

Struktur Komunitas Vegetasi dan Kearifan Lokal dalam Konservasi Mata Air Songgobumi, Boyolali, Jawa Tengah

Alanindra Saputra^{1,*}, Natasha Herawati Sutanto Putri¹, Salsabila Rizqy Amalia¹,
Utik Anggraheni¹, Putri Agustina²

¹ Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,
Universitas Sebelas Maret, Surakarta-Indonesia, 57126

² Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,
Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta-Indonesia, 67169

*Corresponding author: alanindra@staff.uns.ac.id

Submitted:
14 Agu 2025

Revised:
04 Feb 2026

Accepted:
09 Apr 2026

Published:
25 Apr 2026

ABSTRAK

Krisis air bersih terjadi akibat mengeringnya mata air yang dipicu oleh kerusakan vegetasi di zona penyangga. Fenomena tersebut menuntut upaya konservasi berbasis ekologi dan sosial masyarakat. Penelitian bertujuan untuk (1) menganalisis struktur dan komposisi vegetasi di zona penyangga Mata Air Songgobumi Boyolali, (2) mengevaluasi partisipasi masyarakat dan kearifan lokal dalam menjaga keberlanjutan fungsi hidrologi Mata Air Songgobumi, dan (3) menyusun strategi konservasi berbasis vegetasi dan partisipasi masyarakat untuk menjaga kestabilan ketersediaan air di Desa Mriyan, Kecamatan Tamansari, Kabupaten Boyolali. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode *stratified systematic sampling* dengan intensitas 1% (34 plot pohon dan 68 plot LCC) pada area seluas 121,2 ha. Data dianalisis secara kuantitatif melalui Indeks Nilai Penting (INP), keanekaragaman Shannon-Wiener (H'), serta observasi partisipatif kearifan lokal. Strata pohon dianalisis menggunakan metode *Point Center Quarter* (PCQ) dan LCC menggunakan kuadrat plot. Data partisipasi masyarakat dikumpulkan dengan metode wawancara dan observasi. Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh 30 spesies strata pohon (722 individu) dengan keanekaragaman sedang ($H'=2,45$) dan dominansi spesies invasif *Acacia decurrens* serta *Cupressus sempervirens*. Spesies asli *Schima wallichii*, *Ficus fistulosa*, dan *Engelhardia spicata* berpotensi dalam konservasi mata air. Spesies LCC terdiri atas 19 spesies (1.453 individu; $H'=1,7$, kategori sedang) dan didominasi oleh rerumputan *Carex sylvatica*, *Pennisetum purpureum*, serta *Imperata cylindrica* yang berperan menekan erosi dan meningkatkan infiltrasi. Masyarakat memiliki literasi ekologi yang tinggi dan berperan aktif dalam konservasi mata air melalui kegiatan sosial, budaya, dan kearifan lokal. Diperlukan strategi konservasi sosio-ekologis terintegrasi yang memadukan analisis ekologis, khususnya vegetasi, dan modal masyarakat untuk menjaga stabilitas debit dan kualitas air.

Kata Kunci: Kearifan lokal, *Lower crop community*, Mata Air Songgobumi, Struktur Komunitas, Konservasi

ABSTRACT

The clean water crisis is due to spring drying, triggered by vegetation damage in the buffer zone, requiring conservation efforts based on ecological and community social approaches. The research

aims to (1) analyze vegetation structure and composition in the Songgobumi Spring buffer zone, Boyolali, (2) evaluate community participation and local wisdom in maintaining Songgobumi Spring's hydrological function, and (3) develop a conservation strategy based on vegetation and community participation to maintain water availability in Mriyan Village, Tamansari Subdistrict, Boyolali Regency. Sampling used stratified systematic sampling with a 1% intensity (34 tree plots, 68 LCC plots) over 121.2 hectares. Data were analyzed using the Importance Value Index (IVI), Shannon-Wiener diversity index (H'), and participatory observation of local wisdom. Tree strata were analyzed using the Point Center Quarter (PCQ) method, and LCC using quadrat plots. Community participation data were collected through interviews and observation. The research found 30 tree strata species (722 individuals) with moderate diversity ($H'=2.45$) and dominance of invasive species *Acacia decurrens* and *Cupressus sempervirens*. Native species *Schima wallichii*, *Ficus fistulosa*, and *Engelhardia spicata* show potential for spring conservation. LCC species included 19 species (1,453 individuals; $H'=1.7$, moderate category) dominated by grasses like *Carex sylvatica*, *Pennisetum purpureum*, and *Imperata cylindrica*, which help suppress erosion and increase infiltration. The community has high ecological literacy and actively conserves springs through social, cultural, and local wisdom activities. An integrated socio-ecological conservation strategy is needed, combining ecological analysis—particularly vegetation—with community assets to maintain water discharge and quality stability.

Keywords: Local wisdom, Lower crop community, Songgobumi Spring, Community Structure, Conservation

How to cite:

Saputra, A., Putri, N.H.S., Amalia, S.R., Anggraheni, U., Agustina, P. (2026). Struktur komunitas vegetasi dan kearifan lokal dalam konservasi mata air Songgobumi, Boyolali, Jawa Tengah. *Konservasi Hayati*, 22(1), 1-21 DOI: <https://doi.org/10.33369/hayati.v22i01.44381>

PENDAHULUAN

Krisis air bersih saat ini menjadi tantangan global dan nasional. Secara global, kondisi ini terus memburuk karena sekitar 58% populasi dunia mengalami kelangkaan air (Kummu *et al.*, 2016). Pada beberapa daerah di Indonesia, kelangkaan air bersih juga merupakan permasalahan yang serius. Meskipun secara nasional ketersediaan air relatif melimpah, distribusinya tidak merata. Kondisi ini terutama terjadi di Pulau Jawa, di mana indeks penggunaan air telah melampaui 100% dari pasokan yang tersedia (Bappenas, 2020; Masduqi *et al.*, 2020). Kementerian PPN/Bappenas memprediksi akan terjadi krisis air nasional pada tahun 2045 apabila tidak ada upaya konservasi air (Bappenas, 2020). Badan Pusat Statistik (BPS) juga melaporkan bahwa ketersediaan air per kapita per tahun di Indonesia pada 2023 hanya tersisa 181.4498 m³ (BPS, 2020). Krisis air bersih sangat berpengaruh terhadap pemenuhan kebutuhan air bagi masyarakat.

Krisis air terjadi karena terjadinya perubahan iklim (Thapa *et al.*, 2023; Sailo *et al.*, 2024) dan aktivitas manusia, misalnya eksploitasi berlebihan, deforestasi dan pembangunan infrastruktur (Jeelani *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2023). Degradasi lahan menyebabkan hanya sekitar 10% curah hujan yang dapat meresap ke dalam tanah (Kurniawan *et al.*, 2024). Degradasi lahan juga dapat terjadi pada daerah tangkapan air mata air yang menyebabkan penurunan debit air yang dihasilkan mata air. Kasus yang terjadi pada Mata Air Geger di daerah Bantul, Yogyakarta, menunjukkan perubahan dari mata air permanen menjadi mata air musiman akibat kerusakan vegetasi (Sancayaningsih *et al.*, 2016). Penurunan debit mata

air dapat dipengaruhi oleh vegetasi, sifat tanah (kapasitas serapan dan tampungan air), dan manusia yang memanfaatkan mata air tersebut (Zhang *et al.*, 2011). Hal ini dapat terjadi karena vegetasi memiliki peranan penting dalam meningkatkan retensi dan infiltrasi tanah serta mengurangi limpasan permukaan (Cao & Xin, 2025). Vegetasi di zona penyangga di sekitar mata air juga mendukung keanekaragaman hayati yang lebih tinggi dan berkontribusi pada konservasi air (Fata *et al.*, 2025). Krisis air juga disebabkan oleh adanya kesalahan dalam tata kelola, sistem irigasi yang tidak efisien, dan kerangka kelembagaan yang lemah (Tirtalistyani *et al.*, 2022).

Salah satu upaya untuk mengatasi krisis air bersih adalah dengan konservasi mata air. Mata air merupakan sumber air bersih yang sangat penting bagi kehidupan manusia untuk pemenuhan kebutuhan hidupnya (Utagi & Purandara, 2023; Tenywa *et al.*, 2024), serta mendukung keberlanjutan ekosistem dan perlindungan bagi flora dan fauna endemik (Jung *et al.*, 2024). Mata air menjadi sumber utama bagi daerah yang rentan krisis air karena bersifat musiman dan permanen (Thapa *et al.*, 2025). Berdasarkan hal tersebut, konservasi mata air sangat diperlukan untuk memastikan pasokan air bersih yang berkelanjutan untuk generasi mendatang (Utagi & Purandara, 2023; Jung *et al.*, 2024). Konservasi mata air juga dapat meningkatkan kesejahteraan masyarakat karena memberikan akses air bersih dalam mendukung kesehatan, ekonomi, dan stabilitas sosial masyarakat (Dalziel, 2009). Pengelolaan mata air yang bijaksana menjamin kelangsungan pasokannya dengan melestarikan dan meningkatkan kualitasnya (Sudarmadji *et al.*, 2016).

