



signifikan terhadap sumber daya air, khususnya air tanah. Situasi ini mempertegas pentingnya pengelolaan air tanah secara berkelanjutan sebagai sumber utama dalam pemenuhan kebutuhan air bersih (Hendrayana dkk., 2021).

Pulau Jawa diprediksi sebagai wilayah yang rentan terhadap krisis air akibat pertumbuhan penduduk yang pesat serta tingginya aktivitas industri dan pertanian (Amalia & Sugiri, 2014; Santikayasa dkk., 2014). Peningkatan jumlah penduduk hingga 160,2 juta jiwa pada tahun 2025 (BPS, 2025) turut memperbesar kebutuhan air, sehingga kondisi sumber daya air di wilayah ini telah menunjukkan tingkat tekanan yang tinggi bahkan cenderung kritis (Husein, 2016; Rejekiingrum, 2014). Hasil analisis *Water Quality Index* (WQI) di Jawa Timur menunjukkan bahwa meskipun 59% air tanah masih tergolong sangat baik hingga baik, terdapat 27% yang berkategori buruk dan 11% tidak layak minum, terutama di wilayah aluvial pesisir yang berdekatan dengan zona industri dan pertanian, dengan limbah industri, limpasan pertanian, serta air limbah perkotaan teridentifikasi sebagai sumber utama kontaminasi, sehingga kondisi ini menegaskan bahwa kualitas air tanah masih menghadapi tekanan serius dan memerlukan pengelolaan yang tepat sasaran (Hendrayana dkk., 2025). Peningkatan jumlah penduduk, ekspansi pertanian irigasi, dan pembangunan ekonomi mendorong kenaikan permintaan air secara global, sehingga di wilayah dengan tekanan air tinggi air tanah dimanfaatkan sebagai sumber tambahan (Wada dkk., 2010), namun apabila pengambilannya melebihi laju pengisian ulang dalam jangka panjang, kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan muka air tanah, degradasi ekosistem, intrusi air asin di wilayah pesisir, serta gangguan terhadap sistem hidrologi alami (Gleeson dkk., 2010; Hendrayana dkk., 2024).

Provinsi Jawa Timur memiliki potensi sumber daya air yang besar dengan lebih dari dua ribu mata air, termasuk Kota Batu yang berperan sebagai kawasan hulu Daerah Aliran Sungai Brantas (Dinas PU Sumber Daya Air Provinsi Jawa Timur, 2022). Kondisi geologi vulkanik di wilayah ini membentuk sistem akuifer yang produktif dan mendukung keberadaan mata air dengan debit relatif stabil. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa mata air di daerah vulkanik dipengaruhi oleh litologi, struktur geologi, serta pola aliran air tanah (Yulistyarini dkk., 2009; Taryana, 2015). Tingkat kerentanan air tanah terhadap kontaminasi sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrogeologis setempat serta proses atenuasi alami yang terjadi di zona tanah, tak jenuh, dan jenuh, sehingga perlindungan yang diberikan oleh lingkungan alam dapat berbeda antar lokasi dan memerlukan kajian spesifik berbasis karakteristik lokal (Gogu & Dassargues, 2000).

Sumber Banyuning merupakan salah satu mata air penting di Kota Batu yang dimanfaatkan secara intensif oleh masyarakat. Perubahan penggunaan dan tutupan lahan yang dipicu oleh aktivitas antropogenik seperti ekspansi pertanian dan urbanisasi dapat memengaruhi sistem air tanah dengan mengubah komponen keseimbangan air, termasuk proses infiltrasi dan pengisian ulang air tanah. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan kapasitas resapan, meningkatkan tekanan terhadap akuifer, serta memengaruhi kuantitas dan kualitas sumber air tanah akibat perubahan komponen hidrologi dan meningkatnya aktivitas manusia di wilayah tangkapan air (Scanlon dkk., 2005; Poelmans dkk., 2010; Wang dkk., 2018). Sejumlah penelitian terdahulu di wilayah Malang Raya telah dilakukan, antara lain pemetaan zona perlindungan sumber air baku di Kota dan Kabupaten Malang oleh

Hendrayana (2003), klasifikasi mata air di Batu berdasarkan aspek topografi, struktur, dan stratigrafi oleh Yulistyarini dkk. (2009), serta evaluasi ketersediaan sumber air untuk pelayanan air bersih di Kota Batu oleh Tardan dkk. (2014) dan Pujiraharjo dkk. (2015) yang menyatakan ketersediaan air masih mencukupi meskipun terjadi kecenderungan penurunan debit. Selain itu, Taryana (2015) menganalisis perbedaan debit dan kualitas air antara Gunung Arjuno dan Gunung Panderman yang menunjukkan variasi parameter fisik dan kimia air. Meskipun berbagai kajian tersebut telah memberikan gambaran mengenai potensi, klasifikasi, kualitas, dan ketersediaan air, penelitian yang secara khusus mengintegrasikan analisis hidrogeologi rinci, deliniasi daerah imbuhan dan lepasan, serta pendekatan pemodelan aliran air tanah sebagai dasar ilmiah penetapan zona perlindungan Mata Air Sumber Banyuning masih terbatas.

Pemerintah telah menetapkan pedoman perlindungan mata air melalui pendekatan zonasi sebagaimana tertuang dalam Peraturan Direktorat Jenderal Pengendalian Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung Nomor 10 Tahun 2019. Upaya perlindungan tersebut dapat dilakukan melalui penetapan zona perlindungan di sekitar mata air untuk menjaga kualitas dan keberlanjutan distribusi air, yang umumnya dibagi menjadi tiga zona berdasarkan tingkat perlindungannya (Zhu & Balke, 2008). Namun, implementasi kebijakan tersebut memerlukan dukungan data geologi dan hidrogeologi yang memadai karena karakteristik litologi, struktur geologi, jenis akuifer, serta pola aliran air tanah sangat menentukan arah pergerakan air dan potensi penyebaran pencemar menuju mata air. Tanpa pemahaman kondisi bawah permukaan, penetapan batas zona perlindungan berisiko hanya bersifat administratif dan tidak mencerminkan sistem akuifer yang sebenarnya. Data geologi berperan dalam menentukan distribusi akuifer, sedangkan data hidrogeologi diperlukan untuk menentukan pola aliran air tanah dan daerah imbuhan. Dalam konteks tersebut, penelitian ini menggunakan metode kombinasi berupa pendekatan manual berbasis interpretasi kondisi lapangan, analisis analitik menggunakan parameter hidraulik akuifer, serta kajian hidrogeologi konseptual. Pendekatan ini dinilai lebih representatif dibandingkan metode standar yang umumnya menggunakan radius tetap atau pendekatan normatif, karena mampu mengintegrasikan kondisi geologi lokal dan karakteristik sistem aliran air tanah secara lebih komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan zona perlindungan kawasan Mata Air Sumber Banyuning sebagai dasar pengelolaan dan konservasi air tanah yang berkelanjutan di Kota Batu, sekaligus mendukung upaya perlindungan sumber daya air di wilayah hulu DAS Brantas.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang untuk menentukan zona perlindungan mata air Sumber Banyuning melalui pendekatan hidrogeologi kuantitatif dan spasial. Metode penelitian disusun secara bertahap mulai dari pengumpulan data lapangan, pengolahan dan analisis data, hingga penetapan zona perlindungan mata air. Pendekatan ini memungkinkan keterkaitan yang jelas antara tujuan penelitian dan metode yang digunakan.

### Lokasi penelitian

Penelitian dilaksanakan di Kecamatan Bumiaji, Kota Batu; Kecamatan Pujon, Kabupaten Malang; serta Kecamatan Gondang, Kabupaten Mojokerto, Provinsi Jawa Timur

(Gambar 1). Wilayah penelitian berada pada lereng tenggara Gunung Anjasmoro dengan luas sekitar 80 km<sup>2</sup>. Objek utama penelitian adalah mata air Sumber Banyuning yang terletak pada koordinat WGS 1984 UTM Zona 49S (668165 E dan 9133665 S) dengan elevasi ±984 mdpl. Secara hidrogeologis, wilayah ini termasuk dalam Cekungan Air Tanah Brantas dan Daerah Aliran Sungai Brantas sesuai dengan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2017.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Kediri dan Malang (Santosa dan Atmawinata, 1992; Santosa dan Suwarti, 1992), daerah penelitian termasuk dalam wilayah yang dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik Gunung Arjuno–Welirang yang berumur Kuartar. Aktivitas vulkanik tersebut menghasilkan satuan batuan yang kompleks dengan variasi litologi yang mencerminkan proses geologi berulang akibat erupsi gunung api. Geologi regional Kota Batu tersusun atas lima satuan batuan utama, yaitu Batuan Gunungapi Anjasmoro Tua (Qpat), Batuan Gunungapi Anjasmoro Muda (Qpva), Batuan Gunungapi Kawi–Butak (Qpkb), Batuan Gunungapi Arjuno–Welirang (Qvaw), dan Batuan Gunungapi Panderman (Qvp). Secara stratigrafi, daerah penelitian didominasi oleh tiga satuan utama, yaitu Qpat, Qpva, dan Qvaw, yang tersusun dari batuan vulkanik berkompposisi andesit hingga basal.

