

Interaksi Air Tanah dan Air Permukaan Sungai Asem Ruas Antara Bendung Brugpurwo sampai Bendung Boreng

Aulia Zam Zam Firdaus¹, Hari Siswoyo^{2*}, Linda Prasetyorini³

^{1,2,3} Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

*Email: hari_siswoyo@ub.ac.id

ABSTRACT

Domestic and industrial waste pollution in the Asem River has the potential to affect the quality of groundwater around the river flow. The purpose of this study was to identify the types of interactions that occur between groundwater and surface water in the Asem River. The methods used are statistical analysis including time series analysis, correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. Observations were made at five cross sections covering groundwater on the right side of the river flow, river water, and groundwater on the left side of the river flow. Parameters measured included pH, temperature, total dissolved solids, and electrical conductivity. Based on the results of the time series analysis, it can be stated that there are similarities in parameter fluctuation patterns between groundwater and river water. The similarity of these fluctuation patterns is proven through correlation analysis which shows a strong relationship. Based on the results of the principal component analysis, it can be shown that water quality variations are controlled by total dissolved solids and electrical conductivity with an accumulated contribution of 93.16%. Based on the results of the cluster analysis, it can be shown that the interaction between groundwater and river water occurs with a relatively low intensity so that the identity of each water source can still be distinguished. In general, it can be concluded that there is an interaction between groundwater and surface water with the domain of the type of interaction being losing stream.

Keywords: Asem river; groundwater; interaction patterns; statistical analysis; surface water

ABSTRAK

Pencemaran limbah domestik dan industri di Sungai Asem berpotensi memengaruhi kualitas air tanah di sekitar aliran sungai. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi jenis interaksi yang terjadi antara air tanah dan air permukaan di Sungai Asem. Metode yang digunakan adalah analisis statistik yang meliputi analisis deret waktu, analisis korelasi, analisis komponen utama, dan analisis kluster. Pengamatan dilakukan pada lima penampang yang meliputi air tanah di sisi kanan aliran sungai, air sungai, dan air tanah di sisi kiri aliran sungai. Parameter yang diukur meliputi pH, suhu, total padatan terlarut, dan daya hantar listrik. Berdasarkan hasil analisis deret waktu, dapat dinyatakan bahwa terdapat kesamaan pola fluktuasi parameter antara air tanah dan air sungai. Kesamaan pola fluktuasi ini dibuktikan melalui analisis korelasi yang menunjukkan hubungan yang kuat. Berdasarkan hasil analisis komponen utama, dapat ditunjukkan bahwa variasi kualitas air dikendalikan oleh total padatan terlarut dan daya hantar listrik dengan kontribusi kumulatif sebesar 93,16%. Berdasarkan hasil analisis kluster, dapat ditunjukkan bahwa interaksi antara air tanah dan air sungai terjadi dengan intensitas yang relatif rendah sehingga identitas masing-masing sumber air masih dapat dibedakan. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa terdapat interaksi antara air tanah dan air permukaan dengan domain jenis interaksi adalah air sungai mengisi air tanah.

Kata-kata Kunci: air permukaan; air tanah; analisis statistik; pola interaksi; Sungai Asem

PENDAHULUAN

Sungai Asem merupakan sungai yang membentang di tengah wilayah perkotaan dengan bantaran sungai yang dimanfaatkan untuk berbagai jenis tata guna lahan, seperti persawahan, industri, dan permukiman. Tingginya intensitas aktivitas antropogenik pada bantaran sungai mengakibatkan peningkatan beban pencemar pada sungai yang bersumber dari limbah domestik maupun limbah industri. Limbah domestik berasal dari aktivitas masyarakat yang tinggal di bantaran sungai serta aktivitas pencucian kendaraan angkutan berat di badan sungai yang memanfaatkan bahan kimia seperti detergen dan solar

(jatimhariini.co.id, 2023). Selain itu, terdapat pencemar yang berasal dari limbah industri pengolahan tahu yang membuang limbahnya langsung ke badan sungai sehingga menyebabkan air berwarna putih berbusa, keruh, dan bau (Hasil survei pendahuluan, 28 Desember 2024). Akumulasi pencemaran di sepanjang aliran tersebut menyebabkan penurunan kualitas air Sungai Asem.

