

Interaksi Air Tanah dan Air Permukaan Sungai Asem Ruas Antara Bendung Boreng sampai Area Industri Kabupaten Lumajang

Anisa Tri Widiyanti¹, Hari Siswoyo^{1*}, Linda Prasetyorini¹

¹Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

hari_siswoyo@ub.ac.id*

| Received: 25/12/2025 | Revised: 15/01/2026 | Accepted: 23/01/2026 |

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Interaksi antara air tanah dan air sungai menjadi proses hidrologi penting yang memengaruhi kuantitas dan kualitas sumber daya air. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis interaksi antara air tanah dan air permukaan Sungai Asem pada ruas antara Bendung Boreng hingga Area Industri Kabupaten Lumajang. Penelitian dilaksanakan pada musim kemarau, yaitu bulan September hingga Oktober 2025. Pengambilan contoh dilakukan pada 5 penampang sungai yang masing-masing terdiri atas air tanah di sisi kiri aliran sungai, air permukaan (sungai), dan air tanah di sisi kanan kanan sungai. Parameter fisik-kimiawi yang diamati meliputi pH, suhu, TDS dan DHL. Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan pendekatan statistik yang meliputi analisis deret waktu, analisis korelasi, analisis komponen utama, dan analisis klaster. Berdasarkan hasil analisis deret waktu dapat dinyatakan bahwa ada kesamaan pola fluktuasi parameter fisik-kimiawi khususnya suhu dan pH antara air tanah dan air sungai. Berdasarkan hasil analisis korelasi dapat dinyatakan bahwa tingkat hubungan sedang hingga kuat antara air tanah dan air sungai. Berdasarkan hasil analisis komponen utama dapat dinyatakan bahwa parameter TDS dan DHL berperan dominan dalam membedakan karakteristik air. Berdasarkan hasil analisis klaster dapat dinyatakan bahwa interaksi air tanah dan air sungai tidak seragam di sepanjang aliran sungai, dengan interaksi yang kuat teridentifikasi pada Penampang-4 dan Penampang-5. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa di lokasi penelitian terjadi interaksi antara air tanah dan air sungai yang dipengaruhi oleh kondisi hidrologi lokal.

Kata kunci: air permukaan, air tanah, analisis statistik, interaksi, Sungai Asem

Abstract

The interaction between groundwater and river water is an important hydrological process that affects the quantity and quality of water resources. The purpose of this study was to identify and analyze the interaction between groundwater and surface water in the Asem River in the section between Boreng weir and the Industrial Area of Lumajang Regency. The study was conducted during the dry season, namely from

May to October 2025. Sampling was carried out at 5 river cross-sections, each consisting of groundwater on the left side of the river flow, surface water (river), and groundwater on the right side of the river. The physical-chemical parameters observed included pH, temperature, TDS, and EC. The measurement data were analyzed using a statistical approach that included time series analysis, correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. Based on the results of the time series analysis, it can be stated that there are similarities in the fluctuation patterns of physical-chemical parameters, especially temperature and pH, between groundwater and river water. Based on the results of the correlation analysis, it can be stated that the level of relationship is moderate to strong between groundwater and river water. Based on the results of the principal component analysis, it can be stated that the TDS and EC parameters play a dominant role in differentiating water characteristics. Based on the results of the cluster analysis, it can be stated that the interaction between groundwater and river water is not uniform along the river flow, with strong interactions identified in Cross Section-4 and Cross Section-5. In general, it can be concluded that at the research location there is an interaction between groundwater and river water which is influenced by local hydrological conditions.

Keywords: surface water, groundwater, statistical analysis, interaction, Asem river

Pendahuluan

Air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah. Air permukaan adalah semua air yang terdapat pada permukaan tanah (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air). Sungai adalah alur atau wadah air alami dan/atau buatan berupa jaringan pengaliran air beserta air di dalamnya, mulai dari hulu sampai muara, dengan dibatasi kanan dan kiri oleh garis sempadan (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2011 tentang Sungai). Interaksi air tanah dan air permukaan dibagi menjadi dua kondisi yaitu *losing stream* dan *gaining stream*. Pada *losing stream*, kondisi muka air tanah di sekitar aliran sungai memiliki ketinggian yang lebih rendah daripada ketinggian muka air sungai sehingga air cenderung mengalir keluar dari sungai menuju air tanah. Sebaliknya, apabila muka air tanah lebih tinggi dari muka air sungai maka akan terjadi peristiwa *gaining stream* (Winter *et al.*, 1998).