Kegiatan konservasi mata air yang dapat dilakukan adalah dengan pengelolaan daerah tangkapan air dengan pendekatan berbasis komunitas dan pelibatan masyarakat lokal (Thapa *et al.*, 2025). Daerah tangkapan air merupakan zona penyangga mata air yang menjadi penentu dalam pengisian air tanah dan kualitas air. Pengelolaan dapat dilakukan dengan pendekatan vegetasi. Pengelolaan vegetasi berperan sangat penting dalam mendukung konservasi mata air berkelanjutan dengan menjaga kualitas air, pengisian ulang (*recharge*) air tanah, kestabilan ekosistem, dan keanekaragaman tumbuhan endemik (Fata *et al.*, 2025). Vegetasi berperan penting dalam siklus hidrologi dan dinamika air tanah (Wang *et al.*, 2020), serta dapat menjaga kejernihan air tanah (García-Leoz *et al.*, 2018). Vegetasi di zona penyangga mata air mendukung kestabilan debit air yang dihasilkan mata air (Scarsbrook *et al.*, 2019; Fata *et al.*, 2025). Jenis vegetasi campuran sangat efektif untuk peningkatan retensi air karena mampu memperbaiki porositas dan infiltrasi tanah (Li *et al.*, 2026). Vegetasi dengan sistem perakaran yang luas dapat mengatur ketersediaan air sehingga dapat memastikan debit air yang stabil (Scarsbrook *et al.*, 2019; Rapiya & Ramoelo, 2025). Pengintegrasian dinamika vegetasi dalam strategi pengelolaan air dapat meningkatkan ketahanan ekosistem terhadap perubahan kondisi iklim (An & Ha, 2026). Analisis vegetasi diperlukan untuk memetakan keanekaragaman dan kesehatan vegetasi di sekitar mata air (Yuliantoro *et al.*, 2021a). Analisis vegetasi, seperti kerapatan, dominansi, indeks nilai penting, indeks diversitas, membantu mengidentifikasi spesies yang paling efektif dalam konservasi mata air (Jupri, 2021; Yuliantoro *et al.*, 2021b). Pemantauan vegetasi secara berkala diperlukan untuk memastikan kestabilan ekosistem di daerah penyangga mata air (da Silva Rangel Neto *et al.*, 2020).

Konservasi mata air membutuhkan peran dari masyarakat lokal. Masyarakat dapat mengelola berbagai krisis sumber daya air yang dihadapi melalui kearifan lokal. Kearifan lokal terkait konservasi air dapat diartikan sebagai berbagai bentuk pengetahuan, termasuk nilai, norma, dan aturan khusus yang terus diterapkan dan diikuti oleh masyarakat dalam melestarikan sumber daya air dan mengatur penggunaan sumber daya air serta tanah di lingkungannya (Maridi, 2015). Kearifan lokal dalam pengelolaan sumber daya air harus dilestarikan, tetapi hal ini mengalami banyak tantangan seiring perkembangan zaman, seperti pertumbuhan penduduk yang pesat, teknologi dan budaya modern, modal besar, serta kemiskinan dan ketimpangan sosial ekonomi (Admojo *et al.*, 2018). Masyarakat lokal melakukan praktik tradisional melalui ritual budaya dalam pengelolaan mata air (Yogafanny *et al.*, 2025) yang dilakukan secara turun-temurun. Di Jawa sudah terbukti menjaga debit dan kualitas mata air sepanjang tahun (Sudarmadji *et al.*, 2017). Beberapa masyarakat lokal juga masih mempercayai adanya pohon keramat di sekitar mata air yang secara ekologis dapat menjadi penopang sistem hidrologi (Sudarmadji *et al.*, 2017), sehingga tidak sembarangan melakukan penebangan pohon. Masyarakat lokal menjadi kunci keberhasilan konservasi mata air karena memiliki modal sosial, modal kepercayaan, nilai spiritualitas, modal pengetahuan lokal dan mempunyai komunitas untuk pengelolaan yang berkelanjutan (Kobayashi *et al.*, 2014)

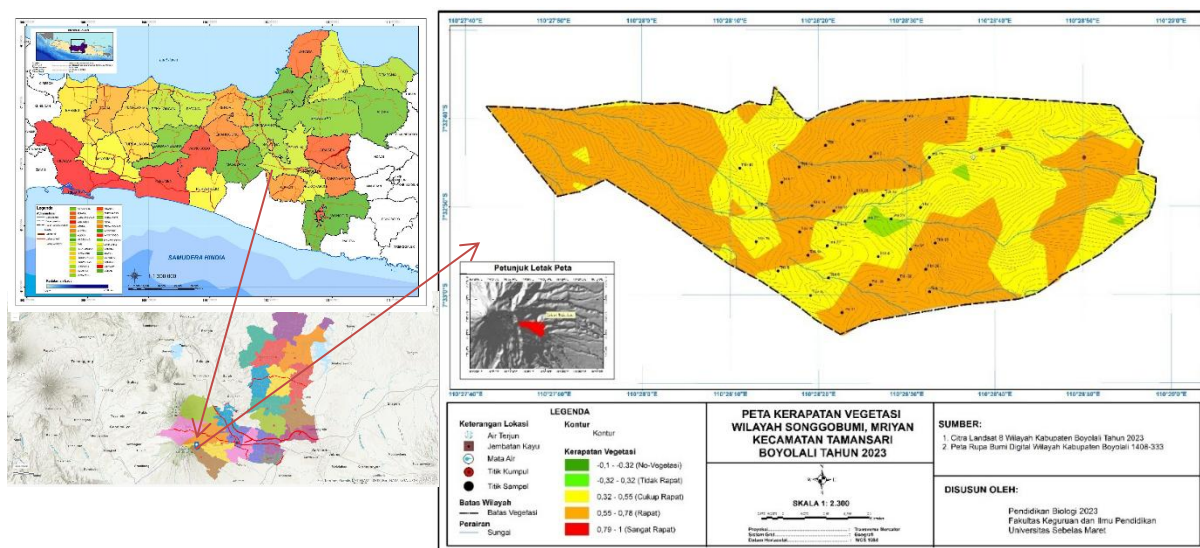
Salah satu sumber mata air alami dengan kearifan lokal masyarakat yang masih terjaga adalah mata air Songgobumi di Desa Mriyan, Kecamatan Tamansari, Kabupaten Boyolali. Mata air ini terletak di daerah pegunungan. Hutan yang terdapat di daerah Mata Air Songgobumi adalah tipe hutan rimba. Pengelompokan ini didasarkan pada klasifikasi iklim hutan menurut *Schmidt-Ferguson*, yaitu kawasan ini masuk ke dalam wilayah hutan Taman Nasional Gunung Merapi (TNGM) yang memiliki iklim yang agak basah. Masyarakat yang tinggal di sekitar mata air Songgobumi memiliki kepercayaan untuk melindungi hutan (Rahman *et al.*, 2020) Salah satu adat istiadat yang dilestarikan adalah budaya *kenduren* yang bertujuan menghormati segala sesuatu atau mitologi yang telah menjaga (Gunawan, 2015).

Penelitian sejenis yang telah dilakukan memberikan konfirmasi bahwa struktur vegetasi berperan dalam efektivitas konservasi mata air di zona penyangga mata air. Selain pendekatan vegetasi, partisipasi masyarakat dan kearifan lokal juga sangat penting dalam upaya konservasi mata air sehingga memungkinkan pengelolaan sumber daya air berbasis vegetasi dan kearifan lokal di masyarakat setempat. Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji peran vegetasi dan kearifan lokal dalam konservasi mata air, belum ada penelitian spesifik yang menganalisis struktur vegetasi secara komprehensif sebagai *database* komposisi vegetasi dan struktur vegetasi serta peran masyarakat dalam konservasi mata air. Penelitian terdahulu banyak dilakukan secara parsial. Penelitian tentang upaya konservasi Mata Air Songgobumi, Desa Mriyan, Kecamatan Tamansari, Kabupaten Boyolali melalui pendekatan vegetasi dan kearifan lokal belum banyak dilakukan. Kebaruan penelitian ini adalah menyajikan data struktur dan komposisi vegetasi sebagai dasar pengukuran kestabilan dan kesehatan ekosistem yang mendukung kestabilan debit dan kualitas sumber air. Selain itu, juga menyajikan data partisipasi masyarakat dan kearifan lokal dalam mendukung konservasi mata air. Tujuan penelitian yang dilakukan adalah (1) menganalisis

struktur dan komposisi vegetasi di zona penyangga Mata Air Songgobumi Boyolali; (2) mengevaluasi partisipasi masyarakat dan kearifan lokal dalam menjaga keberlanjutan fungsi hidrologi Mata Air Songgobumi; dan (3) menyusun strategi konservasi berbasis vegetasi dan partisipasi masyarakat untuk menjaga kestabilan ketersediaan air di Desa Mriyan, Kecamatan Tamansari, Kabupaten Boyolali. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap upaya konservasi untuk menjaga ekosistem hutan di sekitar Mata Air Songgobumi, sehingga ketersediaan air dapat terjaga agar dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dengan optimal.

METODE

Pengambilan data penelitian dilakukan pada bulan Maret - Juni 2023 yang termasuk musim kering. Data penelitian primer terbagi menjadi dua, yaitu data struktur dan komposisi vegetasi dan data partisipasi masyarakat. Data struktur dan komposisi vegetasi diambil di kawasan zona pemanfaatan Taman Nasional Gunung Merapi, tepatnya di kawasan Mata Air Songgobumi, Desa Mriyan, Kecamatan Taman Sari, Kabupaten Boyolali. Topografi Desa Mriyan merupakan kawasan bergelombang dan berbukit dengan ketinggian 700-1200 mdpl. Lokasi penelitian merupakan zona penyangga Mata Air Songgobuni yang diidentifikasi sebagai daerah tangkapan air (*recharge area*) dengan luas 121,2 ha.



