2050), dengan fluktuasi antartahun hanya 0,091 L/det (sekitar 13,7% dari nilai terendah). Nilai ini konsisten dengan debit lapangan yang kecil pada kedua mata air. Fraksi imbuhan efektif hanya 5,557%, jauh lebih rendah

daripada Cikahuripan, mencerminkan keterbatasan kapasitas imbuhan pada batuan kompak, sehingga diperlukan strategi pemanenan air hujan dan imbuhan buatan.

Fraksi imbuhan efektif berbeda dari faktor imbuhan awal  $R_f$  14% yang digunakan pada rumus. Fraksi efektif diturunkan dari perbandingan debit terukur dengan imbuhan, sehingga mencerminkan kondisi nyata pemunculan mata air di tiap lokasi. Perbedaan tajam antara 33,8% dan 5,6% menegaskan kontras antara sistem berinfiltrasi tinggi di Cikahuripan dan sistem berimbuhan rendah di Kulon Progo. Temuan bahwa kenaikan curah hujan tidak serta-merta menaikkan debit secara proporsional sejalan dengan kajian pada Cekungan Air Tanah Bandung, yang memperlihatkan bahwa imbuhan air tanah jauh kurang responsif terhadap perubahan curah hujan dibandingkan komponen permukaan, karena dibatasi oleh kapasitas tampung tanah dan sifat bawah permukaan (Rusli et al., 2024). Pola serupa terlihat pada kajian di Kota Surakarta, tempat imbuhan air tanah menurun seiring perubahan tutupan lahan akibat urbanisasi meskipun proyeksi curah hujan meningkat (Sulistiani et al., 2025).

Perlu ditekankan bahwa akurasi penurunan skala pada tingkat curah hujan harian rendah, dengan  $R^2$  rata-rata 0,024 (galat baku 13,117) untuk kalibrasi Citeko dan 0,037 (galat baku 14,466) untuk kalibrasi Plaosan. Nilai ini lazim ditemukan pada *Statistical Downscaling* curah hujan harian karena kejadian hujan harian bersifat diskret dan sulit direproduksi. Mengacu pada kriteria evaluasi model Moriasi et al. (2007), keluaran model sebaiknya dinilai pada agregasi bulanan hingga tahunan, bukan pada tingkat harian. Oleh karena itu, proyeksi pada penelitian ini diperlakukan sebagai skenario arah perubahan, bukan ramalan deterministik, dan digunakan pada skala bulanan-musiman. Pilihan menggunakan seluruh rekaman untuk kalibrasi pada kondisi data terbatas juga ditempuh oleh Kovács et al. (2025). Rendahnya  $R^2$  harian dicantumkan sebagai keterbatasan penelitian. Ringkasan proyeksi dan kerentanan disajikan pada **Tabel 6**.



Gambar 4. Proyeksi Curah Hujan dan Debit Mata Air Periode 2024-2053 (Skenario RCP 4.5)

Tabel 6. Ringkasan Proyeksi Debit dan Kerentanan 2024-2053 (Skenario RCP 4.5)

| Karakteristik              | Cikahuripan (sistem dinamis)                 | Kali Nyetuk & Njero Uwik (sistem stabil) |
|----------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Tipe akuifer               | Celah-retakan muda, responsif                | Retakan batuan kompak, imbuhan terbatas  |
| Proyeksi curah hujan       | Naik 4,5% (3.523→3.683 mm/tahun)             | Naik 9,7% (3.841→4.213 mm/tahun)         |
| Proyeksi debit             | 2,360→2,467 L/det                            | 0,666→0,757 L/det (sistem gabungan)      |
| Fluktuasi debit antartahun | 0,252 L/det (~11% rata-rata)                 | 0,091 L/det (~13,7% nilai terendah)      |
| Fraksi imbuhan efektif     | 33,8% (tinggi, aliran permukaan dominan)     | 5,6% (rendah, kapasitas terbatas)        |
| Kerentanan utama           | Fluktuasi antartahun yang ekstrem            | Keterbatasan kapasitas imbuhan           |
| okus adaptasi              | Infrastruktur tampungan & pengendalian erosi | Pemanenan air hujan & imbuhan buatan     |