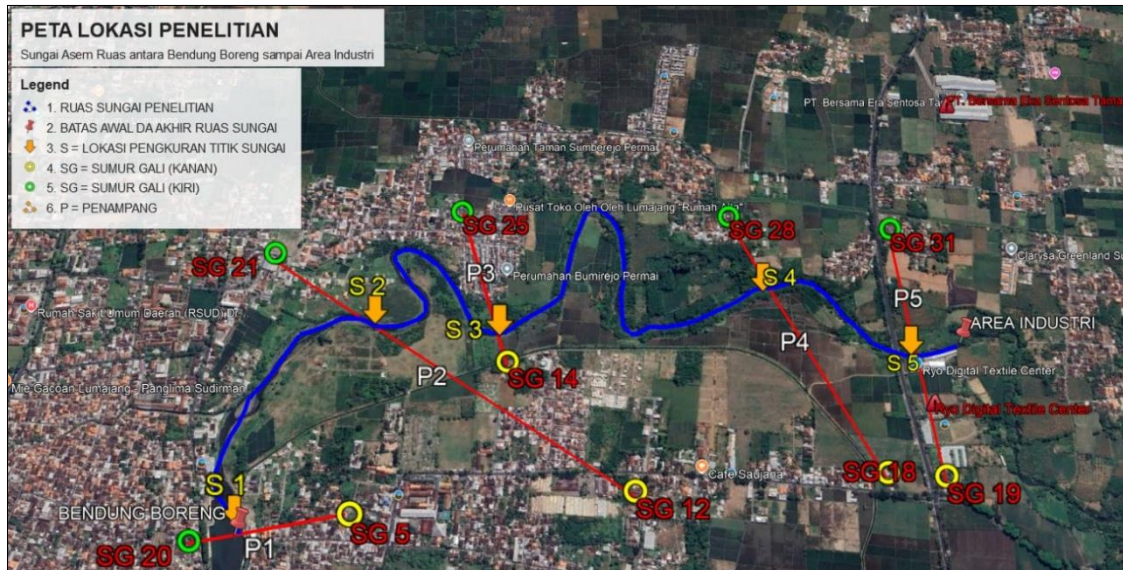
Sungai Asem merupakan salah satu sungai yang terletak di Kabupaten Lumajang, Provinsi Jawa Timur. Sungai Asem memiliki peran yang sangat vital karena dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, salah satunya sebagai sumber air irigasi pertanian. Kemudian untuk keperluan sehari-hari, masyarakat di sekitar sungai memanfaatkan air tanah atau air sumur sebagai sumber air bersih mereka. Namun berdasarkan survei pendahuluan pada tanggal 1 Maret 2025 yang telah dilakukan, ditemukan bahwa sumur gali masyarakat di sekitar sungai pernah mengalami penurunan debit pada musim kemarau serta menimbulkan bau, yang mengindikasikan kemungkinan terjadinya perubahan kualitas air tanah. Kondisi ini menguatkan dugaan adanya keterkaitan antara air tanah dan air sungai di lokasi penelitian. Oleh karena itu, pada penelitian ini dirumuskan bagaimana interaksi air tanah dan air permukaan sungai yang terjadi pada lokasi penelitian.

Sejumlah penelitian terkait interaksi air tanah dan air permukaan (sungai) telah dilakukan oleh para peneliti terdahulu. Interaksi air sungai dan air tanah di Dataran Pingtung bagian utara, Taiwan diidentifikasi dengan analisis time series (Lien *et al.*, 2025). Analisis korelasi terhadap komponen hidrokimia air tanah dan air permukaan membuktikan adanya hubungan dan interaksi antara kedua sistem air di Lembah Nida, Polandia (Phan *et al.*, 2023). Analisis secara komponen utama menunjukkan parameter daya hantar listrik merupakan parameter yang representatif untuk mengidentifikasi infiltrasi air sungai ke dalam akuifer di pengamatan yang dilakukan di sembilan sumur di Swiss (Page *et al.*, 2012). Analisis kluster *K-Means* dilakukan di Danau Vellayani, India untuk mendeteksi zona interaksi antara air tanah dan air danau (Raghavan *et al.*, 2024). Di Daerah Aliran Sungai Citarum Hulu, Kabupaten Bandung, teridentifikasi secara umum air tanah mengisi air sungai (*gaining stream*), dimana aliran air tanah bergerak menuju Sungai Citarum (Nugraha *et al.*, 2023). Meskipun berbagai penelitian tersebut telah membuktikan adanya interaksi antara air tanah dan air permukaan, sebagian besar kajian dilakukan dengan fokus pada satu pendekatan analisis tertentu. Penelitian sejenis dengan mengintegrasikan beberapa metode statistik untuk mengidentifikasikan pola interaksi air tanah dan air sungai, khususnya pada sungai yang dipengaruhi oleh keberadaan bangunan bendung serta aktivitas kawasan industri, sejauh ini masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan berdasarkan berbagai pendekatan secara statistik guna memberikan gambaran tentang interaksi air tanah dan air permukaan secara lebih komprehensif berdasarkan karakteristik fisik-kimia air.