### Rancangan penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan penelitian deskriptif-analitis dengan pendekatan kuantitatif. Delineasi zona perlindungan mata air dilakukan melalui dua tahap utama, yaitu pemetaan lapangan dan analisis data. Pemetaan lapangan bertujuan memperoleh data primer berupa kondisi geologi, hidrogeologi, serta karakteristik mata air dengan

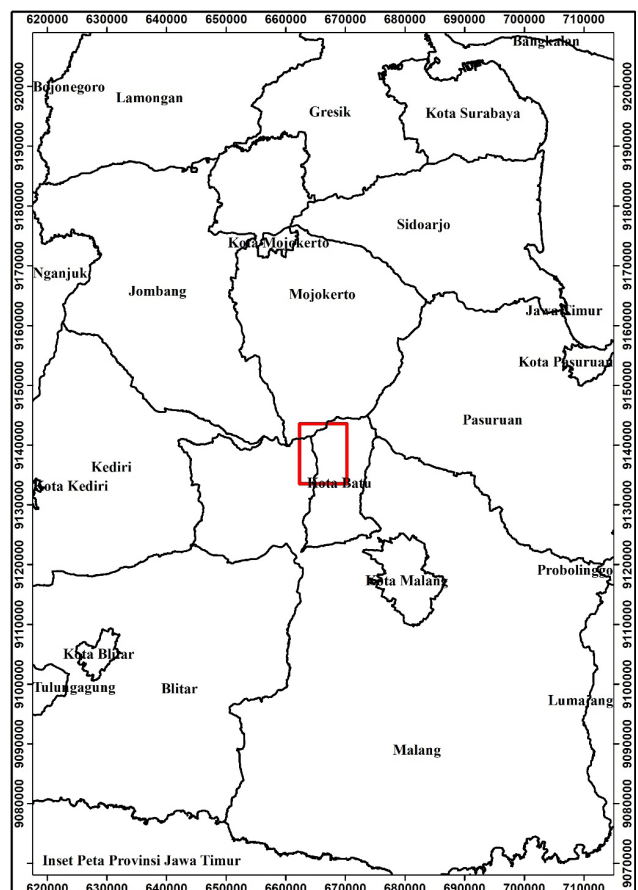
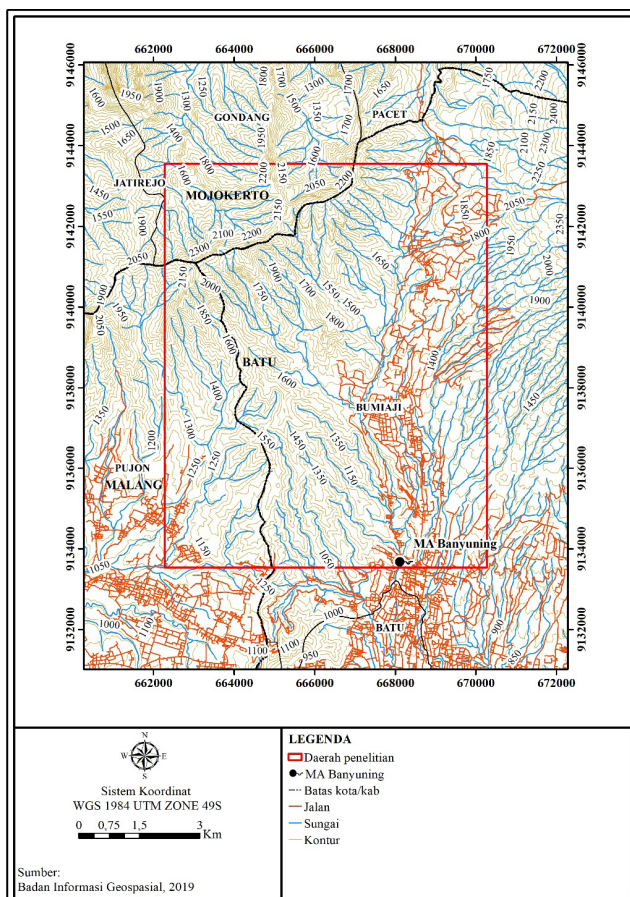
interpolasi muka air tanah dilakukan menggunakan *Inverse Distance Weighted (IDW)* pada *ArcGIS Desktop 10.8* untuk memperoleh peta kontur serta arah aliran, sedangkan analisis data digunakan untuk menentukan batas zona perlindungan sesuai dengan tujuan penelitian.

### Teknik pengumpulan data

Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan yang meliputi pengamatan litologi secara megaskopis, pencatatan titik kemunculan mata air, serta pengukuran debit mata air Sumber Banyuning. Data sekunder meliputi data curah hujan dan temperatur udara yang diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Stasiun Klimatologi Jawa Timur untuk periode 2015–2024, peta topografi yang bersumber dari Badan Informasi Geospasial, peta geologi regional yang diterbitkan oleh Direktorat Geologi Tata Lingkungan, serta data hidrogeologi berupa peta cekungan air tanah dan peta hidrogeologi regional yang diperoleh dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral dan Direktorat Geologi Tata Lingkungan.

### Pengukuran debit mata air

Pengukuran debit mata air Sumber Banyuning dilaksanakan pada bulan April, Mei, dan Juni tahun 2025, bertepatan dengan musim hujan, menggunakan metode apung. Metode ini dipilih karena dapat mewakili kondisi debit mata air yang muncul melalui beberapa rekahan batuan. Pengukuran dilakukan dengan dua parameter utama, yaitu kecepatan aliran air dan luas penampang aliran. Luas penampang mata air Sumber Banyuning dihitung menggunakan Persamaan (1).



Gambar 1. Peta daerah penelitian mata air Sumber Banyuning dan sekitarnya

$$A = W \times H \dots\dots\dots(1)$$

di mana:

- A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)
- W = Lebar penampang (m)
- H = Kedalaman penampang (m)

Kecepatan aliran air pada mata air diperoleh dengan membagi panjang lintasan aliran (L) terhadap waktu rata-rata (T rata-rata) yang diperlukan oleh benda apung untuk mencapai titik akhir penampang aliran. Pengukuran waktu tempuh dilakukan sebanyak sepuluh kali pada lintasan yang sama untuk meminimalkan kesalahan akibat fluktuasi aliran dan faktor eksternal, kemudian dihitung nilai rata-ratanya sebagai dasar perhitungan kecepatan aliran. Perhitungan kecepatan tersebut dinyatakan pada Persamaan (2).

$$V = \frac{L}{T} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

- V = Kecepatan (m/detik)
- L = Panjang lintasan (m)
- T = Waktu rata-rata (detik)

Debit mata air dihitung dengan mengalikan luas penampang aliran (A) dan kecepatan air (V), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$Q = A \times V \dots\dots\dots(3)$$

di mana:

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

**Studi hidrologi daerah penelitian**

Ketersediaan air tanah berkaitan erat dengan sistem hidrologi (Davie, 2002). Tiga komponen utama yang memengaruhi siklus hidrologi ialah evaporasi, presipitasi, dan limpasan. Siklus tersebut dapat dimodelkan secara matematis untuk memahami proses hidrologi dalam periode tertentu yang dikenal sebagai neraca air, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$P = ETp + Ro + I + \Delta SM \dots\dots\dots(4)$$

di mana:

- P = Presipitasi (mm/tahun)
- ETp = Evapotranspirasi potensial (mm/tahun)
- Ro = Limpasan permukaan (mm/tahun)
- I = Infiltrasi (mm/tahun)
- ΔSM = Perubahan kelembaban tanah

Nilai evapotranspirasi dihitung menggunakan metode Thornthwaite (1948) yang dikutip dalam Davie (2002), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (5-7).

$$ETp = 16b \left( \frac{10t}{I} \right)^a \dots\dots\dots(5)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i, i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1,514} \dots\dots\dots(6)$$

$$a = 6,7 \times 10^{-7} I^3 - 7,7 \times 10^{-5} I^2 + 0,0181 + 0,49 \dots\dots(7)$$

di mana:

- b = Faktor koreksi
- t = Temperatur rata-rata bulanan (°C)
- I = Indeks panas tahunan
- i = Panas bulanan

Jumlah infiltrasi ditentukan menggunakan metode neraca air tanah dengan memperhitungkan komponen infiltrasi serta aliran keluar yang meliputi rembesan dan evaporasi. Pendekatan ini digunakan untuk memperkirakan volume air yang masuk ke dalam zona jenuh air tanah.