Sumber: Hasil olahan data, 2024

Uji sensitivitas dilakukan untuk memverifikasi bahwa hasil proyeksi tidak bergantung pada pilihan nilai Rf. Perhitungan dilakukan dengan mengulang seluruh alur, mulai dari perhitungan imbuhan, fraksi imbuhan efektif, hingga proyeksi debit tahun 2024, pada rentang Rf 8-30%. Hasilnya disajikan pada **Tabel 7**. Pada semua nilai Rf yang diuji, imbuhan berubah secara proporsional (naik) sedangkan fraksi imbuhan efektif berubah secara terbalik-proporsional (turun), sehingga hasil kalinya, yaitu debit proyeksi, tetap identik. Temuan ini menegaskan bahwa Rf berperan sebagai parameter perantara yang dikalibrasi ulang secara implisit oleh fraksi imbuhan efektif, dan hasil proyeksi debit sepenuhnya dikendalikan oleh rasio debit-hujan pengukuran serta proyeksi curah hujan.

Tabel 7. Uji Sensitivitas Debit Proyeksi 2024 (Cikahuripan) Terhadap Variasi Rf

| Rf (%)    | Imbuhan (L/det) | Fraksi Efektif (%) | Q Proyeksi 2024 (L/det) |
|-----------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| 8         | 3,987           | 59,145             | 2,358                   |
| 10        | 4,983           | 47,316             | 2,358                   |
| 14        | 6,976           | 33,797             | 2,358                   |
| (dipakai) |                 |                    |                         |
| 18        | 8,97            | 26,287             | 2,358                   |
| 22        | 10,963          | 21,507             | 2,358                   |
| 30        | 14,949          | 15,772             | 2,358                   |

Sumber: Hasil olahan data, 2024. Perhitungan menggunakan  $A = 446.369 \text{ m}^2$ ,  $P$  proyeksi 2024 = 3,523 m/tahun, dan tiga pasangan pengukuran (Q, imbuhan) dari Nov 2023, Feb 2024, Mei 2024

3.3. Kerangka Konservasi Berkelanjutan Berbasis Solusi Berbasis Alam

Solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) memanfaatkan proses dan ekosistem alami untuk meningkatkan ketahanan air. Prinsip yang dianut mencakup penyesuaian dengan karakteristik hidrogeologi setempat, keterpaduan manfaat hidrologis dan ekologis, keberlanjutan jangka panjang, serta pelibatan masyarakat. Tinjauan sistematis terhadap penerapan solusi berbasis alam untuk imbuhan air tanah menunjukkan bahwa efektivitasnya sangat ditentukan oleh kesesuaian tipe intervensi dengan kondisi hidrogeologi (Kebede et al., 2024). Berdasarkan analisis kerentanan, disusun dua paket strategi yang spesifik lokasi.

a. Paket A: Mata Air Cikahuripan (peningkatan infiltrasi dan reduksi aliran permukaan)

Paket A berfokus pada peningkatan infiltrasi dan pengurangan aliran permukaan pada seluruh daerah imbuhan seluas sekitar 90 ha. Tutupan hutan bambu yang mendominasi (sekitar 80 ha, yaitu 88,7% dari daerah imbuhan) dipelihara melalui pemanenan lestari. Pada bagian lereng curam diterapkan terasering, guludan kontur, lubang resapan biopori, dan bangunan penahan sedimen. Pengendalian erosi ini penting karena intensitas hujan yang tinggi pada lahan berlereng dapat memicu laju erosi yang besar (Romizah et al., 2023). Restorasi vegetasi riparian di

sepanjang alur sungai serta penanaman agroforestri berlapis pada bagian ladang menambah tutupan yang mendukung resapan. Infrastruktur tampungan berbasis alam berupa embung dan kolam imbuhan buatan skala kecil ditempatkan untuk meredam fluktuasi debit antarmusim. Target intervensi dinyatakan secara relatif, yaitu meningkatkan infiltrasi efektif beberapa persen dan menstabilkan debit musim kemarau, bukan dalam bentuk penambahan debit absolut. Besaran capaian bersifat indikatif dan perlu diverifikasi melalui pemantauan pilot.