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis interaksi antara air tanah dan air permukaan Sungai Asem berdasarkan parameter fisik-kimia air. Teridentifikasinya interaksi air tanah dan air sungai di lokasi penelitian dapat digunakan menjadi dasar ilmiah dalam upaya pengelolaan sumber daya air. Penelitian dilakukan pada saat musim kemarau. Penelitian diawali dengan penentuan koordinat lokasi sumur gali air tanah, kemudian dilanjutkan dengan pemilihan beberapa lokasi sumur gali air tanah dan lokasi pengamatan pada sungai. Pengukuran parameter fisik-kimiawi air dilakukan secara berkala selama 21 hari. Parameter fisik-kimiawi yang diamati meliputi pH, suhu, total padatan terlarut (TDS), dan daya hantar listrik (DHL). Data hasil pengukuran dianalisis dengan pendekatan statistik, yaitu analisis deret waktu (*time series*), koefisien korelasi, analisis komponen utama atau *principal component analysis* (PCA), dan analisis kluster *K-means*. Adanya kesamaan pola fluktuasi pada grafik deret waktu antar lokasi pengamatan, nilai koefisien korelasi yang kuat, kontribusi parameter yang serupa pada komponen utama, serta pengelompokan air tanah dan air sungai dalam kluster yang sama menunjukkan adanya keterkaitan karakteristik. Kondisi tersebut mengindikasikan terjadinya interaksi antara air tanah dan air sungai di lokasi penelitian.

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan Sungai Asem pada ruas sungai antara Bendung Boreng sampai Area Industri Kabupaten Lumajang. Ruas sungai tersebut sepanjang 3,1 km. Peta lokasi penelitian ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan September 2025 sampai dengan bulan Oktober 2025. Penelitian ini bersifat deskriptif dengan metode kuantitatif melalui analisis secara statistik. Data yang digunakan untuk analisis secara statistik adalah data primer yang diperoleh melalui pengukuran secara langsung di lapangan yaitu data pH, suhu, TDS dan DHL.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat keras terdiri atas timba bertali untuk mengambil air tanah dan air sungai, formulir data lapangan untuk mencatat hasil pengukuran di lapangan, kamera pada handphone untuk mengambil dokumentasi saat penelitian, dan alat *water quality tester* untuk mengukur pH, suhu, TDS dan DHL. Perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis hasil penelitian yaitu Aplikasi *GPSMap* pada handphone untuk mendapatkan koordinat lokasi penelitian, *Google Earth* untuk membuat peta lokasi penelitian, *Microsoft Excel* untuk mengolah data statistik analisis *time series* dan analisis korelasi, dan *Orange Data Mining* untuk mengolah data secara metode analisis komponen utama dan analisis kluster.

Pengukuran parameter fisik-kimiawi pada lokasi penelitian dilakukan berdasarkan teknik pengambilan contoh uji sesaat (*grab sampling*) dengan mengacu pada SNI 8995:2021 tentang Metode pengambilan contoh uji air untuk pengujian fisika dan kimia. Teknik ini dipakai karena parameter yang diuji menurut sifat dan karakteristik harus diukur secara langsung di lapangan. Keempat parameter tersebut merupakan indikator utama kualitas air yang mampu mewakili kondisi fisika dan kimia air secara umum, serta dapat diukur dengan mudah dan cepat menggunakan perangkat portabel sehingga efektif digunakan untuk pemantauan kualitas air secara *in-situ* (Sugiharto *et al.*, 2023).

Pengukuran parameter fisik-kimiawi kualitas air dilakukan secara *in-situ* menggunakan *Water Quality Tester* yang telah dikalibrasi. Pengambilan data dilakukan pada air tanah (sumur gali) dan air sungai dengan mencelupkan alat hingga nilai pengukuran stabil. Parameter yang diukur meliputi pH, suhu, *total dissolved solids* (TDS), dan daya hantar listrik (DHL). Pengukuran dilakukan minimal tiga kali pada setiap titik pengamatan untuk meningkatkan akurasi data,

kemudian seluruh hasil dicatat dalam tabel lapangan yang memuat informasi lokasi, waktu, dan kondisi lingkungan sekitar.

Hasil pengukuran parameter fisik-kimiawi yang telah dilakukan selama 21 hari tersebut kemudian dianalisis secara statistik. Analisis deret waktu merupakan pengamatan satu atau beberapa variabel yang diambil secara beruntun terhadap interval waktu yang tetap (Wei, 2006). Analisis deret waktu digunakan untuk mengkaji perubahan parameter fisik-kimiawi air terhadap waktu pada setiap lokasi pengamatan. Data pH, suhu, TDS, dan DHL disusun berdasarkan urutan waktu dan divisualisasikan dalam bentuk grafik, kemudian dianalisis pola fluktuasinya untuk mengidentifikasi kesamaan tren antar lokasi sebagai indikasi adanya interaksi antara air tanah dan air sungai. Analisis korelasi merupakan derajat hubungan variabel-variabel dalam menentukan ukuran yang digunakan untuk mengetahui derajat hubungan, terutama data kuantitatif yang disebut koefisien korelasi (Sugiyono, 2017). Analisis koefisien korelasi dilakukan untuk mengkaji keterkaitan antara parameter fisik-kimiawi air tanah dan air sungai. Data pH, suhu, TDS, dan DHL dari masing-masing lokasi disusun secara berpasangan berdasarkan penampang pengamatan, kemudian dianalisis menggunakan koefisien korelasi Pearson, dengan persamaan:

$$r = \frac{n \cdot \sum X \cdot Y - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

dimana:

r = angka indeks korelasi antara variabel X dengan variabel Y

n = jumlah sampel

X = nilai parameter fisik-kimiawi dari air tanah

Y = nilai parameter fisik-kimiawi dari air permukaan

Nilai koefisien korelasi digunakan untuk menilai kekuatan dan arah hubungan antar parameter, di mana hubungan yang signifikan dan bernilai positif atau negatif diinterpretasikan sebagai indikasi adanya interaksi antara air tanah dan air sungai.