**Analisis daerah imbuhan**

Luasannya dihitung melalui integrasi data debit mata air dan imbuhan rata-rata tahunan menggunakan metode *soil water balance* yang didasarkan pada analisis curah hujan dan suhu selama periode 2015–2024 sebagai berikut:

- a. Pengumpulan data curah hujan dan suhu udara.
- b. Menghitung evapotranspirasi (ETp) yang dipengaruhi oleh kondisi permukaan, curah hujan tahunan, dan ketersediaan air di daerah aliran sungai (DAS), menggunakan persamaan 5–7.
- c. Menentukan nilai *Available Water Capacity* (AWC) tanah di daerah penelitian.
- d. Menghitung selisih antara curah hujan rata-rata (P) dan evapotranspirasi potensial (ETp) untuk menentukan nilai *Accumulated Water Potential Loss* (Acc.Pot.WL), yaitu akumulasi nilai negatifnya.

$$P - ETp \dots\dots\dots(8)$$

$$Acc.Pot.WL = P - ETp \dots\dots\dots(9)$$

- e. Menghitung *Soil Moisture* (SM), yaitu kelembaban tanah yang bernilai ≤ kapasitas air tersedia (AWC) dan ditentukan melalui tabel, grafik, atau persamaan yang mempertimbangkan faktor meteorologi dan hidrologi.
- f. Menghitung perubahan kelembaban tanah (ΔSM). Perubahan kelembaban tanah hanya dicatat jika SM < AWC, dengan menghitung selisih SM bulan tersebut dan bulan sebelumnya. Jika P - ETp > 0 dan SM < AWC, selisih tersebut ditambahkan ke SM bulan sebelumnya untuk memperbarui kelembaban tanah.
- g. Menghitung *Actual Evapotranspiration* (ETr)

$$ETr = ETp \text{ ketika } P > ETp \dots\dots\dots(10)$$

$$ETr = P + |\Delta SM| \text{ ketika } P < ETp \dots\dots\dots(11)$$

- h. Menghitung *Moisture Deficit* (D), yaitu selisih antara evapotranspirasi potensial (ETp) dan evapotranspirasi aktual (ETr).

$$D = ETp \text{ dan } ETr \text{ (12)}$$

- i. Menentukan *Moisture Surplus* (S). Jika tanah berada pada *field capacity* dan  $P > ETp$ , kelebihan air dianggap surplus dan dapat menjadi limpasan permukaan (*Runoff*, Ro). *Moisture Surplus* (S) dihitung sebagai selisih antara P - ETp dengan perubahan kelembaban tanah ( $\Delta SM$ ).

$$Surplus = surface\ runoff + groundwater\ runoff \dots(13)$$

$$S = P - ETp - \Delta SM \dots\dots\dots(14)$$

- j. *Runoff* (Ro) dihitung menggunakan metode *Soil Conservation Service* (SCS) *Curve Number*. Nilainya diperoleh dari diagram (Hudson, 1993) atau dihitung menggunakan persamaan 24-25 (*Soil Conservation Service*, 1972) (Gambar 2).

$$Ro = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \dots\dots\dots(15)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \dots\dots\dots(16)$$

- k. Menghitung infiltrasi air tanah (I) dengan mengurangi *runoff* dari surplus air.

$$I = S - Ro \dots\dots\dots(26)$$

Hasil perhitungan infiltrasi (imbuhan) ini dipetakan pada nomogram yang menghubungkan debit mata air dengan imbuhan rata-rata tahunan, untuk memperoleh luasan daerah imbuhan.

**Zona perlindungan mata air Sumber Banyuning**

Penetapan zona perlindungan mata air Sumber Banyuning bertujuan menentukan batas alami daerah imbuhan. Klasifikasi zona perlindungan ditetapkan melalui metode hidrogeologi, manual dan analitis yang dikembangkan oleh (Carey dkk., 2009).

**Metode hidrogeologi**

Batas zona lindung ditentukan berdasarkan analisis hidrogeologi dan kondisi geologi, dengan mempertimbangkan parameter yang memengaruhi penetapan batas daerah tangkapan air. Secara umum, air tanah memisahkan wilayah tangkapan pada area perbatasannya.

**Metode manual**

Penentuan zona dengan metode manual hanya berfungsi sebagai acuan karena tidak sepenuhnya menggambarkan kondisi hidrogeologi sebenarnya. Metode ini berasumsi bahwa permukaan piezometrik bersifat horizontal dan daerah tangkapan air berbentuk melingkar dengan radius tertentu. Meskipun jarang sesuai dengan kondisi alami, metode ini tetap berguna saat data gradien hidrolik dan arah aliran air tanah tidak tersedia. Perhitungan luas serta radius zona perlindungan dilakukan menggunakan Persamaan (8-9).

$$A_s = \frac{Q}{U} \dots\dots\dots(8)$$

$$r = \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} \dots\dots\dots(9)$$

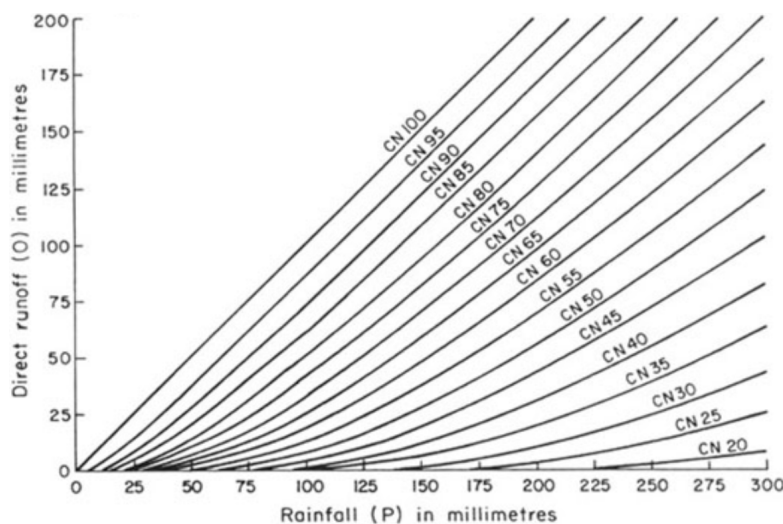
Luas serta radius zona perlindungan dengan waktu tempuh 50 hari dan 400 hari dihitung menggunakan Persamaan (10) dan (11).

$$A_d = \frac{Q \times t_d}{M \times n_e} \dots\dots\dots(10)$$

$$r_d = \sqrt{\frac{Q \times t_d}{\pi \times M \times n_e}} \dots\dots\dots(11)$$

di mana:

- $A_s$  = Luas suatu daerah sumber tangkapan air (m<sup>2</sup>)
- Q = Debit atau tingkat pemompaan air tanah dari suatu sumber (m<sup>3</sup>/detik)
- U = Area imbuhan tahunan (meter/detik)



Gambar 2. Hubungan curah hujan dan runoff menggunakan CN (Hudson, 1993)

$r$  = jarak dari batas zona tangkapan air hingga sumber mata air (meter)  
 $A_d$  = Luas dari zona perlindungan 50 hari  
 $r_d$  = Jarak dari zona perlindungan 50 hari  
 $t_d$  = Waktu perjalanan air tanah 50 hari (detik)  
 $M$  = Ketebalan akuifer (m)  
 $n_e$  = Porositas efektif

$Q$  = debit aliran air tanah ( $m^3/detik$ )  
 $K_f$  = konduktivitas hidraulika akuifer (m/detik)  
 $M$  = ketebalan akuifer (m)  
 $i_o$  = gradien hidraulika sebelum pemompaan  
 $T$  = transmisivitas akuifer ( $m^2/detik$ )  
 $t_{50}$  = waktu 50 hari =  $4,32 \times 10^6$  detik  
 $n_e$  = porositas efektif

**Metode solusi analitik**

Metode ini bersifat semi-kuantitatif dan lebih menggambarkan kondisi hidrogeologi lokal dibandingkan pendekatan manual. Penerapannya memerlukan data seperti arah aliran air tanah, ketebalan akuifer, dan konduktivitas hidrolis. Hasil deliniasi zona berbentuk elipsoidal, dengan perhitungan didasarkan pada karakteristik akuifer serta analisis daerah aliran sungai menggunakan Persamaan (12).

$$X_L = \frac{Q}{2 \times \pi \times K_f \times M \times i_o} = \frac{Q}{2 \times \pi \times T \times i_o} \dots(12)$$

Lebar maksimum daerah tangkapan air yang posisinya tegak lurus terhadap arah aliran dapat ditentukan menggunakan Persamaan (13).

$$Y_L = \frac{Q}{K_f \times M \times i_o} = \frac{Q}{T \times i_o} \dots\dots\dots(13)$$

Nilai gradien hidrolis dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (14).

$$i_o = \frac{\Delta h}{l} \dots\dots\dots(14)$$

Lebar maksimum dari titik nol ke arah hulu (Dwr) dapat ditentukan menggunakan Persamaan (15).

$$D_{wr} = \frac{X_L^2 + \left(\frac{Y_L}{2}\right)^2}{2 \times X_L} \dots\dots\dots(15)$$

Batas Zona II (50 hari) dan Zona III (400 hari) yang dinyatakan sebagai radius dari titik nol dihitung dengan menggunakan Persamaan (16) dan (17).

$$r_{50} = \sqrt{\frac{Q \times t_{50}}{\pi \times M \times n_e} + \frac{K_f \times i_o}{n_e} \times t_{50}} \dots\dots\dots(16)$$

$$D_{wo} = 8 \times r_{50} \dots\dots\dots(17)$$

di mana:

$\Delta h$  = perbedaan muka air tanah (m)  
 $l$  = jarak (m)

Penentuan batas zona perlindungan mata air lebih rumit dibandingkan dengan zona perlindungan sumur produksi karena metode perhitungan manual tidak sesuai (Hendrayana dan Putra, 2008). Delineasi zona III dapat dilakukan dengan memadukan hasil kajian hidrogeologi untuk menentukan batas sistem mata air. Perkiraan area imbuhan dapat diperoleh menggunakan nomogram (Todd, 1980 dalam Hendrayana & Putra, 2008) berdasarkan hubungan antara debit mata air dan besarnya imbuhan air tanah tahunan. Data yang digunakan dalam analisis ini meliputi debit mata air hasil pengukuran lapangan serta estimasi nilai imbuhan air tanah tahunan yang dihitung dari hasil analisis neraca air. Parameter tersebut kemudian digunakan sebagai input pada nomogram Todd untuk memperkirakan luas area imbuhan yang selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan batas zona perlindungan mata air.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**  
**Geologi daerah penelitian**

Hasil pemetaan lapangan menunjukkan litologi dominan berupa andesit dan breksi gunung api (Gambar 6). Satuan andesit Anjasmoro menempati bagian barat daerah penelitian dengan luasan sekitar 70%. Batuan ini berwarna abu-abu hingga coklat, berstruktur masif, dan bertekstur porfiroafanitik dengan ukuran butir mineral <1–2 mm. Komposisi mineral terdiri atas plagioklas, olivin, dan piroksen yang membentuk massa dasar. Satuan ini merupakan batuan tertua yang diperkirakan berasal dari aktivitas Gunung Anjasmoro (Gambar 3).