b. *Paket B: Mata Air Kali Nyetuk dan Njero Uwik (optimalisasi imbuhan dan pemanenan air)*

Paket B berfokus pada optimalisasi imbuhan dan pemanenan air. Restorasi hutan alami diterapkan pada 30-50% area semak belukar, yaitu sekitar 14-23 ha dari total semak belukar seluas 45,55 ha, menggunakan jenis pohon asli untuk memperpanjang aliran dasar pada musim kemarau. Restorasi hutan pada lahan terdegradasi bersolum dalam dengan musim kemarau yang tegas berpeluang meningkatkan imbuhan dan aliran musim kemarau ketika perolehan infiltrasi melampaui peningkatan penggunaan air oleh vegetasi (Bruijnzeel et al., 2025). Agroforestri multistrata pada sebagian lahan marginal memadukan pohon kayu, pohon buah, dan tanaman penutup tanah sekaligus mendukung pendapatan petani. Sistem agroforestri terbukti meningkatkan retensi lengas tanah dan imbuhan akuifer pada lembah semi-kering (Pulido-Esquivel et al., 2025). Zona riparian di sepanjang alur utama direstorasi untuk memperkaya aliran dasar. Untuk memanfaatkan kelebihan air pada musim hujan, diterapkan pemanenan air hujan skala rumah tangga dan komunitas, imbuhan buatan pada zona permeabel, serta sistem penyimpanan terdistribusi. Kombinasi pemanenan air hujan dan imbuhan akuifer terkelola seperti ini terbukti meningkatkan ketersediaan air tanah pada wilayah yang mengalami tekanan kekeringan (Abd-Elaty et al., 2024). Sebagaimana Paket A, target dinyatakan secara relatif dan proporsional terhadap debit dasar, serta bersifat indikatif hingga terbukti melalui pemantauan.

Kedua paket dilengkapi pemantauan berkala terhadap debit, kapasitas infiltrasi, dan tutupan vegetasi untuk mendukung pengelolaan adaptif. Seluruh luasan intervensi pada kedua paket berada di dalam batas daerah imbuhan masing-masing lokasi, sehingga proporsional dengan kondisi lapangan.

### 3.4. Perbandingan dengan Studi Terdahulu

Kontras respons antara akuifer responsif Cikahuripan dan akuifer stabil Kali Nyetuk-Njero Uwik sejalan dengan temuan Liu et al. (2024) bahwa sensitivitas sumber daya air terhadap perubahan iklim sangat bergantung pada karakteristik media penyimpanannya. Temuan bahwa akuifer responsif menghasilkan debit tinggi tetapi berfluktuasi, sementara akuifer kompak menghasilkan debit rendah tetapi stabil, memperjelas bahwa kerentanan

tidak dapat dinilai hanya dari besarnya debit. Kajian pada mata air di Himalaya Timur juga menegaskan bahwa dinamika debit mata air dikendalikan oleh tatanan ekohidrologi dan hidrogeologi setempat, bukan semata oleh volume airnya (Kumar et al., 2024).

Pendekatan solusi berbasis alam yang spesifik lokasi pada penelitian ini melengkapi kajian terdahulu yang cenderung bersifat umum. Penny et al. (2023) dan Alves et al. (2022) menekankan bahwa efektivitas solusi berbasis alam sangat dipengaruhi oleh konteks lokal, sedangkan Wingfield et al. (2021) menyoroti hambatan kelembagaan dalam penerapannya. Hasil penelitian ini menambahkan tipe akuifer sebagai konteks yang menentukan pemilihan strategi konservasi.