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Kawasan Mata Air Songgobumi

Pengambilan data menggunakan metode *stratified systematic sampling* dengan intensitas sampling sebesar 1% dari luas total yang menjadi luas area cuplikan (LAC) sebesar 12.120 m². Penentuan LAC 1% sudah representatif untuk ekosistem hutan di lereng pegunungan dengan tingkat homogenitas vegetasi sedang hingga tinggi (Mueller-Dombois & Ellenbergh, 1974). Pengambilan data vegetasi diasumsikan menggunakan luasan plot berukuran 20 m x 20 m dan vegetasi penutup lantai/*Lower Crop Community* (LCC) sebesar 2 m x 2 m. Jumlah plot ditentukan dengan perhitungan LAC dibagi dengan luas plot dan diperoleh 34 plot sampling untuk strata pohon. Sedangkan untuk LCC, diambil 2 plot sampel di setiap titik plot strata pohon, sehingga berjumlah 68 plot sampling. Titik sampling diletakkan secara acak (*simple randomized sampling*) (Fachrul, 2007) yang dapat mewakili seluruh lokasi penelitian.

Metode yang digunakan dalam penelitian adalah metode *point centered quarter* (PCQ) untuk strata pohon (Krebs, 2001), dan untuk LCC menggunakan kuadran plot dengan ukuran 2 m x 2 m. Pengukuran dengan metode PCQ dipilih karena metode ini baik diimplikasikan di kawasan hutan tropis serta mampu mengakses nilai kepadatan, frekuensi, dan dominansi, sehingga dapat mengetahui komposisi daftar tumbuhan yang berada di wilayah tertentu. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah peta kawasan Mata Air Songgobumi sebagai navigasi penentuan posisi plot untuk pengambilan sampel tumbuhan, *luxmeter* untuk mengukur intensitas cahaya, higrometer untuk mengukur temperatur dan kelembaban, kamera untuk mendokumentasikan kegiatan, pasak dan tali plot ukuran 20 m x 20 m dan 1 m x 1 m untuk membuat batasan plot identifikasi. Meteran digunakan untuk mengukur dalam skala meter dan alat tulis untuk menulis hasil identifikasi.

Data yang diperoleh dari survei lapangan diidentifikasi untuk menentukan nama ilmiah dan klasifikasinya. Setelah diidentifikasi, data dianalisis untuk menentukan Indeks Nilai Penting (INP) dan Indeks Keanekaragaman. Analisis data strata pohon menggunakan persamaan sebagai berikut (Mitchell, 2023):

- 1) *Mean Distance* (rata-rata jarak) = D

$$D = \frac{\text{Total jarak}}{\sum \text{Total quarter}}$$

- 2) Densitas per 100 m²

$$\text{Densitas per 100 m}^2 = \frac{\text{Main Distance} \times \text{faktor koreksi}}{D^2}$$

- 3) Densitas Mutlak Tiap Jenis (DsM)

$$\sum \text{dalam quarter} = \frac{\sum \text{Individu spesies X}}{\sum \text{Total quarter}}$$

- 4) Dominansi Mutlak (DmM) atau Luas Basal Area (LBA)

$$BA = \pi r^2$$

$$\text{Rata-rata BA spesies X} = \frac{\text{Jumlah total BA spesies X}}{\sum \text{Individu spesies X}}$$

- 5) Frekuensi Mutlak (FM)

$$FM = \frac{\sum \text{Titik sampling yang ada spesies X}}{\sum \text{Individu spesies X}}$$

- 6) Luas Kanopi

$$\text{Luas Kanopi} = \text{Jarak Barat-Timur (BT)} \times \text{Jarak Utara-Selatan (US)} \times \pi$$

- 7) Nilai Relatif

$$DsR = \frac{DsM}{\sum \text{Total DsM}} \times 100\%$$

$$DmR = \frac{DmM}{\sum \text{Total DmM}} \times 100\%$$

$$FR = \frac{FM}{\sum \text{Total FM}} \times 100\%$$

$$LBAR = \frac{LBA}{\sum \text{Total LBA}} \times 100\%$$

$$L\text{Kanopi}R = \frac{L\text{Kanopi}}{\sum \text{Total LKanopi}} \times 100\%$$

Berdasarkan perhitungan nilai relatif, dapat digambarkan Indeks Nilai Penting (INP) yang merupakan parameter kuantitatif untuk menyatakan tingkat dominansi (tingkat penguasaan) spesies-spesies dalam suatu vegetasi (Ardhana, 2012). INP merupakan penjumlahan dari Densitas/Kerapatan Relatif (DsR), Dominansi/ LBA Relatif (DmR), Frekuensi Relatif (FR), dan Luas Kanopi Relatif (LkanopiR) (Dumbois & Ellenberg, 1974; Ardhana, 2012).

$$INP = DsR + DmR + FR + LkanopiR$$

Analisis data hasil survei vegetasi penutup lantai/LCC dianalisis menggunakan persamaan pada Tabel 1.

Tabel 1. Persamaan untuk analisis data LCC

Variabel		Persamaan
Kerapatan (D)	=	$\frac{\text{Jumlah individu suatu spesies}}{\text{Luas seluruh plot}}$
Kerapatan relatif (DR)	=	$\frac{\text{Kerapatan setiap spesies}}{\text{Jumlah kerapatan seluruh spesies}} \times 100\%$
Dominansi Mutlak (Dm)	=	$\frac{\text{total luas cover suatu spesies}}{\text{Luas seluruh plot}}$
Dominansi relatif (DmR)	=	$\frac{\text{Dominansi setiap spesies}}{\text{Jumlah dominansi seluruh spesies}} \times 100\%$
Frekuensi (F)	=	$\frac{\text{Jumlah plot suatu spesies}}{\text{Luas seluruh plot}}$
Frekuensi relatif (FR)	=	$\frac{\text{Dominansi setiap spesies}}{\text{Jumlah frekuensi seluruh spesies}} \times 100\%$
Indeks nilai penting (INP)	=	Kerapatan relatif + dominansi relatif + frekuensi relatif

Keanekaragaman jenis vegetasi *upperstorey* dan *understorey* dapat digambarkan dengan Indeks Shannon-Wiener (Barbour *et al.*, 1987) sebagai berikut:

$$H' = - \sum 1 \frac{n_i}{N} \log \frac{n_i}{N}$$

Keterangan:

H' = Indeks Keanekaragaman *Shannon-Wiener*

n_i = Jumlah Individu (n)

N = Jumlah Keseluruhan Individu

Indeks keanekaragaman *Shannon-Wiener* memiliki indikator tingkat keanekaragaman vegetasi yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Indeks keanekaragaman *Shannon-Wiener* (Fachrul, 2007)

Nilai Indeks <i>Shannon-Wiener</i>	Tingkat Keanekaragaman
$H' < 1$	Rendah
$1 \leq H' \leq 3$	Sedang
$H' > 3$	Tinggi

Metode yang digunakan untuk mengidentifikasi aktivitas, partisipasi, dan kearifan lokal masyarakat untuk konservasi Mata Air Songgobumi di Desa Mriyan, Kecamatan Tamansari, Kabupaten Boyolali adalah metode kualitatif yang terdiri dari wawancara mendalam, observasi, dan dokumentasi untuk mendapatkan informasi primer tentang subjek penelitian. Data sekunder dari berbagai referensi seperti artikel penelitian terdahulu digunakan untuk mencari referensi kearifan lokal dan kondisi geografis, kondisi fisik, dan karakteristik demografi wilayah penelitian. Teknik analisis data yang dilakukan adalah deskriptif kualitatif. Populasi pada penelitian ini adalah masyarakat umum, pengurus mata air, tokoh masyarakat, dan organisasi pelestari mata air Songgobumi, Desa Mriyan, Taman Sari, Boyolali. Sampel dipilih secara *purposive*, yaitu ketua pengurus mata air dan kepala dusun. Teknik analisis data pada penelitian ini terdiri dari pengumpulan data, reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan atau verifikasi (Jumadi & Harmawati, 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Struktur dan Komposisi Vegetasi di Zona Penyangga Mata Air Songgobumi

Penelitian memperoleh data 30 spesies strata pohon di kawasan Mata Air Songgobumi yang disajikan pada Tabel 2. Sedangkan spesies LCC diperoleh dari 19 spesies yang disajikan pada Tabel 3. Data hasil penelitian dianalisis secara kuantitatif, yaitu mencakup Kerapatan (K), Densitas *Coverage* (DmM), Frekuensi (F), Indeks Nilai Penting (INP), dan Indeks Keanekaragaman *Shannon-Wiener*.