Analisis komponen utama dilakukan untuk mengetahui parameter yang paling memengaruhi interaksi air tanah dan air sungai. Analisis komponen utama digunakan untuk mereduksi dimensi data dengan tetap mempertahankan sebagian besar informasi yang terkandung dalam data tersebut (Jolliffe, 2002). Analisis komponen utama diawali dengan standarisasi data agar setiap variabel memiliki skala yang sama. Data yang telah distandarisasi selanjutnya digunakan untuk membentuk matriks korelasi, yang kemudian didekomposisi untuk memperoleh *eigenvalue* dan *eigenvector*. *Eigenvalue* dan *eigenvector* diurutkan berdasarkan besar *eigenvalue* secara menurun untuk menentukan komponen utama yang menjelaskan variasi data terbesar. Skor komponen utama diperoleh dengan mengalikan matriks data terstandarisasi dengan matriks *eigenvector* terpilih, sehingga dihasilkan komponen-komponen utama yang merepresentasikan parameter paling berpengaruh terhadap interaksi air tanah dan air sungai. Analisis ini dibantu dengan perangkat lunak *Orange Data Mining*.

Analisis kluster merupakan analisis statistik terakhir yang dilakukan dalam penelitian ini. Analisis kluster merupakan pengelompokan sejumlah data/obyek ke dalam sebuah *cluster* sehingga dalam setiap *cluster* akan berisi data yang semirip mungkin (Nurjanah *et al.*, 2017). Analisis ini bertujuan untuk mengelompokkan air tanah dan air sungai berdasarkan kemiripan karakteristik parameter fisik-kimiawi. Metode yang digunakan adalah *K-means clustering* (non-

hierarki), yang diawali dengan penentuan jumlah kluster dan penetapan *centroid* awal. Pengelompokan data dilakukan berdasarkan jarak terdekat antara data dan centroid menggunakan jarak *Euclidean*, yang dirumuskan dengan persamaan:

$$d = \sqrt{(X_1 - c_1)^2 + (X_2 - c_2)^2 + \dots + (X_n - c_n)^2}$$

dimana:

d = jarak euclidean

X_i = nilai parameter titik data

C_i = nilai parameter pada centroid

n = jumlah parameter

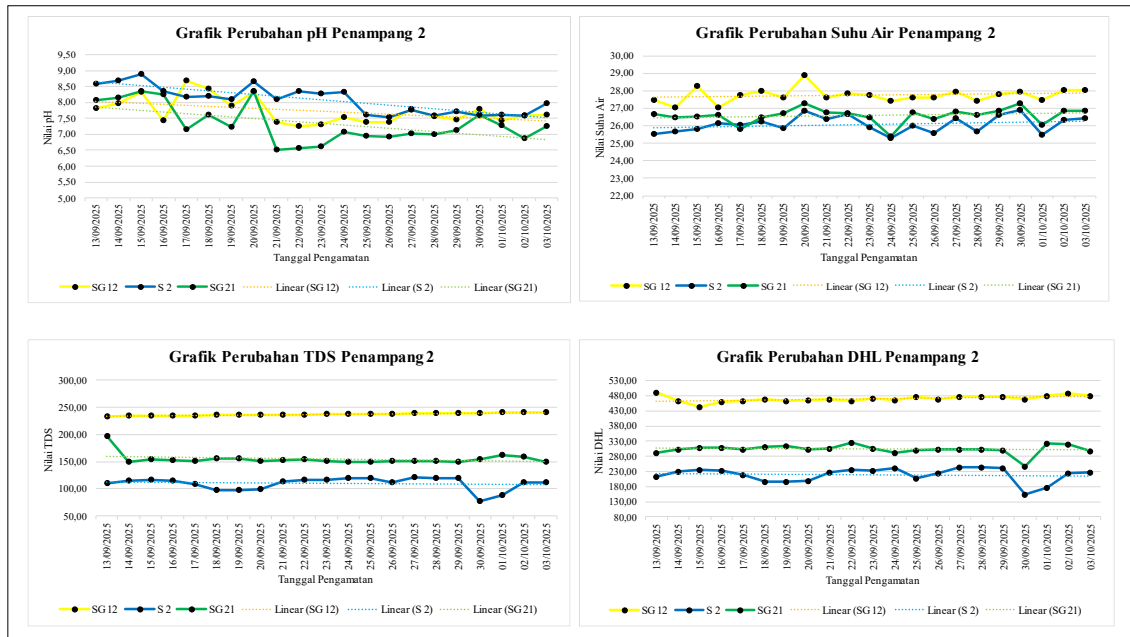
Proses ini dilakukan secara iteratif dengan pembaruan *centroid* hingga tidak terjadi lagi perpindahan anggota kluster, yang menunjukkan bahwa kluster telah mencapai kondisi stabil. Hasil kluster selanjutnya diinterpretasikan untuk mengidentifikasi pola interaksi antara air tanah dan air sungai. Analisis kluster dalam penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Orange Data Mining*.