Satuan andesit Arjuno–Welirang menempati bagian timur dengan luasan sekitar 16,25%. Batuan ini berwarna abu-abu kehitaman, bertekstur porfiroafanitik, dan berstruktur masif dengan komposisi mineral utama plagioklas dan piroksen serta sedikit olivin. Beberapa singkapan batuan ini menjadi lokasi keluarnya mata air di sekitar wilayah penelitian (Gambar 4).

Satuan breksi gunung api Arjuno–Welirang tersebar pada lereng dan lembah sungai, meliputi sekitar 13,75% area penelitian. Breksi ini berwarna coklat gelap hingga abu-abu kecokelatan, berstruktur masif, sortasi buruk, dan kemas terbuka, dengan fragmen andesit dan skoria berukuran lapili hingga bom. Matriks penyusunnya berupa abu vulkanik. Berdasarkan cirinya, satuan ini diinterpretasikan sebagai hasil erupsi eksplosif Gunung Arjuno–Welirang yang diendapkan secara cepat tanpa transportasi jauh (Gambar 5).

**Hidrogeologi daerah penelitian**

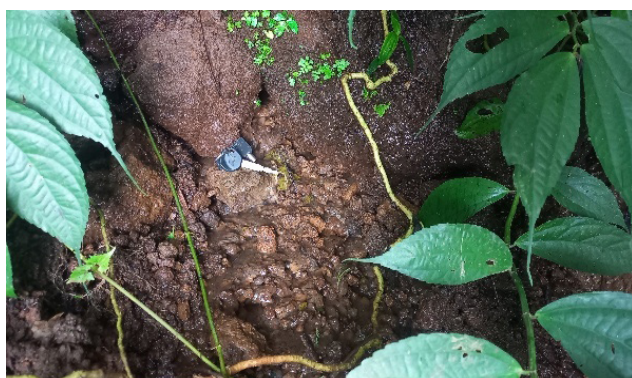
Berdasarkan Peta Hidrogeologi Indonesia Lembar Kediri (Poespowardoyo, 1984), daerah penelitian memiliki sistem akuifer yang tersusun atas aliran melalui celahan dan ruang antarbutir, serta akuifer produktif kecil (Gambar 7). Secara umum, akuifer tersebut dibagi menjadi dua zona utama, yaitu akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antarbutir yang memiliki produktivitas sedang hingga setempat, serta



**Gambar 3.** Andesit Anjasmoro di STA 32



**Gambar 4.** Andesit Arjuno–Welirang di STA 1



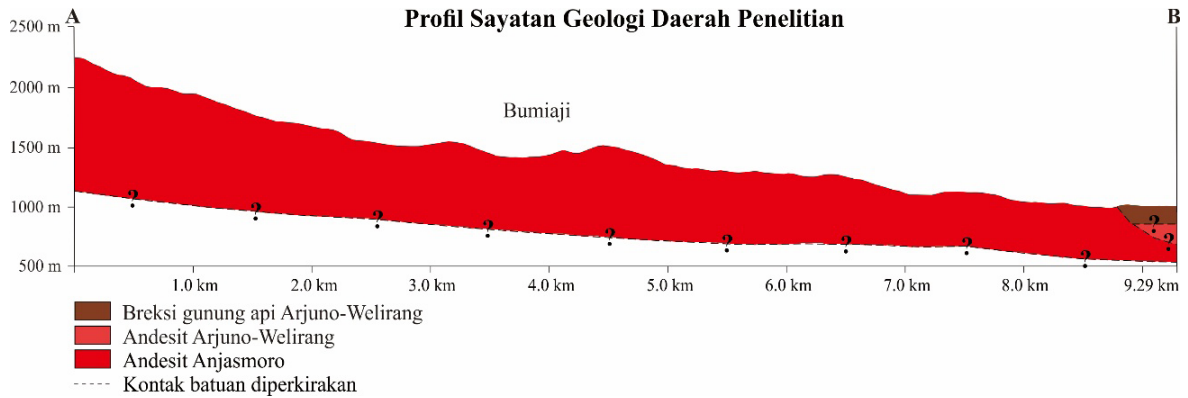
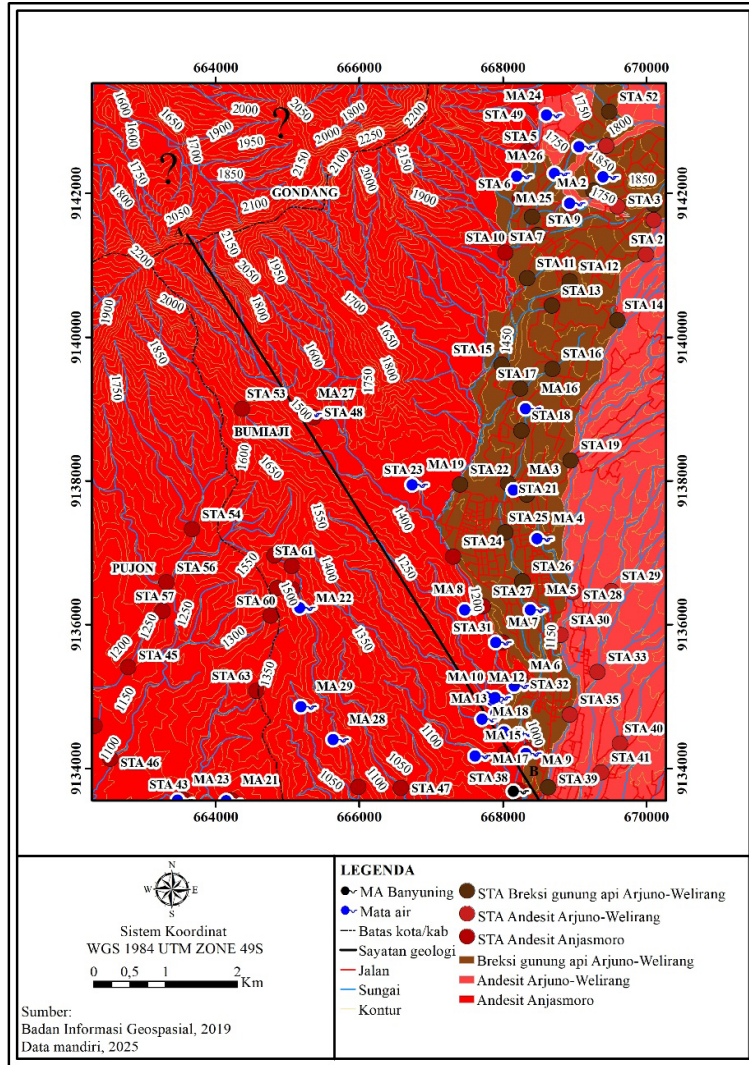
**Gambar 5.** Breksi andesit Arjuno–Welirang di MA 6 dan MA 8

akuifer produktif kecil yang bersifat lokal. Akuifer produktif sedang memiliki penyebaran luas dengan keterusan yang bervariasi dan muka air tanah dalam, sedangkan akuifer produktif setempat memiliki muka air tanah yang sangat dalam dengan kemunculan mata air berdebit kecil di beberapa lokasi. Adapun akuifer produktif kecil memiliki keterusan sangat rendah dan penyebaran terbatas pada lembah serta zona pelapukan batuan.

Litologi penyusun wilayah penelitian didominasi oleh batuan vulkanik Kuartar Tua dan endapan vulkanik muda yang terdiri atas tuf, lahar, breksi, serta lava andesit–basal.

Variasi kelulusan batuan berkisar dari rendah hingga sedang, tergantung pada tingkat rekahan dan porositas batuan. Endapan lahar dan lava vesikular umumnya menunjukkan kelulusan sedang hingga tinggi. Daerah penelitian termasuk dalam Cekungan Air Tanah Brantas, salah satu cekungan utama di Jawa Timur dengan luas 6.186 km<sup>2</sup> yang mencakup 19 kabupaten/kota.