Temuan ini juga sejalan dengan kajian terkini pada akuifer yang berbeda. Kovács et al. (2025) memproyeksikan debit mata air karst di kawasan Aggtelek, Hungaria, dan menemukan bahwa perubahan iklim cenderung mempertajam nilai ekstrem hidrologi, mirip dengan pola fluktuasi antartahun yang teramati pada Cikahuripan. Faquseh et al. (2024) menunjukkan pada sebuah sub-DAS di Palestina bahwa kenaikan curah hujan berkorelasi positif dengan debit mata air, konsisten dengan tren peningkatan debit yang diproyeksikan pada kedua lokasi penelitian ini. Pada konteks Indonesia, Kuntjoro et al. (2025) memodelkan kapasitas debit mata air vulkanik Ronggojalu di Jawa Timur di bawah skenario perubahan tutupan lahan dan menemukan debit yang sensitif terhadap pola hujan, sejalan dengan respons cepat yang teramati pada Cikahuripan. Casati et al. (2024) menganalisis tren debit mata air jangka panjang pada kawasan rawan perubahan iklim di Mediterania dan menekankan bahwa respons debit terhadap iklim bersifat spesifik-lokasi menurut tatanan hidrogeologinya. Sebaliknya, Sahu et al. (2024) mendokumentasikan penurunan debit mata air di Himalaya India akibat pergeseran pola hujan, yang menegaskan bahwa arah perubahan debit sangat bergantung pada konteks iklim dan hidrogeologi setempat. Kajian-kajian tersebut, seperti penelitian ini, bekerja pada kondisi data terbatas dan menegaskan pentingnya proyeksi berbasis skenario.

Dari sisi pemodelan, keterbatasan akurasi penurunan skala harian yang ditemukan konsisten dengan pengalaman Gebremichael et al. (2023) dan Singh et al. (2023), yang menunjukkan bahwa keandalan *Statistical Downscaling* lebih baik pada agregasi temporal yang lebih kasar. Hal ini memperkuat alasan penggunaan proyeksi pada skala bulanan-musiman. Dari sisi penilaian kerentanan, pendekatan berbasis indeks yang memadukan proses hierarki analitik dengan skenario iklim untuk wilayah dengan data terbatas, seperti dikembangkan Paul et al. (2025), sejalan dengan semangat identifikasi kerentanan yang ditempuh penelitian ini meskipun melalui jalur perhitungan yang berbeda.

### 3.5. Rekomendasi Kebijakan Terintegrasi

Rekomendasi kebijakan disusun dalam empat pilar. Pilar pertama menetapkan status hukum dan zonasi kuantitas air melalui penetapan daerah perlindungan mata air dengan zonasi berlapis serta pengintegrasian ke dalam rencana tata ruang wilayah. Pilar kedua menjaga daerah imbuhan melalui restorasi vegetasi dan agroforestri pada luasan yang konsisten dengan batas daerah imbuhan, yaitu sekitar 90 ha di Cikahuripan dan 75 ha di Kulon Progo, disertai insentif bagi kelompok tani hutan. Pilar ketiga membangun sistem pemanenan dan penyimpanan air melalui pemanenan air hujan, imbuhan buatan, dan penyimpanan terdistribusi; keberhasilan penerapan solusi berbasis alam untuk imbuhan seperti ini sangat bergantung pada karakteristik hidrogeologi dan kelembagaan setempat (Kebede et al., 2024). Pilar keempat menata kelola pemantauan lintas sektor melalui satuan tugas daerah tangkapan air dan sistem pemantauan neraca air untuk peringatan dini serta pengelolaan adaptif. Penguatan tata kelola air tanah lintas sektor berkontribusi langsung pada pencapaian SDG 6 tentang air bersih dan SDG 13 tentang aksi iklim (Nandi dan Swain, 2024). Landasan regulasinya mencakup Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air dan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 02/PRT/M/2013, serta peraturan terkait lainnya.

### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan dinamika debit dua sistem mata air dengan tipe akuifer yang kontras dalam menghadapi perubahan iklim. Pertama, dari sisi karakteristik dan daerah imbuhan, Cikahuripan merupakan sistem responsif pada akuifer celah-retakan muda dengan daerah imbuhan sekitar 90 ha berinfiltrasi tinggi, sedangkan Kali Nyetuk-Njero Uwik merupakan sistem stabil pada akuifer batuan kompak dengan daerah imbuhan sekitar 75 ha berimbuhan terbatas.

Kedua, proyeksi 2024-2053 menunjukkan curah hujan meningkat pada kedua lokasi (4,5% di Cikahuripan dan 9,7% di Kali Nyetuk-Njero Uwik) dengan kecenderungan debit yang meningkat. Debit Cikahuripan diproyeksikan berkisar 2,360-2,467 L/det, sedangkan debit sistem Kali Nyetuk-Njero Uwik berkisar 0,666-0,757 L/det. Kerentanan keduanya berbeda: Cikahuripan rentan terhadap fluktuasi antartahun meskipun fraksi imbuhan efektifnya tinggi (33,8%), sedangkan Kali Nyetuk-Njero Uwik lebih stabil tetapi rentan terhadap keterbatasan imbuhan (fraksi efektif hanya 5,6%).

Ketiga, berdasarkan kerentanan tersebut disusun kerangka konservasi berbasis solusi berbasis alam yang spesifik lokasi, yaitu paket peningkatan tampungan dan pengendalian erosi untuk Cikahuripan serta paket pemanenan air hujan dan imbuhan buatan untuk Kali Nyetuk-Njero Uwik, dengan luasan intervensi yang konsisten dengan batas daerah imbuhan.

Keempat, kerangka tersebut diterjemahkan ke dalam empat pilar kebijakan terintegrasi yang mencakup status hukum dan zonasi, konservasi daerah imbuhan, sistem pemanenan air, serta tata kelola pemantauan lintas sektor.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Proyeksi bergantung pada satu skenario iklim (RCP 4.5) dan satu model penurunan skala dengan akurasi curah hujan harian yang rendah, sehingga hasil bersifat skenario dan mengandung ketidakpastian. Panjang rekaman historis kedua stasiun berbeda, dengan rekaman harian Stasiun Plaosan yang lebih pendek daripada Stasiun Citeko sehingga proyeksi untuk Kali Nyetuk-Njero Uwik memiliki ketidakpastian yang lebih besar. Faktor imbuhan bersifat estimasi, dan target intervensi solusi berbasis alam masih perlu diverifikasi melalui pemantauan. Dengan mempertimbangkan keterbatasan tersebut, kerangka yang dihasilkan tetap dapat menjadi acuan adaptasi pada sistem akuifer heterogen dan mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan ke-6 (SDG 6) tentang air bersih dan sanitasi layak.

### DAFTAR PUSTAKA

- Arnia dan Warganegara. 2012. Identifikasi Kontaminasi Abd-Elaty, I., Kuriqi, A., Ahmed, A., Al-Maktoumi, A., Pugliese, L., & Zelenakova, M. (2024). Enhanced groundwater availability through rainwater harvesting and managed aquifer recharge in arid regions. *Applied Water Science*, 14, 121. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02166-7>
- Achdan, A., & Sudana, D. (1992). *Peta Geologi Lembar Karawang, Jawa*, skala 1:100.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Alves, P. B. R., Djordjević, S., & Javadi, A. A. (2022). Understanding the NEEDS for ACTING: An integrated framework for applying nature-based solutions in Brazil. *Water Science and Technology*, 85(4), 987-1010. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.513>
- Bruijnzeel, L. A., Peña-Arancibia, J. L., Sheil, D., Ziegler, A. D., Zhang, J., Zwartendijk, B. W., Birkel, C., Sun, G., Wang, Y., & Zhang, X. (2025). Potential for improved groundwater recharge and dry-season flows through forest landscape restoration on degraded lands in the tropics. *Forest Ecosystems*, 14(2), 100376. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2025.100376>
- Buma, B., Gordon, D. R., Kleisner, K. M., Bartuska, A., Bidlack, A., DeFries, R., Ellis, P., Friedlingstein, P., Metzger, S., Morgan, G., Novick, K., Sanchirico, J. N., Collins, J. R., Eagle, A. J., Fujita, R., Holst, E., Lavalley, J. M., Lubowski, R. N., Melikov, C., ... Hamburg, S. P. (2024). Expert review of the science underlying nature-based climate solutions. *Nature Climate Change*, 14(4), 402-406. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01960-0>
- Casati, T., Navarra, A., Filippini, M., & Gargini, A. (2024). Assessing the long-term trend of spring discharge in a climate change hotspot area. *Science of the Total Environment*, 957, 177498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177498>