Tabel 2. Vegetasi Strata Pohon di Zona Penyangga Mata Air Songgobumi

Nama Lokal	Nama Ilmiah	Status	INP	Rank
Akasia	<i>Acacia decurrens</i>	Non	95,078	1
Cemara pensil	<i>Cupressus sempervirens</i>	Non	91,435	2
Puspa	<i>Schima wallichii</i>	Asli	12,107	3
Kaliandra Putih	<i>Calliandra tetragona</i>	Non	8,696	4
Kesowo	<i>Engelhardia spicata</i>	Asli	7,858	5
Indigofera	<i>Indigofera zollingeriana</i>	Non	6,168	6
Seleguri	<i>Sida rhombifolia</i>	Non	5,795	7
Mengkudu	<i>Morinda citrifolia</i>	Non	5,231	8
Waru	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	Non	4,942	9
Wilodo	<i>Ficus fistulosa</i>	Asli	4,900	10
Cempoko Barus	<i>Vernonia amygdalina</i>	Asli	4,679	11
Jebugan	<i>Galearia filiformis</i>	Asli	4,517	12
Nangka	<i>Artocarpus heterophyllus</i>	Non	4,316	13
Klebak	<i>Chisocheton petandrus</i>	Asli	3,987	14
Dadap	<i>Erythrina fusca</i>	Asli	3,914	15
Dadap Serep	<i>Erythrina subumbrans</i>	Asli	3,698	16

Nama Lokal	Nama Ilmiah	Status	INP	Rank
Salam	<i>Syzygium polyanthum</i>	Non	3,644	17
Tangsek	<i>Dodonaea viscosa</i>	Asli	3,552	18
Mangga	<i>Mangifera indica</i>	Non	3,471	19
Kemlanding	<i>Paraserianthes lophanta</i>	Asli	2,911	20
Kelor	<i>Moringa oleifera</i>	Non	2,730	21
Randu	<i>Ceiba pentandra</i>	Non	2,412	22
Jambu	<i>Psidium guajava</i>	Non	2,230	23
Sarangan	<i>Castanopsis argentea</i>	Asli	1,985	24
Bambu Apus	<i>Gigantochloa apus</i>	Asli	1,841	25
Sambung Nyowo	<i>Gynura procumbens</i>	Non	1,692	26
Jarak	<i>Jatropha curcas</i>	Non	1,263	27
Kedung	<i>Pittosporum moluccanum</i>	Asli	1,108	28
Sirsak	<i>Annona muricata</i>	Non	0,790	29
Pucuk Merah	<i>Syzygium oleina</i>	Non	0,001	30

Tabel 3. Vegetasi LCC di Zona Penyangga Mata Air Songgobumi

Nama Lokal	Nama Ilmiah	Status	INP	Rank
Rumput Hutan	<i>Carex sylvatica</i>	Asli	106,67	1
Rumput gajah	<i>Pennisetum purpureum</i>	Asli	75,30	2
Alang-alang	<i>Imperata cylindrica</i>	Asli	28,80	3
Rumput arthaxon	<i>Arthaxon hispidus</i>	Asli	23,89	4
Senduduk	<i>Melastoma</i>	Asli	11,72	5
Seleguri	<i>Sida rhombifolia</i>	Asli	11,31	6
Sembung rambat	<i>Mikania micrantha</i>	Non	7,65	7
Minjangan	<i>Chromolaena odorata</i>	Non	5,40	8
Rumput benggala	<i>Megathyrsus maximus</i>	Non	4,64	9
Rumput jariji	<i>Digitaria sanguinalis</i>	Asli	4,49	10
Rumput remason	<i>Polygala paniculata</i>	Non	4,34	11
Lantana	<i>Lantana camara</i>	Non	2,80	12
Bandotan	<i>Ageratum conyzoides</i>	Non	2,75	13
Pegagan	<i>Centella asiatica</i>	Asli	2,73	14
Rumput ciperus	<i>Cyperus rotundus</i>	Asli	2,67	15
Kembang merak	<i>Caesalpinia pulcherrima</i>	Non	2,23	16
Talas	<i>Colocasia esculenta</i>	Asli	1,09	17
Temu	<i>Curcuma zanthorrhiza</i>	Asli	0,99	18
Pecut kuda	<i>Stachytarpheta jamaicensis</i>	Non	0,52	19

Berdasarkan Tabel 2, diketahui bahwa vegetasi di kawasan Mata Air Songgobumi didominasi oleh akasia. Peringkat 5 tertinggi berdasarkan INP kawasan Mata Air Songgobumi adalah akasia (*A. decurrens*), cemara pensil (*C. sempervirens*), puspa (*S. wallichii*), kaliandra (*C. tetragona*), dan kesowo (*E. spicata*). Secara berurutan, spesies pada peringkat atas memiliki kontribusi bagi indeks dominansi, mobilitas karbon, dan biomassa (Susilawati, 2017).

Spesies *A. decurrens* dan *C. sempervirens* mulai menginvasi TNGM karena dominansi dan kecenderungannya, sehingga berpotensi menjadi gulma jika tidak ditangani dengan baik (Sutomo, 2019). Secara ekologis kedua spesies tersebut merupakan spesies invasif yang

memiliki laju pertumbuhan yang cepat (Saputra *et al.*, 2025) dan tidak ada musuh alami, sehingga mendominasi di zona penyangga Mata Air Songgobumi. Adanya invasi spesies juga menyebabkan penurunan keanekaragaman spesies, sehingga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem (Tjitrosoedirdjo *et al.*, 2019; Saputra *et al.*, 2025). Spesies invasif merupakan ancaman nyata bagi keanekaragaman hayati karena dapat merusak keanekaragaman hayati hutan pegunungan (Saputra *et al.*, 2025). Spesies tersebut juga memiliki laju transpirasi yang tinggi sehingga tidak cocok untuk pola konservasi mata air. Hal ini perlu diwaspadai karena sifat dominan spesies tersebut dapat mengancam ketersediaan air tanah bagi mata air serta menggeser keberadaan vegetasi yang memiliki perakaran lebih dalam dan kemampuan retensi air lebih baik, misalnya *F. fistulosa* atau *E. spicata*. Berdasarkan permasalahan tersebut, perlu tindak lanjut kebijakan dalam pengelolaan tanaman invasif di zona penyangga Mata Air Songgobumi.

Berdasarkan Tabel 3, kawasan Mata Air Songgobumi didominasi oleh tumbuhan rerumputan. Spesies yang paling dominan adalah *C. sylvatica* (rumput hutan), *P. purpureum* (rumput gajah), dan *I. cylindrica* (alang-alang). Berdasarkan fungsi ekologis, dominansi 3 spesies tersebut memberikan dampak positif bagi konservasi tanah di wilayah tersebut. Struktur perakaran serabut dari famili Poaceae dan Cyperaceae efektif dalam mengikat agregat tanah permukaan sehingga dapat meminimalkan kerusakan struktur tanah akibat erosi dan meningkatkan porositas tanah yang mendukung infiltrasi air hujan (De Baets *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2021).

Indeks Keanekaragaman Spesies (H') di zona penyangga Mata Air Songgobumi pada strata pohon menunjukkan kategori keanekaragaman sedang, yaitu sebesar 2,45. Keanekaragaman sedang menunjukkan kondisi ekosistem yang relatif stabil, namun berada pada fase transisi ekologis. Sedangkan pada LCC juga pada kategori sedang dengan nilai $H' = 1,7$. Keanekaragaman spesies ini merupakan indikator resiliensi ekosistem terhadap adanya gangguan lingkungan (Priyadarshini *et al.*, 2011).

Nilai Indeks Keanekaragaman strata pohon menunjukkan bahwa meskipun ada dua spesies invasif yang dominan, di zona ini masih terdapat spesies asli (*native*), misalnya *S. wallichii*, *F. fistulosa*, *E. spicata*, dan beberapa spesies seperti pada Tabel 2. Kehadiran spesies asli tersebut mendukung kestabilan ekosistem dan menciptakan sistem perakaran yang bervariasi. Variasi sistem perakaran ini secara mekanis dapat memperbaiki sistem porositas tanah yang penting dalam meningkatkan laju infiltrasi air hujan ke dalam tanah (Rapiya & Ramoelo, 2025). Keanekaragaman spesies pohon yang sedang tersebut juga berpengaruh pada tutupan lahan sehingga dapat mengurangi energi kinetik air hujan (intersepsi), mengalirkan pada batang, serta tidak merusak struktur tanah dan porositas (Luo *et al.*, 2020; Sofiah & Soejono, 2020). Keanekaragaman spesies pohon juga berfungsi dalam menahan laju limpasan permukaan (*surface run-off*) dan meningkatkan retensi air di dalam (Yuliantoro & Frianto, 2019; Kristanto *et al.*, 2022;). Hal ini sangat penting dalam upaya konservasi Mata Air Songgobumi dengan mempertahankan ekosistem hutan dan penghijauan kembali karena dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan air tanah dan infiltrasi sehingga berkontribusi pada pengelolaan air berkelanjutan.

Nilai Indeks Keanekaragaman LCC, meskipun pada kategori sedang, nilai H' mendekati kategori rendah. Keanekaragaman spesies LCC juga dipengaruhi oleh naungan

kanopi pohon di atasnya, sehingga penetrasi cahaya matahari kurang maksimal. Keanekaragaman spesies LCC juga terancam oleh hadirnya spesies *non-native* yang berpotensi menjadi spesies invasif, misalnya *C. odorata*, *A. conyzoides*, *L. camara*, dan beberapa spesies yang disajikan di Tabel 3. Spesies *non-native* ini akan memengaruhi keanekaragaman spesies asli dan merusak keseimbangan ekosistem. Keanekaragaman spesies asli tumbuhan LCC perlu dijaga karena memainkan peran kunci dalam konservasi mata air dengan memperlambat limpasan air hujan, meningkatkan infiltrasi air, mengurangi erosi tanah, dan mendukung kestabilan ekosistem, sehingga ketersediaan air di mata air terus terjaga.

Vegetasi yang terdapat di kawasan mata air berperan penting untuk menjaga kondisi mata air, sehingga ekosistem dapat terjaga dan ketersediaan air dapat tercukupi bagi kehidupan manusia (Susanto *et al.*, 2021). Hal ini didukung oleh penelitian Freitas *et al.* (2019) yang menyatakan bahwa tumbuhan memiliki kontribusi yang maksimal untuk dapat mendukung kontinuitas ekosistem hutan serta kualitas dan kuantitas sumber air. Perlindungan ekosistem hutan juga sangat penting karena vegetasi hutan berperan dalam fungsi penyangga hidrologi (Novyitasari *et al.*, 2024).