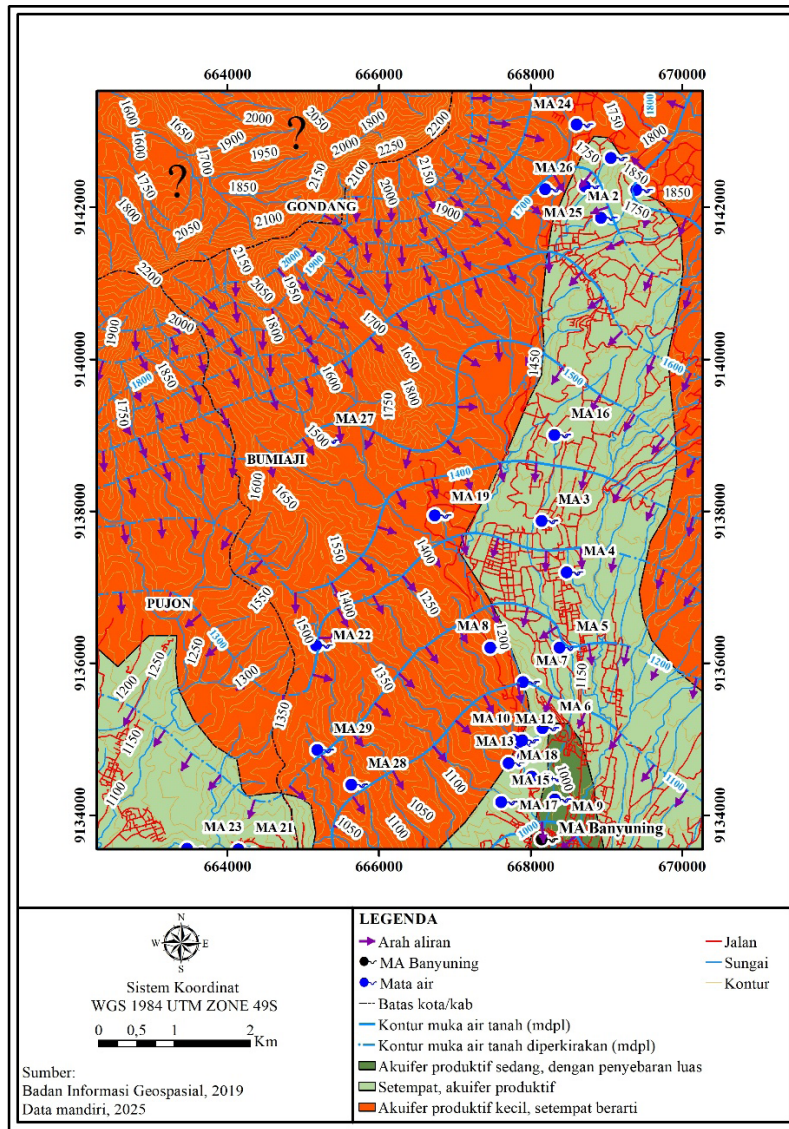
Hasil observasi terhadap 30 mata air menunjukkan bahwa kemunculan air tanah umumnya berada pada elevasi 984–1.837 mdpl. Mata air Sumber Banyuning berfungsi sebagai mata air utama dengan pola pemanfaatan oleh masyarakat, PDAM,



**Gambar 6.** (a) Peta geologi daerah penelitian berdasarkan Peta Geologi Lembar Kediri dan Malang (Santosa dan Atmawinata, 1992; Santosa dan Suwarti, 1992), dan (b) profil geologi daerah penelitian

dan fasilitas umum (Gambar 8). Hasil interpolasi data muka air tanah menunjukkan elevasi antara 984–2.000 mdpl dengan arah aliran dominan dari barat laut ke tenggara, mengikuti kemiringan lereng Gunung Anjasmoro (Gambar 7). Pola aliran tersebut berkaitan erat dengan kondisi morfologi daerah penelitian yang didominasi lereng vulkanik dengan gradien topografi relatif curam, sehingga aliran air tanah cenderung mengikuti arah kemiringan lereng sebagai kontrol utama gaya gravitasi. Secara litologi, satuan batuan penyusun berupa material vulkanik berpori dan berrekahan berperan sebagai media akuifer yang memungkinkan infiltrasi dan pergerakan

air tanah secara lateral menuju zona lepasan. Selain itu, dalam sistem hidrogeologi regional, daerah dengan elevasi lebih tinggi berfungsi sebagai zona imbuhan, sedangkan bagian yang lebih rendah menjadi zona lepasan, sehingga arah aliran dari barat laut ke tenggara mencerminkan keseimbangan antara kontrol topografi, sifat hidraulik batuan, dan konfigurasi sistem akuifer regional. Kondisi ini menunjukkan bahwa pola aliran air tanah di kawasan penelitian tidak bersifat acak, melainkan dikontrol secara simultan oleh faktor morfologi, litologi, dan kerangka hidrogeologi regional.



Gambar 7. Peta hidrogeologi dan pola aliran air tanah daerah penelitian berdasarkan Peta Hidrogeologi Indonesia Lembar Kediri (Poespowardoyo, 1984) dengan modifikasi



Gambar 8. Rekahan keluarnya air tanah pada mata air Sumber Banyuning dari batuan andesit

**Debit dan imbuhan mata air Sumber Banyuning**

Pengukuran debit mata air Sumber Banyuning pada April hingga Juni menggunakan metode apung menunjukkan hasil stabil dengan rata-rata debit sekitar 0,104 m<sup>3</sup>/detik atau 104 liter/detik (Tabel 1).

Imbuhan mata air Sumber Banyuning dihitung menggunakan metode neraca air tanah, dengan laju terendah sebesar 313,36 mm/tahun pada 2024 dan tertinggi 805,61 mm/tahun pada 2022. Berdasarkan analisis data periode 2015–2024, rata-rata laju imbuhan mencapai 453,31 mm/tahun, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 1.** Perhitungan debit mata air Sumber Banyuning

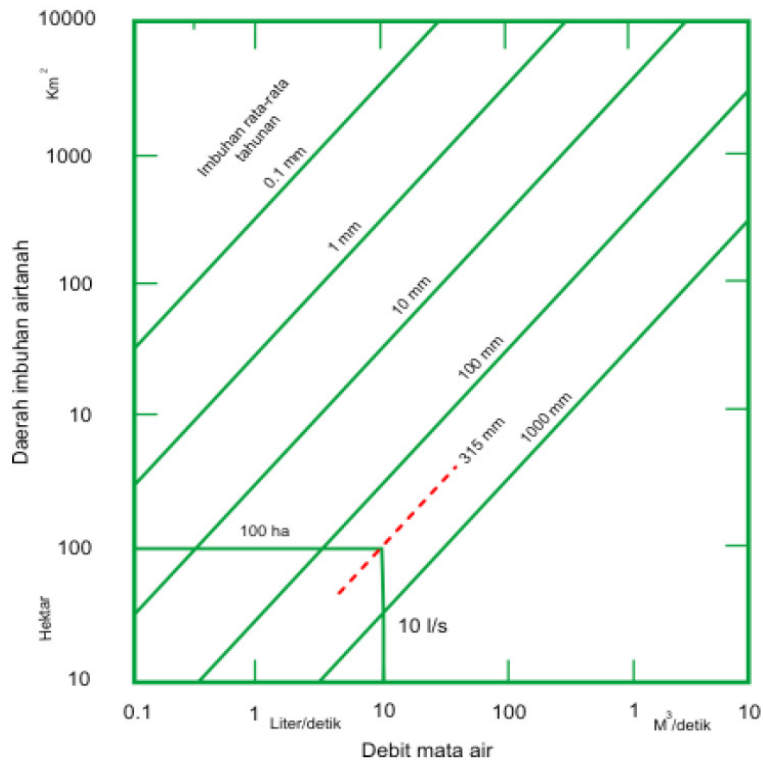
Bulan pengukuran	Panjang lintasan (m)	Luas penampang (m <sup>2</sup> )	Kecepatan aliran air (m/detik)	Debit mata air (m <sup>3</sup> /detik)
April 2025	5	0,226	0,468	0,106
Mei 2025	5	0,216	0,471	0,102
Juni 2025	5	0,226	0,461	0,104
Rata-rata				0,104

Sumber: Hasil analisis data (2026)

**Tabel 2.** Imbuhan tahunan daerah penelitian

Tahun	Imbuhan (mm/tahun)
2015	432,61
2016	421,55
2017	479,88
2018	393,40
2019	440,78
2020	379,07
2021	481,72
2022	805,61
2023	384,75
2024	313,76
Rata-rata	453,31

Sumber: Hasil analisis data (2026)



**Gambar 9.** Nomogram hubungan antara luas daerah imbuhan mata air Sumber Banyuning, debit mata air, dan rata-rata imbuhan tahunan di wilayah penelitian

**Tabel 3.** Perbandingan luasan masing-masing metode

Metode	Zona I	Zona II	Zona III	Zona Imbuhan
Hidrogeologi	-	-	-	10 km <sup>2</sup>
Manual	Radius: 10 m Luas: 121 m <sup>2</sup>	Radius: 336 m Luas: 0,136 km <sup>2</sup>	-	Luas: 9,86 km <sup>2</sup>
Solusi analitik	Radius: 10 m Luas: 121 m <sup>2</sup>	Radius: 2,56 km Luas: 4,37 km <sup>2</sup>	-	Luas: 5,63 km <sup>2</sup>
Kombinasi	Radius: 10 m Luas: 121 m <sup>2</sup>	Radius: 336 m Luas: 0,136 km <sup>2</sup>	Radius: 2,56 km Luas: 4,24 km <sup>2</sup>	Radius: 4,32 km Luas: 5,63 km <sup>2</sup>

Sumber: Hasil analisis data (2026)

Daerah imbuhan mata air Sumber Banyuning ditentukan berdasarkan hubungan antara debit mata air dan nilai imbuhan tahunan dengan menggunakan nomogram Todd (1980). Debit rata-rata mata air Sumber Banyuning sebesar 0,104 m<sup>3</sup>/detik, dengan rata-rata imbuhan tahunan 453,31 mm/tahun. Hasil plot menunjukkan luas daerah imbuhan sekitar ±10 km<sup>2</sup> (Gambar 9).