- Faquseh, H., Shadeed, S., & Grossi, G. (2024). Impacts of climate change on groundwater in the Al-Badan sub-catchment, Palestine: Analyzing historical data and future scenarios. *Hydrology*, 11(10), 169. <https://doi.org/10.3390/hydrology11100169>
- Gebremichael, H. B., Raba, G. A., Beketie, K. T., Feyisa, G. L., & Anose, F. A. (2023). Projection of hydrological responses to changing future climate of Upper Awash Basin using QSWAT model. *Environmental Systems Research*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-023-00305-8>
- Ilstedt, U., Bargaúes Tobella, A., Bazié, H. R., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., Sanou, J., Benegas, L., Murdiyarso, D., Laudon, H., Sheil, D., & Malmer, A. (2016). Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports*, 6, 21930. <https://doi.org/10.1038/srep21930>
- Kebede, M. M., Kumar, M., Mekonnen, M. M., & Clement, T. P. (2024). Enhancing groundwater recharge through nature-based solutions: Benefits and barriers. *Hydrology*, 11(11), 195. <https://doi.org/10.3390/hydrology11110195>
- Kovács, A., Ilyés, C., Mohammed, M. A. A., & Szűcs, P. (2025). Assessing climate change impacts on spring discharge in data-sparse environments using a combined statistical-analytical method: An example from the Aggtelek Karst area, Hungary. *Water*, 17(17), 2507. <https://doi.org/10.3390/w17172507>
- Kumar, M., Sen, S., Kulkarni, H., Badiger, S., Varma, G. R., & Krishnaswamy, J. (2024). Ecohydrological and hydrogeological dynamics of groundwater springs in Eastern Himalaya, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 27, 101311. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101311>
- Kuntjoro, K., Santoso, I. B., Tatas, T., & Robbi, R. A. R. (2025). Modelling the discharge capacity of Ronggojalu Spring under land cover change scenarios. *Discover Water*, 5, 111. <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00288-w>
- Liu, M., Trugman, A. T., Peñuelas, J., & Anderegg, W. R. L. (2024). Climate-driven disturbances amplify forest drought sensitivity. *Nature Climate Change*, 14(7), 746-752. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02022-1>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., 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. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nandi, S., & Swain, S. (2024). Role of groundwater systems in fulfilling sustainable development goals: A focus on SDG6 and SDG13. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 42, 100576. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100576>
- Paul, A. R., Maity, R., & Majumder, M. (2025). Understanding climate change impacts on water resources through a combined vulnerability assessment method. *Sustainable Water Resources Management*, 11(5), 88. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01275-8>
- Penny, J., Alves, P. B. R., De-Silva, Y., Chen, A. S., Djordjević, S., Shrestha, S., & Babel, M. (2023). Analysis of potential nature-based solutions for the Mun River Basin, Thailand. *Water Science and Technology*, 87(6), 1496-1514. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.050>
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 02/PRT/M/2013. (2013). *Pedoman Penyusunan Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Pulido-Esquivel, A. Y., Prado-Hernández, J. V., Buendía-Espinoza, J. C., & García-Núñez, R. M. (2025). Agroforestry systems enhance soil moisture retention and aquifer recharge in a semi-arid Mexican valley. *Water*, 17(10), 1488. <https://doi.org/10.3390/w17101488>