Penurunan kualitas juga ditemukan pada beberapa air tanah di sekitar aliran sungai, seperti air sumur yang memiliki rasa dan bau seperti besi. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan masuknya air sungai yang telah tercemar ke dalam air tanah. Proses interaksi tersebut meningkatkan kandungan besi (Fe) yang berlebih pada air tanah (Nanda *et al.*, 2023).

Hal tersebut sejalan dengan hasil penelitian di bantaran Sungai Cikapundung Kota Bandung, Kali Sumpil Kota Malang, dan Kali Jilu Kota Malang menunjukkan adanya kemiripan karakteristik kualitas antara air tanah di bantaran sungai dengan air sungai di daerah perkotaan (Darul *et al.*, 2016; Irvandi *et al.*, 2022; Yuniar *et al.*, 2022). Namun, penelitian-penelitian tersebut dilakukan berdasarkan pendekatan secara fisik, belum dilengkapi dengan analisis statistik yang menguji parameter fisik-kimiawi secara spasio-temporal. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk dilakukan mengingat jumlah pengguna sumur gali sebagai sumber air minum pada tahun 2015 mencapai 144.705 orang (Badan Pusat Statistik Kabupaten Lumajang, 2021).

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan statistik meliputi analisis deret waktu, analisis korelasi, analisis komponen utama atau *principal component analysis (PCA)*, dan analisis kluster. Analisis deret waktu dilakukan untuk mengidentifikasi pola fluktuasi parameter fisik-kimiawi selama 21 hari (Cui *et al.*, 2025). Analisis korelasi dilakukan untuk mengukur derajat hubungan antar variabel melalui koefisien korelasi (Serimbing, 2024). Analisis komponen utama dilakukan untuk mereduksi data dan mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap interaksi yang terjadi (Rosyada & Utari, 2024). Hasil komponen utama digunakan untuk analisis kluster, yaitu pengelompokan berdasarkan kesamaan karakteristik kualitas air sehingga pola interaksi air tanah dan air permukaan dapat teridentifikasi dengan jelas (Rosyada & Utari, 2024; Wijaya & Budiman, 2016; Purnomo *et al.*, 2022).

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengidentifikasi jenis interaksi air tanah dan air permukaan Sungai Asem ruas antara Bendung Brugpurwo sampai dengan Bendung Boreng secara spasio-temporal berdasarkan pendekatan statistik. Interaksi merupakan hubungan yang terjadi karena pergerakan air antara air tanah dan air sungai di dalam tanah. Hubungan atau interaksi yang dimaksud dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu air tanah mengisi air sungai (*gaining stream* atau *effluent*), air sungai mengisi air tanah (*loosing stream* atau *influent*), dan kombinasi dari kedua kondisi tersebut (Banerjee & Ganguly, 2023).

Pola interaksi air tanah dan air sungai dapat sangat bervariasi di sepanjang aliran dan dapat berubah dalam jangka waktu yang sangat singkat (Loukika *et al.*, 2025). Perubahan tersebut dipengaruhi oleh alam maupun aktivitas manusia (Elsiana *et al.*, 2023). Perubahan yang sangat dinamis tersebut menjadi dasar penelitian ini dilakukan secara spasio-temporal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Sungai Asem ruas antara Bendung Brugpurwo sampai dengan Bendung Boreng sepanjang 7 km yang terletak di Kabupaten Lumajang, Provinsi Jawa Timur. Penelitian diawali dengan survei pendahuluan untuk menentukan lokasi penampang sungai di sepanjang aliran sungai. Penelitian ini difokuskan pada 5 penampang yang masing-masing terdiri atas sumur gali di kanan aliran sungai, sungai, dan sumur gali di kiri aliran sungai. Lokasi penampang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan kode P1 hingga P5, dimana Penampang 1 (SG Ki-02, S-01, SG Ka-06), Penampang 2 (SG Ki-16, S-02, SG Ka-23), Penampang 3 (SG Ki-34, S-03, SG Ka-20), Penampang 4 (SG Ki-35, S-04, SG Ki-49), dan Penampang 5 (SG Ki-41, S-05, SG Ka-42). Kode contoh “SG-Ka” adalah air tanah di sebelah kanan aliran sungai, “SG-Ki” adalah air tanah di sebelah kiri aliran sungai, dan “S” adalah air permukaan (sungai).