### Zona perlindungan mata air Sumber Banyuning

Penentuan zona perlindungan Mata Air Sumber Banyuning dilakukan menggunakan tiga pendekatan utama yaitu metode hidrogeologi, metode manual, dan metode solusi analitik. Ketiga metode tersebut menghasilkan delineasi zona perlindungan yang berbeda karena menggunakan parameter dan pendekatan analisis yang tidak sama. Metode hidrogeologi lebih menekankan pada interpretasi kondisi lapangan seperti arah aliran air tanah, topografi, serta hubungan antara daerah imbuhan dan daerah lepasan. Metode manual menggunakan parameter hidrogeologi seperti debit mata air, imbuhan air tanah tahunan, ketebalan akuifer, dan porositas efektif. Sementara itu, metode solusi analitik didasarkan pada pendekatan matematis dengan mempertimbangkan parameter hidraulik akuifer seperti konduktivitas hidrolis, transmisivitas, serta ketebalan akuifer.

Perbedaan pendekatan tersebut menghasilkan luasan zona perlindungan yang bervariasi. Metode hidrogeologi memberikan gambaran umum mengenai daerah imbuhan yang memiliki luas sekitar 10 km<sup>2</sup> dan berbentuk oval mengikuti arah aliran air tanah (Gambar 10a). Metode manual menghasilkan zona perlindungan yang lebih terbatas dengan radius zona II sekitar 0,336 km dari mata air (Gambar 10b). Sementara itu, metode solusi analitik menghasilkan zona perlindungan yang lebih luas karena mempertimbangkan parameter hidraulik akuifer yang memengaruhi pergerakan air tanah dalam sistem akuifer (Gambar 10c). Perbandingan hasil zonasi dari masing-masing metode dapat dilihat pada Tabel 3.

Berdasarkan perbandingan tersebut terlihat bahwa masing-masing metode memiliki kelebihan dan keterbatasan dalam menentukan batas zona perlindungan mata air. Oleh karena itu, pendekatan kombinasi digunakan untuk mengintegrasikan keunggulan masing-masing metode sehingga menghasilkan delineasi zona perlindungan yang lebih representatif terhadap kondisi hidrogeologi setempat.

Hasil integrasi metode hidrogeologi, manual, dan solusi analitik menghasilkan empat zona perlindungan pada Mata Air Sumber Banyuning (Gambar 10d). Zona perlindungan I memiliki radius sekitar 10 meter dengan luas sekitar 121 m<sup>2</sup> dan berfungsi sebagai zona inti yang melindungi mata air dari potensi kontaminasi langsung di sekitar titik keluarnya

air. Zona perlindungan II memiliki radius sekitar 336 m dari mata air dengan luas sekitar 0,136 km<sup>2</sup> dan berfungsi sebagai zona penyangga untuk mengendalikan potensi masuknya kontaminan patogen seperti bakteri koliform ke sistem akuifer.

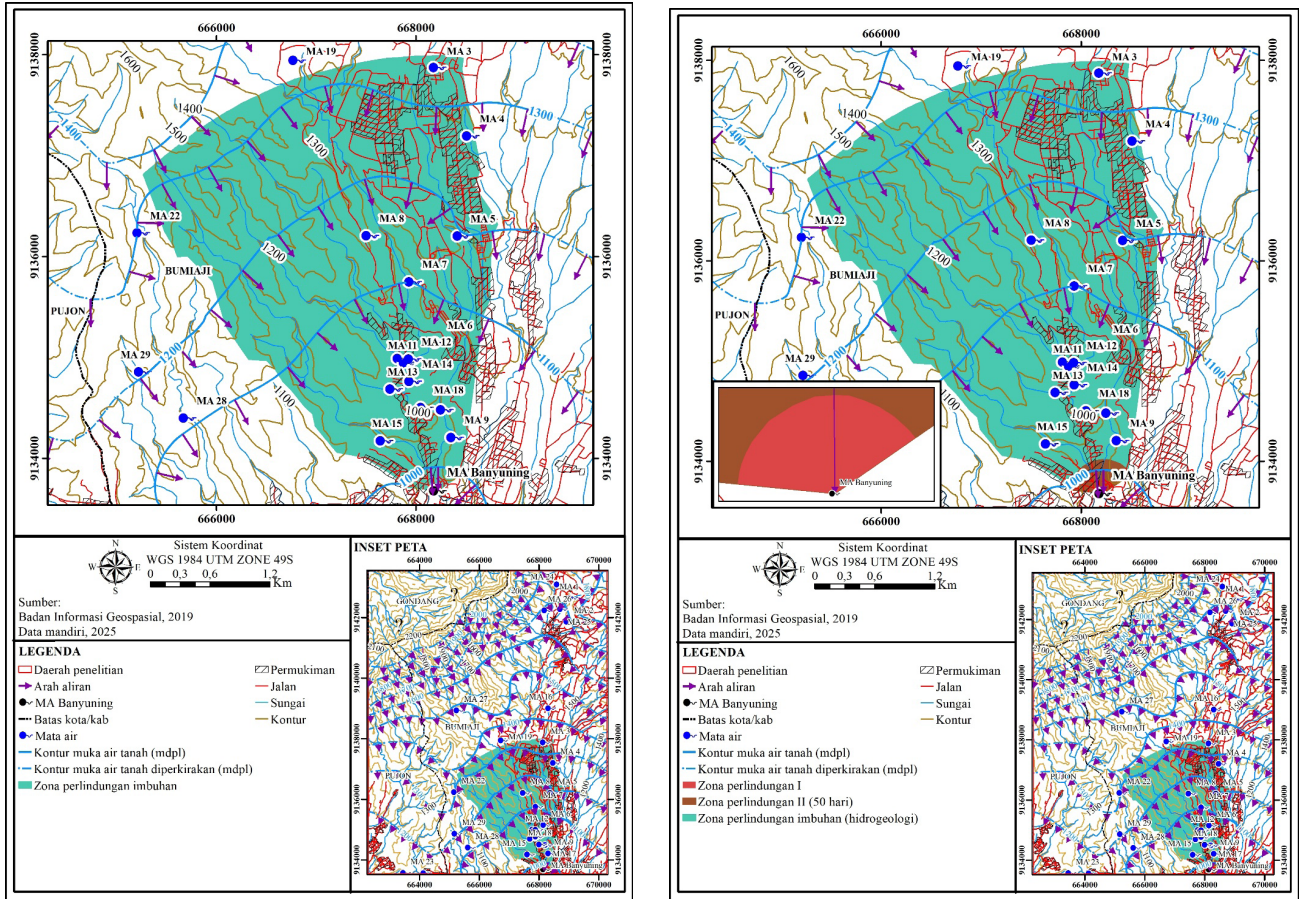
Zona perlindungan III memiliki radius sekitar 2,56 km dari mata air dengan luas sekitar 4,24 km<sup>2</sup> dan berperan dalam menjaga kualitas kimia dan biologis air tanah melalui pengendalian aktivitas yang berpotensi mencemari air tanah. Sementara itu, zona imbuhan memiliki radius sekitar 4,32 km dengan luas sekitar 5,63 km<sup>2</sup> dengan bentuk yang memanjang mengikuti arah aliran air tanah dari barat laut menuju tenggara. Zona ini berfungsi sebagai daerah pengisian air tanah yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan kuantitas dan kualitas air pada Mata Air Sumber Banyuning.

Penggunaan lahan pada kawasan zonasi perlindungan Mata Air Sumber Banyuning menunjukkan variasi tutupan lahan yang berpotensi memengaruhi proses infiltrasi dan kualitas air tanah. Berdasarkan hasil analisis penggunaan lahan, kawasan zona perlindungan didominasi oleh tutupan hutan, lahan perkebunan, serta sebagian lahan permukiman. Tutupan hutan umumnya berada pada bagian hulu dan zona imbuhan yang berperan penting dalam menjaga kapasitas infiltrasi serta mempertahankan keseimbangan hidrologi sistem akuifer.