Hasil dan Pembahasan

Analisis Deret Waktu

Analisis deret waktu digunakan untuk mengkaji perubahan parameter fisik kualitas air terhadap waktu selama 21 hari pengamatan (13 September–3 Oktober 2025) pada penampang 1 hingga penampang 5 yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Analisis deret waktu dilakukan untuk mengidentifikasi adanya hubungan hidrologi antara air tanah dan air permukaan melalui kesamaan pola fluktuasi parameter fisik (Anisah *et al.*, 2024). Parameter yang dianalisis meliputi suhu, pH, TDS, dan DHL, yang divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk membandingkan tren harian antara air tanah dan air sungai. Untuk menyajikan hasil penelitian ditampilkan visualisasi grafik deret waktu untuk parameter pH, suhu, TDS dan DHL yang diambil contoh pada Penampang-2 seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.

Berdasarkan hasil pengamatan secara deret waktu, nilai pH air permukaan dan air tanah pada setiap penampang menunjukkan pola fluktuatif dengan tren yang hampir serupa. Nilai pH air sungai cenderung lebih tinggi, sedangkan pH air tanah relatif lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa air sungai memiliki sifat lebih basa dibandingkan air tanah. Perbedaan tersebut disebabkan oleh pengaruh aktivitas manusia di sekitar badan sungai, dimana keberadaan surfaktan dan natrium dari limbah rumah tangga dapat meningkatkan pH perairan (Jena *et al.*, 2023). Suhu air sungai cenderung lebih rendah dibandingkan dengan suhu air tanah. Perbedaan ini menunjukkan bahwa air tanah di sekitar Sungai Asem memiliki suhu yang relatif lebih hangat dan stabil dibandingkan air sungai. Kondisi tersebut terjadi karena air tanah tidak terpengaruh langsung oleh radiasi matahari, melainkan dipengaruhi oleh proses geotermal dan konduksi panas dari lapisan bawah permukaan, yang membuat suhunya cenderung konstan dan sedikit lebih tinggi (Mousumi *et al.*, 2025).



Gambar 2. Grafik deret waktu parameter fisik-kimiawi pada Penampang-2

Nilai TDS air tanah cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan nilai TDS air permukaan sungai. Perbedaan ini menunjukkan bahwa air tanah memiliki kandungan zat terlarut yang lebih besar. Semakin lama waktu kontak air dengan batuan dan material geologis, maka semakin tinggi konsentrasi ion terlarut yang dihasilkan (Razi *et al.*, 2024). Nilai DHL air tanah cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan nilai DHL air permukaan sungai. Hal ini dikarenakan air tanah berada dalam sistem yang tertutup dengan kecepatan aliran yang sangat lambat, sehingga berbagai zat terlarut yang masuk ke dalamnya cenderung tetap berada di dalam sistem. Sebaliknya, air sungai merupakan sistem terbuka yang sangat dinamis, di mana volume airnya terus berubah akibat limpasan permukaan, hujan, dan aliran dari bagian hulu. Terdapat kesamaan pola fluktuasi suhu, pH, TDS, dan DHL antara air tanah dan air sungai di tiap penampang pengamatan. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa berdasarkan hasil analisis deret waktu terindikasi adanya interaksi antara air tanah dan air sungai di lokasi penelitian.

Analisis Korelasi

Hasil analisis koefisien korelasi parameter pH, suhu, TDS, dan DHL pada setiap penampang menunjukkan variasi tingkat keterkaitan antara air tanah dan air sungai. Secara umum, nilai koefisien korelasi positif mengindikasikan hubungan searah antara perubahan parameter air tanah dan air sungai, sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan berlawanan. Tabel 1 berikut menunjukkan hasil analisis koefisien korelasi pada tiap penampang.

Tabel 1. Rekapitulasi analisis koefisien korelasi (r) pada tiap penampang

Penampang	Kode Lokasi Pengamatan	Parameter			
		pH	Suhu Air	TDS	DHL
1	SG 5 dengan S 1	0,188	0,687	0,179	0,282
		Sangat Lemah	Kuat	Sangat Lemah	Lemah
	SG 20 dengan S 1	0,876	0,840	-0,103	-0,100
		Sangat Kuat	Sangat Kuat	Sangat Lemah	Sangat Lemah
2	SG 12 dengan S 2	0,447	0,604	-0,145	-0,095
		Cukup Kuat	Kuat	Sangat Lemah	Sangat Lemah
	SG 21 dengan S 2	0,595	0,740	-0,175	0,377
		Cukup Kuat	Kuat	Sangat Lemah	Lemah
3	SG 14 dengan S 3	0,693	0,636	0,163	0,185
		Kuat	Kuat	Sangat Lemah	Sangat Lemah
	SG 25 dengan S 3	0,647	0,395	0,149	0,122
		Kuat	Lemah	Sangat Lemah	Sangat Lemah
4	SG 18 dengan S 4	0,508	0,403	0,042	-0,075
		Cukup Kuat	Cukup Kuat	Sangat Lemah	Sangat Lemah
	SG 28 dengan S 4	0,551	0,621	-0,039	-0,172
		Cukup Kuat	Kuat	Sangat Lemah	Sangat Lemah
5	SG 19 dengan S 5	0,468	0,611	0,302	0,340
		Cukup Kuat	Kuat	Lemah	Lemah
	SG 31 dengan S 5	0,534	0,611	0,313	0,253
		Cukup Kuat	Kuat	Lemah	Lemah