Pemerintah Desa Mriyan dan Lembaga Pengembangan Teknologi Pedesaan (LPTP) Surakarta mengambil berbagai langkah konservasi mengingat bahwa daerah TNGM Desa Mriyan adalah kawasan resapan air (*recharge area*) dengan program konservasi vegetasi. Kawasan Mata Air Songgobumi mendapat pengelolaan oleh Badan Lingkungan Hidup Kabupaten Boyolali dengan adanya regulasi untuk memanfaatkan taman nasional sebagaimana mestinya, misalnya, pemanfaatan lahan untuk ditanami pakan ternak atau bahan makanan harus berada di zona pemanfaatan, dilarang menanam pohon tanpa izin dari pengelola, dan dilarang menebang pohon tanpa izin. Selain itu, kegiatan kerja bakti berupa pembersihan penampungan air dan perbaikan pipa dilakukan oleh masyarakat di Dukuh Songgobumi, Gumuk, dan Montong.

2. Parameter Lingkungan di Zona Penyangga Mata Air Songgobumi

Pengukuran parameter lingkungan dilakukan pada empat titik sampel yang mewakili keseluruhan titik di lokasi penelitian. Hasil pengukuran tersebut disajikan pada Tabel 4 sebagai dasar analisis kondisi ekologi di zona penyangga Mata Air Songgobumi. Parameter yang diamati meliputi intensitas cahaya, temperatur udara, dan kelembaban, yang merupakan faktor utama dalam menentukan dinamika pertumbuhan dan distribusi vegetasi.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Parameter Lingkungan di Zona Peyangga Mata Air Songgobumi

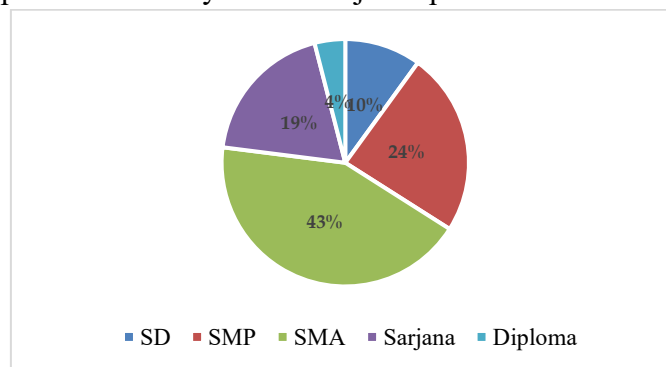
Titik Sampel	Parameter Lingkungan	Satuan
Lokasi 1 (Plot 1)	Intensitas Cahaya	017 lux
	Temperatur dan Kelembaban	23°C / 62%
Lokasi 2 (Plot 2)	Intensitas Cahaya	187 lux
	Temperatur dan Kelembaban	28°C / 48%
Lokasi 3 (Plot 9)	Intensitas Cahaya	933 lux
	Temperatur dan Kelembaban	28°C / 55%
Lokasi 4 (Plot 27)	Intensitas Cahaya	063 lux
	Temperatur dan Kelembaban	24°C / 60%

Variasi nilai pada masing-masing parameter menunjukkan adanya heterogenitas kondisi lingkungan pada skala mikro, yang tidak terlepas dari pengaruh faktor struktural seperti kerapatan dan susunan kanopi vegetasi. Dengan demikian, data ini memberikan gambaran awal mengenai karakteristik mikroklimat yang terbentuk di lokasi penelitian. Hasil pengukuran mikroklimat menunjukkan adanya variasi yang dipengaruhi oleh struktur kanopi pohon (Tabel 2). Data tersebut mengindikasikan bahwa lokasi penelitian memiliki nilai kelembaban yang relatif rendah dan kondisi lahan yang cenderung kering. Intensitas cahaya tergolong rendah, dengan nilai maksimum hanya mencapai 933 lux. Sementara itu, temperatur udara relatif tinggi untuk ekosistem pegunungan, yang berpengaruh pada penurunan kelembaban udara. Variasi ini mencerminkan dinamika mikroklimat yang fluktuatif di lereng Gunung Merapi, sekaligus menunjukkan bahwa kawasan tersebut memiliki tutupan vegetasi pohon yang cukup rapat. Kondisi ini mempengaruhi vegetasi di zona penyangga mata air untuk melakukan adaptasi fisiologis, misalnya untuk strata pohon dengan memperdalam sistem perakaran untuk menjangkau air tanah dan untuk LCC meningkatkan retensi air guna menjaga stabilitas kelembaban tanah (Yustiningsih, 2019; Fata *et al.*, 2025).

3. Partisipasi Masyarakat dan Kearifan Lokal untuk Konservasi Mata Air Songgobumi

a. Tingkat Pendidikan

Tingkat pendidikan masyarakat Songgobumi beragam, mulai dari responden lulusan sekolah dasar, sekolah menengah pertama, sekolah menengah atas, diploma hingga sarjana. Persentase tingkat pendidikan masyarakat disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Persentase Tingkat Pendidikan Masyarakat Songgobumi

Berdasarkan Gambar 2, tingkat pendidikan masyarakat Songgobumi didominasi oleh lulusan Sekolah Menengah Atas (SMA) sebanyak 42,85%, diikuti oleh lulusan Sekolah Menengah Pertama (SMP) sebanyak 23,80%, kemudian lulusan Sarjana sebanyak 19,04%, lulusan Sekolah Dasar (SD) sebanyak 9,52%, dan lulusan Diploma sebanyak 4,76%, sehingga sebagian besar masyarakat Songgobumi memiliki tingkat pendidikan yang cukup tinggi, yaitu lulusan SMA dan Sarjana. Tingkat pendidikan masyarakat memiliki pengaruh terhadap pengetahuan masyarakat, yang akan memengaruhi perannya dalam pengelolaan hutan dan mata air dengan lebih baik (Safira *et al.*, 2017). Masyarakat yang berpendidikan cukup tinggi mampu mengidentifikasi spesies pohon yang berpotensi untuk konservasi mata air, misalnya *F. fistulosa*, *F. benjamina*, *S. wallichii* dan lainnya. Pengetahuan juga dapat

menjadi modal sosial dalam mitigasi dampak spesies invasif yang terus mendominasi dan merusak.

b. Pengetahuan Mengenai Mata Air

Pengetahuan mengenai mata air sangat penting untuk digali, terutama pengetahuan yang berhubungan langsung dengan pemenuhan kebutuhan hidup. Pengetahuan masyarakat Songgobumi mengenai lokasi mata air disajikan pada Gambar 3a, sedangkan pengetahuan masyarakat mengenai pentingnya penyelamatan dan pelestarian mata air disajikan pada Gambar 3b.

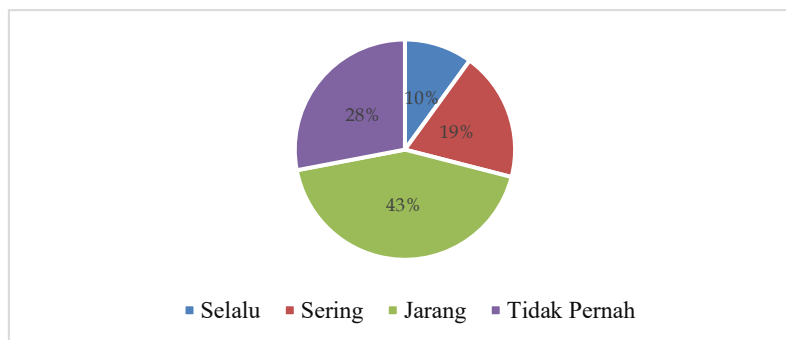


Gambar 3. Diagram Persentase Pengetahuan Masyarakat, (a) Pengetahuan Masyarakat Terhadap Lokasi Mata Air, (b) Pengetahuan Masyarakat Terhadap Pentingnya Penyelamatan dan Pelestarian Mata Air

Berdasarkan Gambar 3a, pengetahuan masyarakat mengenai lokasi mata air sebagian besar sudah mengetahui lokasi Mata Air Songgobumi. Gambar 3b, menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat sudah mengetahui pentingnya penyelamatan dan pelestarian Mata Air Songgobumi. Pengetahuan yang dimiliki masyarakat merupakan modal dasar yang akan memunculkan sikap peduli lingkungan (N. Hidayati *et al.*, 2019), karena terdorong rasa kepemilikan dan tanggung jawab keberlanjutan mata air. Pengetahuan yang dimiliki dan diterapkan di lingkungan dapat disebut sebagai kearifan lokal yang menggambarkan bagaimana masyarakat dapat menjaga dan melestarikan mata air dan lingkungan sekitar dari berbagai ancaman dan gangguan (Taufiq, 2014).

c. Sikap Mengenai Pemanfaatan Mata Air

Sikap masyarakat Songgobumi terhadap pemanfaatan mata air disajikan pada Gambar 4. Berdasarkan data tersebut, sebagian besar masyarakat tergolong jarang memanfaatkan Mata Air Songgobumi (42,85%). Sebanyak 28,75% masyarakat bahkan tidak pernah memanfaatkan mata air tersebut. Sementara itu, 19,04% masyarakat tercatat sering memanfaatkannya dan hanya 10% yang selalu memanfaatkannya. Pola ini menunjukkan bahwa intensitas pemanfaatan Mata Air Songgobumi relatif rendah di tingkat masyarakat lokal.