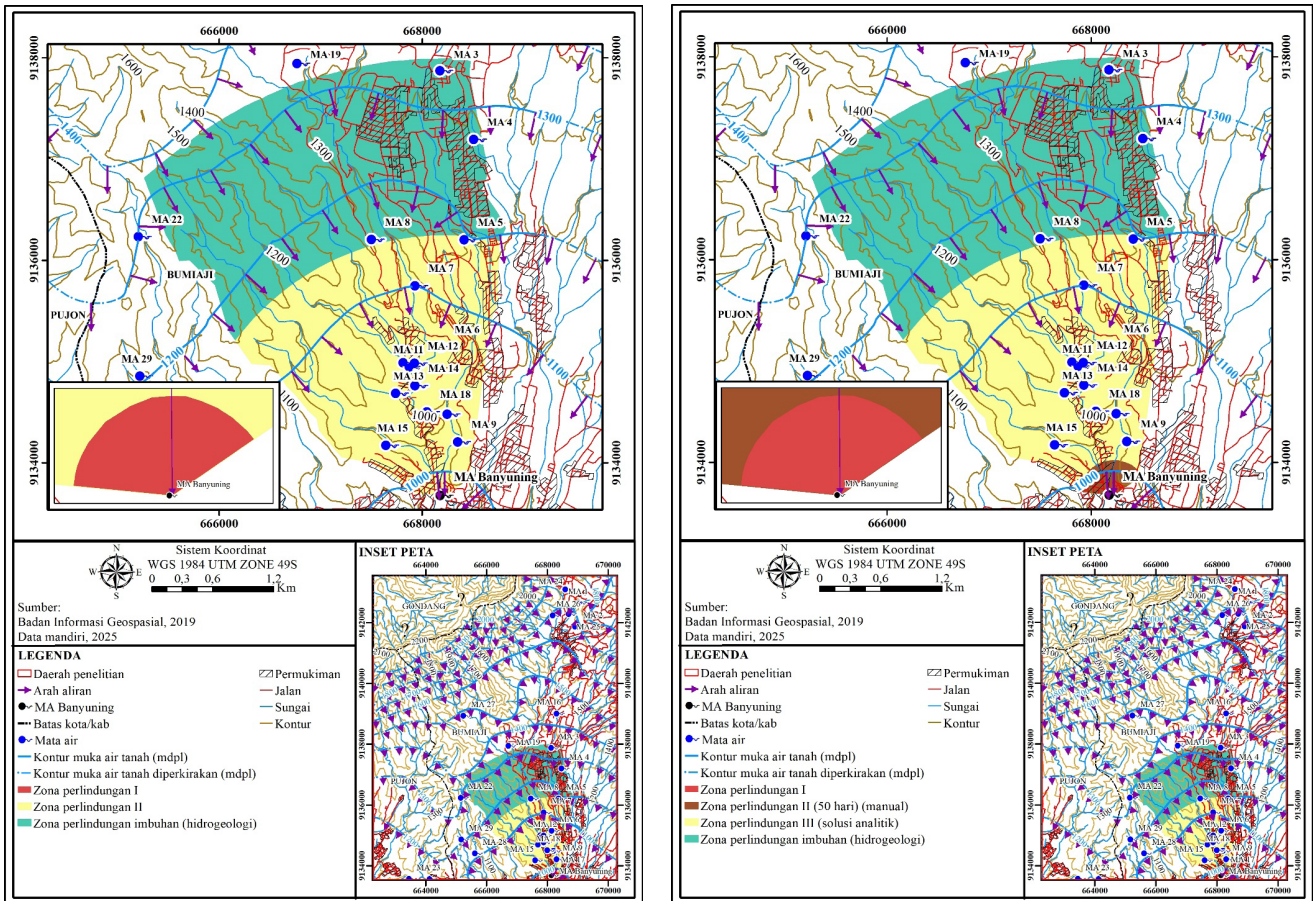
Sementara itu, aktivitas perkebunan lebih banyak ditemukan pada zona perlindungan II dan III. Aktivitas tersebut berpotensi memengaruhi kualitas air tanah melalui penggunaan pupuk dan pestisida yang dapat meresap ke dalam akuifer. Keberadaan permukiman di beberapa bagian zona perlindungan juga dapat menjadi sumber pencemar domestik apabila tidak disertai dengan sistem sanitasi yang memadai. Oleh karena itu, kondisi penggunaan lahan pada kawasan zonasi perlindungan perlu menjadi pertimbangan penting dalam pengelolaan dan konservasi sumber daya air tanah.

Upaya pengelolaan kawasan perlindungan Mata Air Sumber Banyuning perlu disesuaikan dengan kondisi penggunaan lahan pada masing-masing zona perlindungan. Pada Zona I sebagai zona inti, aktivitas manusia perlu dibatasi secara ketat untuk mencegah terjadinya kontaminasi langsung terhadap mata air. Kawasan ini perlu dijaga dari aktivitas pembangunan, pembuangan limbah, maupun kegiatan lain yang berpotensi menurunkan kualitas air.

Pada Zona II yang berfungsi sebagai daerah penyangga, pengelolaan difokuskan pada pembatasan penggunaan bahan kimia dalam kegiatan perkebunan serta peningkatan vegetasi penutup untuk menjaga kapasitas infiltrasi air tanah. Pada Zona III, pengelolaan diarahkan pada pengendalian aktivitas yang berpotensi mencemari air tanah seperti pembangunan permukiman padat dan aktivitas industri. Sementara itu, pada



**Gambar 10.** (a) Peta zona perlindungan mata air Sumber Banyuning menggunakan metode hidrogeologi, dan (b) Peta zona perlindungan mata air Sumber Banyuning menggunakan metode manual



**Gambar 10.** (c) Peta zona perlindungan mata air Sumber Banyuning menggunakan metode solusi analitik, dan (d) Peta zona perlindungan mata air Sumber Banyuning menggunakan metode kombinasi

**Tabel 4.** Perbandingan penelitian zonasi perlindungan air tanah

Peneliti	Zona I	Zona II	Zona III	Zona Imbuhan
Amirrul dkk. 2022	Radius: 10 m Luas: 314 m <sup>2</sup>	Radius: 1,64 km Luas: 2,87 km <sup>2</sup>	Radius: 16,74 km Luas: 67,28 km <sup>2</sup>	Radius: 12 km Luas: 57,85 km <sup>2</sup>
Dwigianto dkk. 2023	Radius: 10-15 m	Radius: 86,4-172,8 m	Luas: daerah tangkapan air	-
Solikh dkk. 2025	Radius: 10 m Luas: 121 m <sup>2</sup>	Radius: 336 m Luas: 0,136 km <sup>2</sup>	Radius: 2,56 km Luas: 4,24 km <sup>2</sup>	Radius: 4,32 km Luas: 5,63 km <sup>2</sup>

Sumber: Hasil analisis data (2026)

zona imbuhan yang sebagian besar masih didominasi oleh tutupan hutan, upaya pengelolaan difokuskan pada pelestarian vegetasi alami, pencegahan deforestasi, serta pengendalian perubahan penggunaan lahan yang dapat menurunkan kapasitas resapan air tanah.

Hasil penetapan zonasi perlindungan Mata Air Sumber Banyuning menunjukkan kesesuaian dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan pendekatan hidrogeologi dalam penentuan zona perlindungan sumber air tanah. Penelitian oleh Amirrul dkk. (2022), zona perlindungan yang dihasilkan memiliki luasan yang lebih besar dibandingkan penelitian ini karena mempertimbangkan sistem aliran air tanah pada skala regional. Sementara itu, penelitian Dwigianto dkk. (2023) menunjukkan zona perlindungan yang lebih terbatas pada zona I dan zona II karena pendekatan yang digunakan lebih menekankan pada pengendalian aktivitas di sekitar mata air. Perbandingan hasil zonasi perlindungan dari beberapa penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan perbandingan tersebut, terlihat bahwa perbedaan luasan zona perlindungan terutama dipengaruhi oleh skala kajian, kondisi hidrogeologi setempat, serta metode deliniasi yang digunakan. Penelitian ini menggunakan pendekatan kombinasi antara metode hidrogeologi, manual, dan solusi analitik sehingga menghasilkan zonasi yang mempertimbangkan kondisi geologi, arah aliran air tanah, serta parameter hidrolik akuifer secara lebih komprehensif.

Perbandingan hasil zonasi dari masing-masing metode menunjukkan bahwa metode hidrogeologi memberikan pemahaman konseptual mengenai sistem aliran air tanah dan daerah imbuhan, namun tidak memberikan batas zona perlindungan secara rinci. Metode manual memberikan estimasi zona perlindungan berdasarkan parameter hidrogeologi dasar seperti debit mata air dan imbuhan air tanah, namun belum sepenuhnya mempertimbangkan dinamika aliran air tanah dalam sistem akuifer.

Sementara itu, metode solusi analitik menghasilkan deliniasi zona yang lebih luas karena mempertimbangkan parameter hidrolik akuifer seperti konduktivitas hidrolis dan transmisivitas. Meskipun demikian, pendekatan ini memiliki keterbatasan apabila tidak disertai dengan interpretasi kondisi hidrogeologi lapangan. Oleh karena itu, pendekatan kombinasi antara metode hidrogeologi, manual, dan solusi analitik dianggap sebagai pendekatan yang paling representatif dalam menentukan zona perlindungan Mata Air Sumber Banyuning.

Pendekatan kombinasi memungkinkan integrasi antara data lapangan dan analisis matematis sehingga menghasilkan deliniasi zona perlindungan yang lebih sesuai dengan kondisi hidrogeologi setempat. Hasil zonasi yang diperoleh melalui pendekatan ini dapat digunakan sebagai dasar ilmiah dalam penyusunan kebijakan perlindungan sumber daya air tanah

di Kota Batu, khususnya dalam pengendalian perubahan penggunaan lahan serta pengelolaan daerah imbuhan.