Parameter suhu secara konsisten menunjukkan korelasi kuat hingga sangat kuat pada sebagian besar penampang, mengindikasikan adanya keterkaitan fisik berupa transfer panas dan interaksi hidrologi. Sebaliknya, parameter TDS dan DHL umumnya menunjukkan korelasi lemah hingga negatif, yang mencerminkan perbedaan sumber dan dinamika zat terlarut akibat sifat air sungai yang lebih dinamis dibandingkan air tanah. Hal ini dapat terjadi karena air sungai lebih sensitif terhadap hujan atau limpasan permukaan, sementara air tanah tetap stabil (Razi *et al.*, 2024). Secara keseluruhan, berdasarkan hasil analisis korelasi dapat ditunjukkan bahwa interaksi air tanah dan air sungai terjadi dengan intensitas yang bervariasi antar penampang, dengan suhu dan pH sebagai indikator paling konsisten dalam merepresentasikan keterkaitan kedua sistem.

Analisis Komponen Utama

Analisis komponen utama (PCA) digunakan untuk menyederhanakan parameter fisik-kimiawi air (pH, suhu, TDS, dan DHL) selama 21 hari pengamatan guna mengidentifikasi faktor utama yang membedakan karakteristik air tanah dan air sungai. Berdasarkan hasil analisis komponen utama, teridentifikasi ada empat komponen utama yaitu PC1, PC2, dan PC 4. PC1 memiliki kontribusi variansi terbesar (56,7%) dengan *loading* tinggi pada TDS dan DHL. Nilai TDS dan DHL yang tinggi menggambarkan peningkatan kandungan ion-ion terlarut yang dapat disebabkan oleh proses pelarutan mineral batuan atau aktivitas antropogenik di sekitar sumber air (Pandiangan *et al.*, 2024). PC2 menjelaskan 23,8% variansi dan didominasi oleh suhu air, yang berhubungan berlawanan arah dengan TDS dan DHL. Kenaikan suhu dapat meningkatkan kelarutan zat terlarut serta mempengaruhi keseimbangan pH air (Riaz *et al.*, 2020). Komponen PC3 dan PC4 memiliki kontribusi variansi yang lebih kecil sehingga kurang signifikan untuk interpretasi utama. Hasil analisis komponen utama secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 2.