Gambar 4. Diagram Persentase Sikap Masyarakat terhadap Pemanfaatan Mata Air

Pemanfaatan mata air umumnya terbatas pada kebutuhan domestik, seperti mandi, cuci, dan kakus (MCK), pemberian air minum ternak, serta penyiraman tanaman pertanian. Namun, sebagian besar kebutuhan air masyarakat dipenuhi dari sumber mata air lain yang memiliki debit lebih besar. Kondisi ini menyebabkan Mata Air Songgobumi lebih difungsikan sebagai kawasan konservasi dan ruang spiritual. Pemanfaatan yang terbatas tersebut berkontribusi terhadap terjaganya kondisi ekologis, yang ditunjukkan oleh stabilitas iklim mikro dan struktur vegetasi yang relatif baik di zona penyangga.

d. Peran Serta Masyarakat Dalam Pengelolaan Dan Konservasi Mata Air

Kegiatan yang dilakukan masyarakat untuk pengelolaan mata air antara lain gotong royong untuk membersihkan mata air, membuat saluran air dari mata air ke perumahan masyarakat, dan melakukan sosialisasi untuk menjaga mata air. Peran serta masyarakat dalam pengelolaan Mata Air Songgobumi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Peran Masyarakat untuk Konservasi Mata Air Songgobumi

No.	Peran	Kegiatan
1.	Penyusunan rencana	Berpartisipasi dalam rapat diskusi dan mengajukan gagasan atau ide tentang pengelolaan mata air.
2.	Pendanaan	Pemberian dana oleh pemerintah yang digunakan untuk biaya operasional perawatan hutan serta mata air.
3.	Pengawasan	Menegur pengunjung atau masyarakat yang tidak berperilaku sesuai aturan atau norma pelestarian mata air.
4.	Laporan	Melaporkan permasalahan yang berkaitan dengan lingkungan mata air kepada organisasi pengelola atau kepala desa.
5.	Pelaksanaan rencana	Melaksanakan solusi atau rencana perawatan dan pelestarian hutan serta mata air.

Masyarakat Songgobumi tidak hanya melakukan pengelolaan terhadap Mata Air Songgobumi, tetapi juga melakukan konservasi terhadap mata air tersebut. Tindakan yang dilakukan oleh masyarakat untuk konservasi mata air adalah tidak menebang pohon dan menanam pohon yang dapat meningkatkan infiltrasi (Lubis *et al.*, 2018). Pohon yang ditanam berdasarkan pengetahuan yang masyarakat miliki adalah pohon dadap (*E. variegata*), pohon puspa (*S. wallichii*), dan pohon beringin (*F. benyamina*).

e. Analisis Kearifan Lokal Masyarakat

Kearifan lokal sangat penting dalam pelestarian mata air di suatu kawasan (Hidayati, 2016). Kearifan lokal masyarakat Songgobumi dalam upaya konservasi mata air tercermin dalam aturan, larangan, norma, dan adat istiadat yang berlaku. Norma dan adat istiadat tersebut merupakan warisan orang tua serta menjadi pedoman dalam berperilaku, bersifat lisan, dan tidak tertulis dalam peraturan desa (Amalia *et al.*, 2023).

Hasil wawancara menunjukkan bahwa masyarakat Songgobumi memiliki kepercayaan yang kuat terhadap nenek moyang. Kepercayaan masyarakat terhadap nenek moyang dapat mengontrol kondisi mata air dan hutan agar tetap lestari. Selain itu, nenek moyang mereka mewariskan aturan-aturan yang masih diterapkan oleh masyarakat dan pengunjung hutan di kawasan mata air. Aturan dan larangan yang diterapkan masyarakat Songgobumi, yaitu: (1) dilarang menebang pohon dan merusak pohon di hutan sekitar mata air; (2) dilarang memasuki area perlindungan hutan tanpa izin; (3) dilarang mandi sembarangan tanpa izin masyarakat desa; (4) dilarang berbicara sembarangan; (5) dilarang tertawa berlebihan; (6) dilarang berbuat asusila di lingkungan sekitar mata air; (7) berdoa sebelum mengambil air; (8) selalu menjaga sikap dan perilaku sopan santun; (9) area terlarang yaitu batu pertapaan tidak boleh dijamah sembarang orang; dan (10) perempuan yang sedang haid tidak boleh memasuki mata air.

Pelanggaran terhadap aturan yang berlaku akan berdampak terhadap penerapan sanksi. Sanksi tersebut dapat berupa: (1) sanksi sesuai hukum negara, yaitu pemerintah akan menindak pihak-pihak yang bertanggung jawab atas kerusakan lingkungan hidup dengan sanksi pidana yang diatur dalam pasal 68 Undang-undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air dan pasal 99 Undang-undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup; dan (2) sanksi sesuai hukum adat, yaitu seseorang yang melanggar aturan tersebut akan mengalami kejadian di luar nalar seperti diganggu oleh makhluk halus hingga akan mendapatkan bencana seperti sakit sampai berhari-hari dan sebagainya (Amalia *et al.*, 2023).

Kearifan lokal ini berdampak positif bagi lingkungan karena kegiatan yang dilarang tersebut sebenarnya dapat mencemari dan merusak mata air dan lingkungannya. Kepercayaan tersebut memiliki potensi untuk digunakan sebagai sarana konservasi sumber mata air yang bersifat non fisik, sederhana dan murah, serta dapat memberikan pedoman bagi manusia untuk berperilaku dan berinteraksi dengan (Angin & Sunimbar, 2020; Amalia *et al.*, 2023).

f. Tradisi Masyarakat Songgobumi

Kearifan lokal yang dilakukan oleh warga Songgobumi tidak hanya berupa kegiatan pemeliharaan mata air dan konservasi yang berbasis kearifan lokal, melainkan juga diselenggarakan kegiatan adat sebagai bentuk rasa syukur dari masyarakat kepada alam karena sumber daya alam yang tersedia terpenuhi. Kegiatan adat masyarakat sebagai bentuk konservasi mata air Songgobumi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kegiatan Adat Masyarakat dalam Kearifan Lokal Konservasi Mata Air Songgobumi

No.	Kegiatan	Makna bagi Masyarakat	Makna konservasi mata air
1.	Tradisi <i>padusan</i>	Membersihkan diri sebelum memasuki bulan Ramadan.	
2.	Tradisi <i>kenduren</i>	Memohon berkah dan rasa syukur atas melimpahnya sumber daya alam.	
3.	Tradisi <i>kungkum</i>	Membersihkan jasmani dan rohani serta memohon berkah agar keinginannya terkabul.	Mempunyai nilai spiritual, sehingga masyarakat tidak berani merusak mata air.
4.	Tradisi <i>tungkeman</i>	Memohon berkah, kedamaian, dan perlindungan dari musibah.	
5.	Tradisi <i>suran</i>	Memohon berkah dan rasa syukur atas melimpahnya sumber daya alam.	
6.	Gotong Royong	Menjaga kebersihan mata air.	Menjaga kebersihan dan pelestarian mata air.

Kegiatan *kenduren* adalah kegiatan mengirim doa sebagai bentuk rasa syukur terhadap alam. *Kenduren* yang biasa diselenggarakan setiap malam Jumat Kliwon adalah tradisi *kenduren* nasi jagung. Kegiatan gotong royong dilakukan pada tanggal 1 Muharam (*satu Suro*). Kegiatan *kungkum* terdiri dari kegiatan hajatan. Sementara itu, kegiatan yang dilakukan pada malam Jumat Kliwon adalah *semedi* di mata air. Beberapa tradisi sudah ditiadakan oleh masyarakat Songgobumi karena dipercaya tidak akan memengaruhi kondisi mata air. Peniadaan beberapa tradisi ini merupakan perubahan sosial yang sesuai dengan pernyataan (Lubis *et al.*, 2018), yaitu perubahan sosial seperti ditiadakannya sebuah tradisi dipicu oleh penggunaan ilmu pengetahuan sehingga terjadi perubahan yang sangat cepat. Pengetahuan inilah yang akan memengaruhi modernisasi, tetapi modernisasi tidak dapat dipisahkan dari tradisi karena keduanya harus berjalan beriringan. Tradisi yang dipraktikkan oleh masyarakat memiliki nilai atau kekuatan spiritual yang dapat menjaga sumber daya alam dan menciptakan lingkungan hidup yang terjaga, terpelihara, dilindungi, dilindungi, dan diselamatkan (Triastianti *et al.*, 2018).

Berdasarkan hasil wawancara dengan masyarakat setempat, diketahui bahwa terdapat pembukaan lahan di kawasan Mata Air Songgobumi pada musim hujan tahun 2017 yang berpengaruh terhadap vegetasi di kawasan tersebut. Masyarakat setempat berperan dalam pemeliharaan kawasan mata air dengan membersihkan tampungan dan pipa air secara rutin, yang menandakan bahwa masyarakat sadar akan konservasi Mata Air Songgobumi. Upacara adat seperti *kenduren* berupa penyerahan sesaji di Mata Air Songgobumi merupakan bentuk rasa syukur masyarakat atas pemberian air. Upacara ini biasa dilakukan pada awal bulan *Sura* dalam kegiatan bersih desa serta kegiatan hajatan seperti menikah dan khitan.