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, & Rosidi, H. M. D. (1995). *Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa*, edisi kedua, skala 1:100.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Razi, M. H., Wilopo, W., & Putra, D. P. E. (2024). Specifying groundwater recharge zones through hydrogeochemical and isotopic analyses in a multilayer volcanic aquifer: A case study in the Yogyakarta-Sleman Groundwater Basin, Indonesia. *Hydrogeology Journal*, 32(7), 1953-1969. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02849-0>
- Romizah, H., Yudono, A. R. A., & Wicaksono, A. P. (2023). Pengaruh intensitas hujan terhadap erosi pada lahan sekitar Rawa Singkil di Desa Pondok dan Desa Parangjoro, Grogol, Sukoharjo, Jawa Tengah. *Jurnal Lingkungan Kebumihan Indonesia*, 1(1), 12. <https://doi.org/10.47134/kebumihan.v1i1.2059>
- Rusli, S. R., Bense, V. F., Mustafa, S. M. T., & Weerts, A. H. (2024). The impact of future changes in climate variables and groundwater abstraction on basin-scale groundwater availability. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(22), 5107-5131. <https://doi.org/10.5194/hess-28-5107-2024>
- Sahu, N., Mallick, S. K., Das, P., Saini, A., Sayama, T., Varun, A., Kumar, A., Kesharwani, R., & Thakur, P. K. (2024). Climatic impacts on spring disappearance in the Indian Himalayas. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2433115. <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2433115>
- Simpfen, I. N., Redana, I. W., & Ardana, P. D. H. (2025). Delineating Ababi Mountains spring recharge zones using combined isotope hydrology and geophysical methods. *Journal of Water and Land Development*, 64, 163-171. <https://doi.org/10.24425/jwld.2025.153529>
- Singh, P., Shamseldin, A. Y., Melville, B. W., & Wotherspoon, L. (2023). Development of statistical downscaling model based on Volterra series realization, principal components and ridge regression. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(3), 3361-3380. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01649-3>
- SNI 19-6728.1-2002. (2002). *Cara Pengambilan dan Pengujian Sampel Air Tanah dan Mata Air*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sukmawati, A. A. N., Yudono, A. R. A., & Gomareuzzaman, M. (2023). Analisis pengaruh ketersediaan air permukaan terhadap debit mata air. *Jurnal Lingkungan Kebumihan Indonesia*, 1(1), 8. <https://doi.org/10.47134/kebumihan.v1i1.2058>
- Sulistiani, Lubis, R. F., Santikayasa, I. P., Taufik, M., & Nugraha, G. U. (2025). Groundwater recharge modeling with integration of land use/land cover and climate change projections in Surakarta City, Indonesia. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 13(4), 352-370. <https://doi.org/10.26599/JGSE.2025.9280059>

- Yudono, A. R. A., Lintang, D. A. D., Maulia, I. K., dan Agustin, R. R. (2026). Dinamika Debit Mata Air dalam Menghadapi Perubahan Iklim: Identifikasi Kerentanan dan Kerangka Konservasi Berkelanjutan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 1010-1021, doi:10.14710/jil.24.4.1010-1021
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Van Bemmelen, R. W. (1949). *The Geology of Indonesia*, Vol. IA: General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes. The Hague: Martinus Nijhoff.
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2007). *SDSM 4.2: A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts, User Manual*. <https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/>
- Wingfield, T., Macdonald, N., Peters, K., & Spees, J. (2021). Barriers to mainstream adoption of catchment-wide natural flood management: A transdisciplinary problem-framing study of delivery practice. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(12), 6239-6259. <https://doi.org/10.5194/hess-25-6239-2021>
- Zeydilinejad, N., Pour-Beyranvand, A., Nassery, H. R., & Ghazi, B. (2025). Evaluating climate change impacts on snow cover and karst spring discharge in a data-scarce region: A case study of Iran. *Acta Geophysica*, 73(1), 831-854. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01400-9>