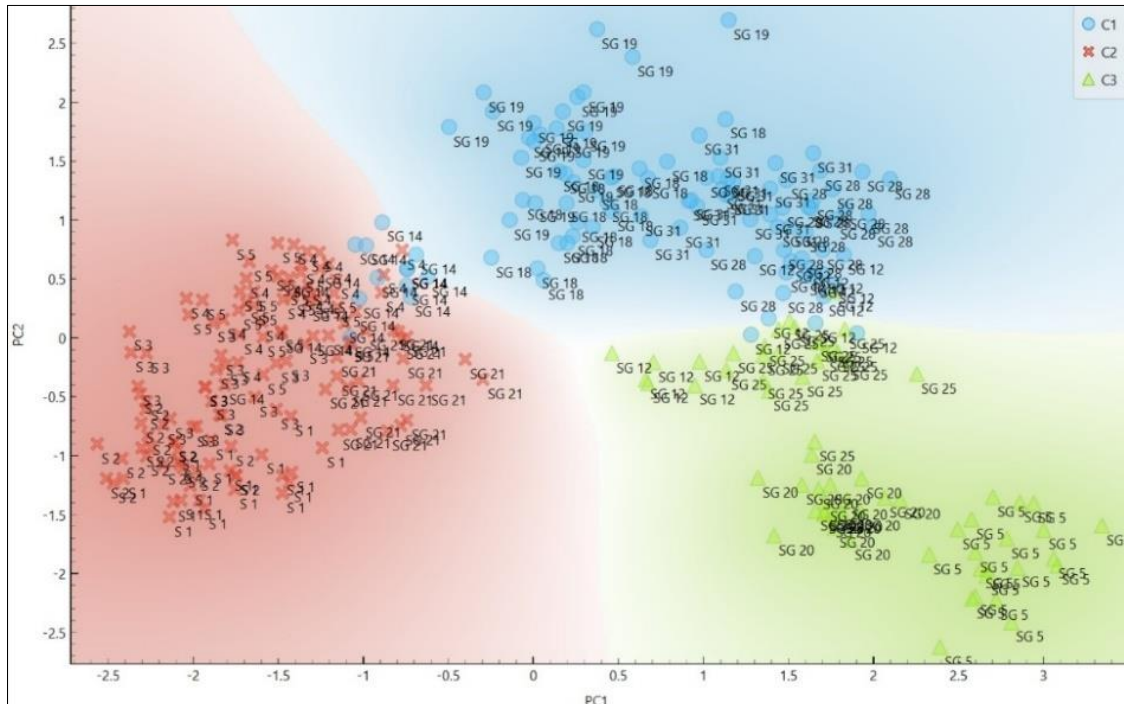
Tabel 2. Hasil analisis komponen utama

Komponen Utama	Variance	Eigenvalue	pH	Suhu Air	TDS	DHL
PC1	0,567	2,270	-0,345	0,294	0,630	0,631
PC2	0,238	0,953	-0,516	0,734	-0,315	-0,309
PC3	0,194	0,775	0,784	0,612	0,074	0,069
PC4	0,001	0,002	0,005	-0,001	-0,706	0,708

Secara keseluruhan, hasil PCA menunjukkan bahwa TDS dan DHL merupakan parameter dominan yang memengaruhi variasi kualitas air diikuti oleh suhu air sebagai faktor pembeda tambahan. Analisis ini mengindikasikan adanya keterkaitan dan interaksi antara air tanah dan air sungai yang dikontrol oleh proses fisik dan hidrogeokimia di lokasi penelitian.

Analisis Klaster

Analisis klaster *K-means* digunakan untuk mengelompokkan titik pengamatan berdasarkan kemiripan parameter fisik-kimia air (pH, suhu, TDS, dan DHL) dengan jarak *Euclidean*. Jumlah klaster optimum ditentukan menggunakan metode *Silhouette* dan diperoleh tiga klaster ($K = 3$) yang merepresentasikan air tanah di sebelah kiri aliran sungai, air sungai, dan air tanah di sebelah kanan aliran sungai. Pengelompokan dilakukan berdasarkan skor komponen utama hasil PCA (PC1 sampai PC4). Hasil analisis menunjukkan bahwa klaster 1 didominasi oleh nilai TDS dan DHL tinggi yang mencerminkan karakteristik air tanah, klaster 2 dicirikan oleh pH dan suhu lebih tinggi yang merepresentasikan air sungai yang dinamis, sedangkan klaster 3 menunjukkan karakteristik transisi antara air tanah dan air sungai. Visualisasi analisis klaster ini ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Pengelompokan titik lokasi pengukuran dengan metode *K-means*

Berdasarkan hasil analisis kluster menggunakan metode *K-Means*, diperoleh pengelompokan air tanah dan air sungai ke dalam beberapa kluster berdasarkan kemiripan karakteristik fisik-kimiawi. Hasil pengelompokan tersebut selanjutnya disajikan secara rinci dalam Tabel 4.

Tabel 4. Identifikasi hasil *clustering K-means*

Lokasi	Air Tanah Kiri	Air Sungai	Air Tanah Kanan
Penampang 1	klaster 1 ✓	klaster 3 ✗	klaster 1 ✓
Penampang 2	klaster 1 ✗	klaster 3 ✗	klaster 2 ✗
Penampang 3	klaster 2 ✗	klaster 3 ✗	klaster 1 ✗
Penampang 4	klaster 2 ✓	klaster 2 ✓	klaster 2 ✓
Penampang 5	klaster 2 ✓	klaster 2 ✓	klaster 2 ✓

Keterangan:

✓ = dominan berada di klaster yang sama

✗ = dominan tidak berada di klaster yang sama

Pada beberapa penampang, air tanah dan air sungai berada dalam klaster yang sama, sedangkan pada penampang lainnya berada pada klaster yang berbeda. Kondisi ini mengindikasikan adanya perbedaan tingkat kesamaan karakteristik fisik-kimiawi air pada setiap penampang. Kesamaan kluster mencerminkan kemiripan nilai parameter. Sebaliknya, perbedaan

klaster menunjukkan bahwa interaksi tersebut tidak dominan atau dipengaruhi oleh kondisi hidrologi lokal, sehingga karakteristik air tanah dan air sungai tidak seragam (Page *et al.*, 2012). Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa interaksi air tanah dan air sungai bersifat tidak merata dan dipengaruhi oleh kondisi hidrologi lokal di sepanjang lokasi penelitian.

Kesimpulan

Berdasarkan seluruh rangkaian analisis secara statistik, interaksi antara air tanah dan air sungai menunjukkan pola keterkaitan yang konsisten, meskipun tingkat kekuatannya bervariasi antar metode dan lokasi. Analisis deret waktu memperlihatkan kesamaan pola fluktuasi parameter fisik, terutama suhu dan pH, yang mengindikasikan adanya keterkaitan hidrologis secara temporal. Temuan ini didukung oleh analisis koefisien korelasi yang menunjukkan hubungan sedang hingga kuat pada parameter suhu dan pH di sebagian besar penampang. Hasil analisis komponen utama (PCA) menunjukkan kedekatan karakteristik antara air tanah dan air sungai melalui kontribusi dominan parameter TDS dan daya hantar listrik. Selanjutnya, analisis klaster K-means mengindikasikan bahwa tingkat interaksi air tanah dan air sungai tidak merata di sepanjang lokasi penelitian, dengan keterkaitan yang lebih kuat teridentifikasi pada Penampang-4 dan Penampang-5 dibandingkan penampang lainnya. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa air tanah dan air sungai di Sungai Asem saling berinteraksi dengan intensitas yang dipengaruhi oleh kondisi hidrologi lokal.