## KESIMPULAN

Sistem hidrogeologi Mata Air Sumber Banyuning dikontrol oleh karakter akuifer bebas yang berkembang pada satuan batuan vulkanik berupa andesit Anjasmoro, andesit Arjuno–Welirang, dan breksi gunung api Arjuno–Welirang. Hasil survei geologi dan hidrogeologi lapangan menunjukkan bahwa kemunculan mata air berkaitan dengan kondisi litologi dan topografi yang mengontrol pola aliran air tanah dari barat laut menuju tenggara, dimana bagian hulu berfungsi sebagai daerah imbuhan utama yang menopang kontinuitas debit mata air. Penentuan zona perlindungan dilakukan menggunakan pendekatan kombinasi antara metode hidrogeologi, manual, dan solusi analitik, yang dinilai paling representatif karena mampu mengintegrasikan interpretasi kondisi lapangan dengan parameter hidrolik akuifer sehingga menghasilkan deliniasi zona yang mengikuti sistem aliran air tanah. Analisis penggunaan lahan menunjukkan bahwa kawasan zonasi perlindungan didominasi oleh hutan, perkebunan, serta sebagian permukiman yang berpotensi memengaruhi proses infiltrasi dan kualitas air tanah. Oleh karena itu, pengelolaan kawasan perlindungan perlu disesuaikan dengan karakteristik penggunaan lahan pada setiap zona, dimana zona I di sekitar mata air perlu dijaga melalui pembatasan aktivitas manusia dan pencegahan sumber pencemar langsung. Pada zona II, pengelolaan difokuskan pada pengendalian penggunaan bahan kimia dalam kegiatan perkebunan serta peningkatan vegetasi penutup untuk mempertahankan kapasitas infiltrasi air tanah. Pada zona III, pengendalian aktivitas yang berpotensi mencemari air tanah seperti pembangunan permukiman padat dan kegiatan industri menjadi aspek penting dalam menjaga kualitas air tanah. Sementara itu, pada zona imbuhan, upaya pengelolaan diarahkan pada pelestarian tutupan vegetasi alami, pencegahan deforestasi, serta pengendalian perubahan penggunaan lahan guna mempertahankan fungsi resapan air tanah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perlindungan Mata Air Sumber Banyuning tidak hanya bergantung pada deliniasi zonasi secara spasial, tetapi juga pada pengelolaan penggunaan lahan pada daerah imbuhan yang berperan penting dalam menjaga keberlanjutan sistem air tanah di Kota Batu.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Departemen Teknik Geologi, Program Studi Sarjana, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

## KONTRIBUSI PENULIS

**Penulis Pertama** berperan dalam perancangan penelitian, analisis dan interpretasi data, serta penyusunan naskah publikasi. **Penulis Kedua** berkontribusi dalam pengarahan metodologi, penajaman analisis hasil, serta telaah substansi naskah. **Penulis Ketiga** berperan dalam penelaahan kritis, penyempurnaan pembahasan, dan penyuntingan naskah publikasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, B. I., & Sugiri, A. (2014). Ketersediaan Air Bersih dan Perubahan Iklim: Studi Krisis Air di Kedungkarang Kabupaten Demak. *Teknik PWK (Perencanaan Wilayah Kota)*, 3(2), 295-302. <https://doi.org/10.14710/tpwk.2014.5058>.
- Amirul, H. G., Hendrayana, H., & Putra, D. P. E. (2022). Delineation of Mrutu Spring Protection Zone: an attempt to maintain the sustainability of groundwater resources. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1039(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1039/1/012046>.
- Badan Informasi Geospasial. (2019). RBI 25K Kabupaten Malang. <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/rbi-wilayah>.
- Badan Informasi Geospasial. (2019). RBI 25K Kabupaten Mojokerto. <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/rbi-wilayah>.
- Badan Informasi Geospasial. (2019). RBI 25K Kota Batu. <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/rbi-wilayah>.
- Badan Pusat Statistik Indonesia. (2025). *Statistik Indonesia 2025*: Jakarta, Badan Pusat Statistik Indonesia.
- Carey, M., Hayes, P., & Renner, A. (2009). *Groundwater Source Protection Zones: Review of Methods*.
- Davie, T. (2002). *Fundamentals of Hydrology*. In Routledge (Second).
- Dinas PU Sumber Daya Air Provinsi Jawa Timur. (2022). *Pengairan Dalam Angka 2022* (Issue 169).
- Dwigianto, B., Tarore, R. C., & Moniaga, I. L. (2023). Analisis Perlindungan Mata Air di Kota Tomohon. *Sabua Jurnal Lingkungan Binaan Dan Arsitektur*, 12(2), 58-67. <https://doi.org/10.35793/sabua.v12i2.52603>
- Gleeson, T., VanderSteen, J., Sophocleous, M. A., Taniguchi, M., Alley, W. M., Allen, D. M., & Zhou, Y. (2010). Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience*, 3(6), 378-379. <https://doi.org/10.1038/ngeo881>.
- Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>.
- Hendrayana, H. (2003). *Zona perlindungan sumber air baku di Kota dan Kab. Malang*. Paper dipresentasikan pada Seminar Sehari Koordinasi dalam Rangka Persiapan PERDA tentang Perlindungan Sumber Air Baku Air Minum, Malang.
- Hendrayana, H., & Putra, D. (2008). Konservasi Airtanah - Sebuah Pemikiran. *Teknik Geologi UGM*, 78. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3333.2643>.
- Hendrayana, H., Nuha, A., Riyanto, I. A. & Aprimanto, B. (2021). Kajian Perubahan Muka Airtanah di Cekungan Airtanah Yogyakarta-Sleman. *Majalah Geografi Indonesia*, 35(1), 30-44.
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., & Nuha, A. 2024. Karakteristik Hidrogeologi dan Hidrogeokimia DAS Tempuran Lereng Barat Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger. *Majalah Geografi Indonesia*, 38(1), 35-49.
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., & Nuha, A. (2025). In-depth assessment of groundwater quality in East Java industrial areas to maintain the sustainability of groundwater utilization. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(3), 7649-7657. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.123.7649>.
- Hudson, N.W., 1993, Field measurement of soil erosion and runoff. Diakses tanggal 15 Februari 2025 dari <https://www.fao.org/4/t0848e/t0848e00.htm>
- Husein, A. (2016). Identifikasi Wilayah Krisis Air Bersih Berdasarkan Analisa Kebutuhan dan Ketersediaan Air di Kabupaten Banyuwangi. *Cakrawala*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.32781/cakrawala.v10i1.48>.
- Peraturan Nomor P.10/PDASHL/SET/KUM.1/5/2019 Tentang Perlindungan Mata Air (2019). *Direktorat Jenderal Pengendalian Daerah Aliran Sungai Dan Hutan Lindung*, 1-38.
- Poelmans, L., Van Rompaey, A., & Batelaan, O. (2010). Coupling urban expansion models and hydrological models: How important are spatial patterns? *Land Use Policy*, 27(3), 965-975. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.12.010>.
- Poespowardoyo, R. S. (1984). *Peta Hidrogeologi Indonesia, Lembar X Kediri (Jawa), Skala 1:250.000*. In *Direktorat Geologi Tata Lingkungan* (p. 1 lembar).
- Pujiraharjo, A., Rachmansyah, A., Wijatmiko, I., & Anwar, M. R. (2015). Pengaruh perubahan iklim terhadap ketersediaan air baku di Malang Raya. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 9, 1-8.
- Rejekiningrum, P. (2014). *Identifikasi Kekritisian Air untuk Perencanaan Penggunaan Air Agar Tercapai Ketahanan Air di DAS Bengawan Solo*. Paper dipresentasikan pada Seminar Nasional FMIPA-UT 2014, Universitas Terbuka.
- Santikayasa, I. P., Babel, M. S., Shrestha, S., Jourdain, D., & Clemente, R. S. (2014). Evaluation of water use sustainability under future climate and irrigation management scenarios in Citarum River Basin, Indonesia. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 21(2), 181-194. <https://doi.org/10.1080/13504509.2014.884023>.
- Santosa, S., & Atmawinata, S. (1992). *Peta Geologi Lembar Kediri 1508-3, Jawa, Skala 1:100.000*. In *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi* (p. 1 lembar).
- Santosa, S., & Suwanti, T. (1992). *Peta Geologi Lembar Malang 1608-1, Jawa, Skala 1:100.000*. In *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi* (p. 1 lembar).
- Sari, G. F. A., Yolanda, D., & Rajib, R. K. (2024). Krisis Air Menangani Penyediaan Air Bersih Di Dunia Yang Semakin Kekurangan Sumber Daya. *Jurnal Ilmiah Research Student*, 1(5), 334-341. <https://doi.org/10.61722/jirs.v1i5.1373>.
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Stonestrom, D. A., Prudic, D. E., & Dennehy, K. F. (2005). Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology*, 11(10), 1577-1593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01026.x>.
- Soil Conservation Service (SCS). (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. Department of Agriculture, Washington DC.
- Tardan, M. A. M., Masduqi, A., Mahzum, M. M., Ariastita, P. G., Saputra, Y. A., & Wiratno, S.E. (2014). Studi Penyediaan Air Bersih di Kota Batu, Jawa Timur in Seminar Nasional Teknik Lingkungan ULM 2014 "Teknologi Praktis dalam Upaya Konservasi Air dan Energi". Banjarmasin, Teknik Lingkungan, Universitas Lambung Mangkurat, p. 85-91.
- Taryana, D. (2015). Pengaruh Formasi Geologi terhadap Potensi Mata Air di Kota Batu. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 20(2), 9-19. <https://doi.org/10.17977/um017v20i22015p009>.
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20). <https://doi.org/10.1029/2010gl044571>.
- Wang, W., Zhang, Z., Duan, L., Wang, Z., Zhao, Y., Zhang, Q., Dai, M., Liu, H., Zheng, X., & Sun, Y. (2018). Response of the groundwater system in the Guanzhong Basin (central China) to climate change and human activities. *Hydrogeology Journal*, 26(5), 1429-1441. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1757-7>.
- Xu, Q., Qiang, Z., Chen, Q., Liu, K., & Cao, N. (2018). A Superposed Model for the Pipe Failure Assessment of Water Distribution Networks and Uncertainty Analysis: A Case Study. *Water*

- Resources Management*, 32(5), 1713–1723. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1899-8>.
- Yulistyarini, T., Solikin, Sofiah, S., & Laksono, R. A. (2009). Karakterisasi Beberapa Mata Air di Kota Batu dan Vegetasi di Sekitarnya. *Berk. Penel. Hayati*, 3A, 87–93.
- Zhu, Y., & Balke, K. (2008). Groundwater protection: What can we learn from Germany? *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 9(3), 227–231. <https://doi.org/10.1631/jzus.b0710639>.