4. Strategi Konservasi Berbasis Vegetasi dan Partisipasi Masyarakat

Strategi konservasi air dirumuskan melalui pendekatan sosio-ekologis terintegrasi yang menggabungkan penguatan analisis vegetasi dengan modal sosial masyarakat. Analisis vegetasi diperlukan untuk mengukur kesehatan ekosistem dan kestabilan ekosistem yang berdampak pada kestabilan debit mata air. Analisis vegetasi juga menjadi dasar arah

kebijakan konservasi mata air dan pengambilan keputusan para pemangku kebijakan. Analisis vegetasi juga memberikan data dan pengetahuan kepada masyarakat untuk pedoman dalam pelaksanaan konservasi mata air. Modal masyarakat melalui partisipasi dan kearifan lokal sangat diperlukan dalam keberlangsungan konservasi mata air. Masyarakat sangat berperan penting dalam menjaga dan melestarikan mata air di daerahnya. Kearifan lokal berupa aturan adat, budaya, dan etika bermasyarakat sangat mendukung upaya konservasi mata air.

SIMPULAN

Tumbuhan *A. decurrens* dan *C. sempervirens* merupakan spesies invasif yang mendominasi di strata pohon, yang berpotensi mengancam spesies asli. Spesies asli pegunungan juga banyak ditemukan, misalnya *F. fistulosa* atau *E. spicata* yang berpotensi dalam konservasi air. Vegetasi LCC didominasi oleh golongan rumput yang merupakan spesies asli pegunungan, yang sangat berpotensi meningkatkan porositas tanah dan infiltrasi air. Indeks Keanekaragaman spesies menunjukkan kategori sedang untuk strata pohon maupun LCC. Hal ini masih sangat baik untuk menjaga kestabilan ekosistem yang juga berdampak pada kestabilan ketersediaan air tanah. Konservasi Mata Air Songgobumi didukung kuat dengan integrasi partisipasi masyarakat dan kearifan lokal. Masyarakat menjalankan fungsi pengawasan, pemanfaatan, dan pelestarian melalui norma adat, budaya, dan kearifan lokalnya. Peran masyarakat merupakan modal yang sangat penting dalam konservasi mata air. Strategi konservasi mata air dirumuskan melalui pendekatan sosio-ekologis terintegrasi yang menggabungkan penguatan analisis vegetasi dengan modal sosial masyarakat. Penelitian selanjutnya disarankan berfokus pada analisis dinamika debit air dan efektivitas spesies asli dalam mitigasi dominasi spesies invasif, serta evaluasi peran masyarakat dalam konservasi mata air.

DAFTAR PUSTAKA

- Admojo, G.D., Kartini, & Jati, D.R. (2018). Analisis kearifan lokal masyarakat dalam menjaga sumber daya air. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 6(1), 1–10. DOI: 10.26418/jtllb.v6i1.25700
- Amalia, V., Sanjoto, T.B., & Hardati, P. (2023). Kearifan lokal sebagai upaya konservasi mata air mudal di Desa Bulu Kecamatan Bulu Kabupaten Rembang. *Jurnal Pendidikan Ilmu Pengetahuan Sosial Indonesia*, 8(2), 105–116. DOI: 10.26737/jpipsi.v8i2.3578
- An, H., & Ha, K. (2026). Impacts of seasonal vegetation dynamics on water balance and groundwater recharge: A monthly Leaf Area Index (LAI)-driven WetSpa-M application in the Sapgyocheon basin, South Korea. *Applied Water Science*, 16(3), 1–18. DOI: 10.1007/s13201-026-02783-4
- Angin, I.S., & Sunimbar. (2020). Kearifan lokal masyarakat dalam menjaga kelestarian hutan dan mengelola mata air di Desa Watowara, Kecamatan Titehena Kabupaten Flores Timur Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Geoedusains*, 1(1), 51–61. DOI: 10.30872/geoedusains.v1i1.195
- Ardhana, I.P.G. (2012). *Ekologi tumbuhan*. Udayana University Press.
- Bappenas, K.P. (2020). *Laporan Kinerja Kementerian PPN/Bappenas 2020*. Kementerian PPN/Bappenas.
- Barbour, M.G., Burk, J.G., & Pitts, W.D. (1987). *Terrestrial plant ecology*. 2nd Ed. Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.

- BPS. (2020). *Laporan kinerja Badan Pusat Statistik 2020*. Badan Pusat Statistik Republik Indonesia.
- Cao, M., & Xin, Z. (2025). Modified InVEST model for spatiotemporal variations of water conservation and its driving factors in the southwestern alpine Canyon region of China from 1990 to 2020. *Environmental and Sustainability Indicators*, 28, 101034, 1-12. DOI: 10.1016/j.indic.2025.101034
- da Silva Rangel Neto, R., Luz, L. D., & Aguiar Junior, T. R. (2020). Springs' water quality assessment in areas with different degrees of forest conservation: A study in tropical climate basins. *water, air, and soil pollution*, 231(5), 231–227. DOI: 10.1007/s11270-020-04564-4
- Dalziel, G. (2009). Community empowerment through development of locally sustainable drinking water sources. *Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets - Proceedings of the Pipelines 2009 Conference*, 360, 1289–1298. DOI: 10.1061/41069(360)121
- De Baets, S., Poesen, J., Meersmans, J., & Serlet, L. (2011). Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *Catena*, 85(3), 237–244. DOI: 10.1016/j.catena.2011.01.009
- Dumbois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aim and methods of vegetation ecology*. John Willey and Sons.
- Fachrul, M.F. (2007). *Metode sampling bioekologi*. Bumi Aksara.
- Fata, Y.A., Hidayatullah, R.R., Umami, M., Hadiwijoyo, E., Roviq, M., Arviano, C.I., Lestari, R.P., Ikhsanudin, M., Samudra, M.B., & Wulandari, T. (2025). Spring water quality, discharge, and vegetation diversity across land management regimes in UB Forest, Malang, East Java, Indonesia. *Biodiversitas*, 26(7), 3610–3622. DOI: 10.13057/biodiv/d260747
- Freitas, M.G., Rodrigues, S.B., Campos-Filho, E.M., do Carmo, G.H.P., da Veiga, J.M., Junqueira, R.G.P., & Vieira, D.L.M. (2019). Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years. *Forest Ecology and Management*, 438, 224–232. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.024
- García-Leoz, V., Villegas, J.C., Suescún, D., Flórez, C.P., Merino-Martín, L., Betancur, T., & León, J.D. (2018). Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: Improved water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Regional Environmental Change*, 18(4), 1117–1129. DOI: 10.1007/s10113-017-1249-7
- Gunawan. (2015). Kearifan masyarakat lereng Merapi bagian selatan, Kabupaten Sleman – Daerah Istimewa Yogyakarta. *Sosio Informa*, 1(2), 189–212. DOI: 0.33007/inf.v1i2.148
- Hidayati, D. (2016). Memudarnya nilai kearifan lokal masyarakat dalam pengelolaan sumber daya air. *Jurnal Kependudukan Indonesia*, 11(1), 39–48. DOI: 10.14203/jki.v11i1.36
- Hidayati, N., Majid, A., & Putri, M.B. (2019). Perilaku warga terhadap upaya pelestarian lingkungan: Studi kasus Mata Air Syakuro Desa Sentul. *Reka Ruang*, 2(2), 53–62. DOI: 10.33579/rkr.v2i2.1162
- Jeelani, G., Lone, S.A., Lone, A., & Deshpande, R.D. (2021). Groundwater resource protection and spring restoration in Upper Jhelum Basin (UJB), Western Himalayas. *Groundwater for Sustainable Development*, 15, 1–0. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100685
- Jumadi, & Harmawati, Y. (2019). Konservasi sumber daya air berbasis kearifan lokal untuk membentuk karakter peduli lingkungan : Studi tradisi sedekah bumi. *Jurnal Pancasila dan Kewarganegaraan*, 7(1), 54–59.
- Jung, M.S., Da Silva, J.A.G., Fachinetto, J.M., Copetti, C.M., Babeski, C.M., & Peter, C.L. (2024). Water springs: An immeasurable resource for ensuring sustainability. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 96(3), 1–5. DOI: 10.1590/0001-3765202420231010