Keterbatasan penelitian ini yaitu adanya *time lag* dalam pengukuran parameter fisik-kimiawi air antar lokasi pengambilan/pengukuran contoh. Hal ini berpotensi memengaruhi data hasil pengukuran antar lokasi karena tidak diperoleh dalam waktu yang bersamaan. Parameter fisik-kimiawi air yang diukur masih terbatas menggunakan alat ukur portabel. Oleh karena itu, dalam penelitian lanjutan disarankan agar pengukuran parameter fisik-kimiawi air dilakukan secara bersamaan di seluruh lokasi pengamatan. Pengambilan contoh air dari lokasi pengamatan untuk dilakukan pengujian laboratorium khususnya terkait kandungan unsur-unsur kimia dalam air juga perlu dilakukan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai interaksi air tanah dan air permukaan.

Daftar Pustaka

- Anisah, S., Yuliani, E., Andawayanti, U., Imai, T., & Samaniyatul, F. (2024). Interaction between groundwater and surface water in Porong River, Sidoarjo. *Journal of Water and Land Development*, 15(1). <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2024.015.01.3>
- Jena, G., Dutta, K., & Daverey, A. (2023). Surfactants in water and wastewater (greywater): Environmental toxicity and treatment options. *Chemosphere*, 341, 140082. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140082>
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis* (2nd ed.). Springer.
- Lien, T., Chang, E. T., Cheng, H., & Yeh, T. (2025). Unveiling river-groundwater interactions through time-variable seismic velocity in northern Pingtung Plain, southern Taiwan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102267. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102267>
- Mousumi, D., Hasan, M., & Tariq, A. (2025). Thermal stability of groundwater relative to

- surface water in subtropical regions. *Journal of Water and Climate Change*, 16(1), 45–58.
- Nugraha, S., Alfahmi, S., Wiwit, H., & Cahyono, H. (2023). Analisis pola aliran dan kuantitas air tanah dangkal di Kota Madiun. *Jurnal Teknik Pengairan*, 25, 52–65. <https://doi.org/10.20961/enviro.v25i1.78749>
- Nurjanah, N., Andi, F., & Indriani, F. (2017). Implementasi metode Fuzzy C-Means pada sistem clustering data varietas padi. *KLIK-Kumpulan Jurnal Ilmu Komputer*, 1(1), 23–32.
- Page, R. M., Lischeid, G., Epting, J., & Huggenberger, P. (2012). Principal component analysis of time series for identifying indicator variables for riverine groundwater extraction management. *Journal of Hydrology*, 432–433, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.025>
- Pandiangan, Y. S., Zulaikha, S., Warty, W., & Yudo, S. (2023). Status kualitas air Sungai Ciliwung berbasis pemantauan online di wilayah DKI Jakarta ditinjau dari parameter suhu, pH, TDS, DO, DHL, dan kekeruhan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), 176–182. <https://doi.org/10.55981/jtl.2023.1003>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2011 tentang Sungai. (2011). *Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2011 Nomor 74*.
- Phan, C. N., Strużyński, A., & Kowalik, T. (2023). Correlation between hydrochemical component of surface water and groundwater in Nida Valley, Poland. *Journal of Water and Land Development*, 24(12), 167–177. <https://doi.org/10.12911/22998993/172424>
- Raghavan, S. S., Joseph, S., & Eslamian, S. (2024). Deciphering groundwater–surface water interactions using environmental tracers in a tropical lake, Southwest India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 19. <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.19.3.5>
- Razi, M. H., Wilopo, W., & Putra, D. P. E. (2024). Hydrogeochemical evolution and water–rock interaction processes in the multilayer volcanic aquifer of Yogyakarta–Sleman Groundwater Basin, Indonesia. *Environmental Earth Sciences*, 83, 164. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11477-6>
- Riaz, M., Khan, S., & Ahmed, N. (2020). Temperature influence on hydrochemical properties of groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 450–462. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07092-4>
- Sugiharto, W. H., Susanto, H., & Prasetijo, A. B. (2023). Real-time water quality assessment via IoT: Monitoring pH, TDS, temperature, and turbidity. *ISI Journal*, 28(4). <https://doi.org/10.18280/isi.280403>
- Sugiyono. (2017). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D* (hlm. 224). Bandung: Alfabeta.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air.
- Wei, W. W. S. (2006). *Time series analysis: Univariate and multivariate methods* (2nd

ed.). Pearson Addison-Wesley

Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). *Ground water and surface water: A single resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139.