- Jupri, A. (2021). Community-based spring conservation in Catchment area of Kemalik Lingsar, Lombok, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 712(1). DOI: 10.1088/1755-1315/712/1/012051
- Kobayashi, K., Syabri, I., Ari, I. R. D., & Jeong, H. (2014). Community Based Water Management and Social Capital. *Water Intelligence Online*, 13(1), 54–69. DOI: 10.2166/9781780405469
- Krebs, C.J. (2001). *The experimental analysis of distribution and abundance* (W. Earl, E. Fogarty, & H. Durrton, Eds.; 5th ed.). Benjamin Cummings.
- Kristanto, Y., Tarigan, S., June, T., Wahjunie, E.D., & Sulistyantara, B. (2022). Water-regulation ecosystem services in a multifunctional landscape dominated by monoculture plantations. *Land*, 11(818), 1–20. DOI: 10.3390/land11060818
- Kummu, M., Guillaume, J.H.A., De Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T.I.E., & Ward, P.J. (2016). The world's road to water scarcity: Shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*, 6. DOI: 10.1038/srep38495
- 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. *Water Supply*, 24(2), 517–542. DOI: 10.2166/ws.2024.008
- Li, W., Chen, G., Cai, J., Zheng, J., Liu, Y., Wu, Y., Wang, T., Sun, H., & Wang, K. (2026). Mixed forest-shrub had greater improved effects on topsoil hydraulic properties compared with pure forest and shrub in a semi-arid area. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 26, 1966–1976. DOI: 10.1007/s42729-025-02975-y
- Liu, R., Thomas, B.W., Shi, X., Zhang, X., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021). Effects of ground cover management on improving water and soil conservation in tree crop systems: A meta-analysis. *Catena*, 199, 105085. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105085
- Lubis, M.R., Kaskoyo, H., Yuwono, S.B., & Wulandari, C. (2018). Kearifan lokal dalam pengelolaan mata air di Desa Sungai Langka, Kecamatan Gedong Tataan, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. *Jurnal Hutan Tropis*, 6(1), 90–97. DOI: 10.20527/jht.v6i1.5109
- Luo, J., Zhou, X., Rubinato, M., Li, G., Tian, Y., & Zhou, J. (2020). Impact of multiple vegetation covers on surface runoff and sediment yield in the small basin of Nuerzhai, Hunan Province, China. *Forests*, 11(3), 1–16. DOI: 10.3390/f11030329
- Maridi. (2015). Mengangkat budaya dan kearifan lokal dalam sistem konservasi tanah dan air. *Proceeding Biology Education Conference*, 12(1), 20–39.
- Masduqi, A., Nugroho, A.R., & Wilujeng, S.A. (2020). Solution to water scarcity in the Eastern Indonesia: A case study of the Lembata Regency. *International Journal of GEOMATE*, 19(71), 69–76. DOI: 10.21660/2020.71.30531
- Mitchell, K. (2023). *Quantitative analysis by the Point-Centered Quarter Method*. <http://people.hws.edu/mitchell/PCQM.pdf>
- Mueller-Dombois, D., & Ellenbergh, H. (1974). *Aims and methode of vegetations ecology*. Ludgardis Ledheng.
- Novyitasari, P., Sahara, S.R., Marwa, S.B., Munajat, M., Supriyadi, Agustina, A., & Wicaksono, R.L. (2024). Urgensi perubahan status fungsi kawasan hutan gunung muria menjadi taman hutan raya. *Konservasi Hayati*, 20(2), 98–111. DOI: 10.33369/hayati.v20i2.36513
- Priyadarshini, R., Hairiah, K., Suprayogo, D., & Baon, J.B. (2011). Keragaman pohon penaung pada kopi berbasis agroforestri dan pengaruhnya terhadap layanan ekosistem. *Berk. Penel. Hayati*, 7, 81–85.

- Rahman, B., Pratiwi, A., & Sa'idah, S.F. (2020). Studi literatur : Peran masyarakat terhadap konservasi hutan. *Pondasi*, 25(1), 50–62. DOI: 10.30659/pondasi.v25i1.13036
- Rapiya, M., & Ramoelo, A. (2025). Groundwater–vegetation interactions in rangeland ecosystems: A review. *water (Switzerland)*, 17(1174), 1–20. DOI: 10.3390/w17081174
- Ren, S., Yang, X., Yang, Y., Liu, H., & Yang, F. (2023). Equilibrium analysis and prediction evaluation of the Heilongtan groundwater system in Lijiang of northwestern Yunnan Province. *Carsologica Sinica*, 42(6), 1183–1192. DOI: 10.11932/karst20230604
- Safira, G.C., Wulandari, C., & Kaskoyo, H. (2017). Kajian pengetahuan ekologi lokal dalam konservasi tanah dan air di sekitar Taman Hutan Raya Wan Abdul Rachman. *Jurnal Sylva Lestari*, 5(2), 23–29. DOI: 10.23960/jsl2523-29
- Sancayaningsih, R.P., Suprianingsih, N.W., & Andespa, M. (2016). Land use changes, trees and shrubs contributed to decrease of water debit in Geger spring at Pundong, Bantul, Yogyakarta, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 1744(1), 1–8. DOI: 10.1063/1.4953522/778085
- Saputra, A., Putri, R.C., Dewi, K., Nugroho, A.P., Purnomo, & Hadisusanto, S. (2025). Assessing the threat of ageratina riparia to biodiversity: A comprehensive study in Mount Merbabu National Park. *BIO Web of Conferences*, 190, 1–14. DOI: 10.1051/bioconf/202519001024
- Scarsbrook, M., Barquín, J., & Gray, D. (2019). New Zealand coldwater springs and their biodiversity. *Science for Conservation*. <https://www.scopus.com/pages/publications/85118847000?origin=document-preview-flyout>
- Sofiah, S., & Soejono. (2020). Stemflow, throughfall and rainwater interception of eight Indonesian tree species. *Biotropia*, 27(1), 1–13. DOI: 10.11598/btb.2020.27.1.726
- Sudarmadji, Darmanto, D., Widyastuti, M., & Lestari, S. (2016). Pengelolaan mata air untuk penyediaan air rumah tangga berkelanjutan di lereng selatan Gunung Api Merapi. *J. Manusia Dan Lingkungan*, 23(1), 102–110. DOI: 10.22146/jml.18779
- Sudarmadji, Sugiarto, F., Kurniasari, R.D., Riyanto, I.A., Cahyadi, A., & Sudrajat. (2017). Tradisi dan religi sebagai upaya konservasi mata air masyarakat perdesaan: Studi kasus masyarakat Kecamatan Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, 1(1), 27–34. DOI: 10.20886/JPPDAS.2017.1.1.27-34
- Susanto, S.A., Putri, D.M., Rahmawati, I., Sanjaya, M., & Sulistijorini, S. (2021). Keragaman permudaan pohon di area sumber air Blok Seda, Taman Nasional Gunung Ciremai. *Jurnal Sumberdaya HAYATI*, 7(2), 62–70. DOI: 10.29244/jsdh.7.2.62-70
- Susilawati, P.R. (2017). Fruticose dan foliose lichen di Bukit Bibi, Taman Nasional Gunung Merapi. *Jurnal Penelitian*, 21(1), 1–13. DOI: 10.23917/bioeksperimen.v7i2.11355
- Sutomo. (2019). *Acacia decurrens* di sebagian kawasan Taman Nasional Gunung Merapi Yogyakarta. *Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains Dan Teknologi*, 5(1), 38–42. DOI: 10.36722/sst.v5i1.321
- Taufiq, A. (2014). Upaya pemeliharaan lingkungan oleh masyarakat di Kampung Sukadaya Kabupaten Subang. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 14(14), 124–134.
- Tenywa, R., Omara, T., Kwikiriza, G., Angiro, C., & Ntambi, E. (2024). Spring Water Quality in a Flood-Prone Area of Kampala City, Uganda: Insights Furnished by Sanitary and Limnochemical Data. *Resources*, 13(10), 133. DOI: 10.3390/resources13100133
- Thapa, S., Pandit, A., Bhuchar, S., & Dhakal, M. (2025). Citizen science approach for springshed management: A comprehensive community-driven mapping and dataset of spring sources in Kavre, Nepal. *Data in Brief*, 60. DOI: 10.1016/j.dib.2025.111466

- Tirtalistyani, R., Murtiningrum, M., & Kanwar, R. S. (2022). Indonesia rice irrigation system: Time for Innovation. *Sustainability (Switzerland)*, 14(19). DOI: 10.3390/su141912477
- Tjitrosoedirdjo, S., Tjitrosoedirdjo, S.S., & Setyawati, T. (2019). *Tumbuhan invasif dan pendekatan pengelolaannya* (2nd ed.). SEAMEO BIOTROP (Southeast Asian Regional Centre for Tropical Biology). www.biotrop.org
- Triastianti, R.D., Nasirudin, N., Sukirno, & Warsiyah. (2018). Konservasi sumber daya air dan lingkungan melalui kearifan lokal di Desa Margodadi, Kecamatan Seyegan, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. *Jurnal Kawistara*, 7(3), 285–296. DOI: 10.22146/kawistara.15391
- Utagi, U.N., & Purandara, B.K. (2023). Tempo-spatial quality assessment of spring water using WQI and GIS modeling in Western Ghats region of India. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(11), 51–63. DOI: 10.1007/s41062-023-01275-7
- Wang, Q., Dong, S., Wang, W., & Wang, H. (2020). Effects of high intensive vegetation restoration on groundwater recharge in ecologically fragile mining area. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 45(9), 3245–3252. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0783
- Yogafanny, E., Annurhutami, F., Utami, S., Hermawan, S.G., Rahim, A.P., Rahmadana, A. D.W., Christanto, N., & Setiawan, M.A. (2025). Community-based conservation in Perwitosari Spring, Gondangan, Sleman, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1486(1), 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/1486/1/012046
- Yuliantoro, D., Budiastuti, M.T.S., & Mujiyo. (2021a). Analysis of vegetation in recharge area as climate change mitigation for conserving water springs in Keduang Sub-Watershed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1), 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/824/1/012007
- Yuliantoro, D., Budiastuti, M.T.S., & Mujiyo. (2021b). Analysis of vegetation in recharge area as climate change mitigation for conserving water springs in Keduang Sub-Watershed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1). DOI: 10.1088/1755-1315/824/1/012007
- Yuliantoro, D., & Frianto, D. (2019). Analisis vegetasi tumbuhan di sekitar mata air pada dataran tinggi dan rendah sebagai upaya konservasi mata air di Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 6(1), 1. DOI: 10.31258/dli.6.1.p.1-7
- Yustiningsih, M. (2019). Intensitas cahaya dan efisiensi fotosintesis pada tanaman naungan dan tanaman terpapar cahaya langsung. *Bioedu*, 4(2), 43–48. DOI: 10.32938/jbe.v4i2.385
- Zhang, W., An, S., Xu, Z., Cui, J., & Xu, Q. (2011). The impact of vegetation and soil on runoff regulation in headwater streams on the east Qinghai-Tibet Plateau, China. *Catena*, 87(2), 182–189. DOI: 10.1016/j.catena.2011.05.020