Pada tiap contoh dilakukan pengukuran parameter pH, suhu, total padatan terlarut (TDS), dan daya hantar listrik (DHL) secara berulang selama 21 hari, terhitung mulai 13 September – Oktober 2025. Data hasil pengukuran dianalisis secara deret waktu untuk mengidentifikasi pola fluktuasi masing-masing parameter. Hasil analisis deret waktu digunakan sebagai dasar dalam analisis korelasi untuk menilai tingkat hubungan nilai parameter fisik-kimiawi antar titik pengamatan. Data kemudian direduksi menggunakan analisis komponen utama untuk memperoleh komponen pembentuk variasi kualitas air, dan hasilnya digunakan sebagai input dalam analisis kluster. Analisis kluster dilakukan untuk mengelompokkan titik pengamatan berdasarkan kesamaan kualitas air sebagai dasar identifikasi interaksi air tanah dan air sungai.



Gambar 1. Lokasi penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: timba bertali untuk mengambil contoh air, *water quality tester EZ9908* untuk mengukur nilai pH, suhu, TDS, dan DHL, formulir data lapangan untuk mencatat hasil pengukuran di lapangan. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10 contoh air tanah dan 5 contoh air permukaan (sungai). Pengukuran parameter fisik-kimiawi contoh air dilakukan berdasarkan SNI 6989.58:2008 tentang Air dan Air Limbah–Bagian 58 (Badan Standardisasi Nasional, 2008). Pengukuran parameter fisik-kimiawi contoh air ini dilakukan secara kontinyu selama 21 hari. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan variasi temporal kualitas air (Benisch *et al.*, 2024).

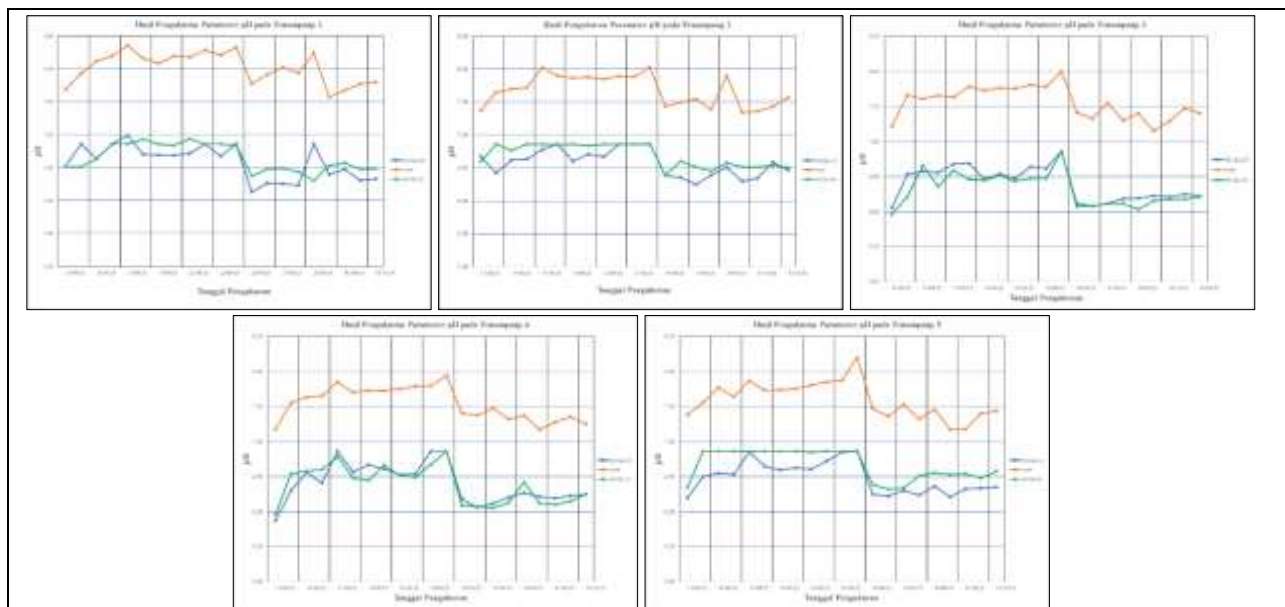
Analisis deret waktu dilakukan dengan metode *least square* (Sinaga, 2023). Tingkat kemiripan nilai parameter fisik-kimiawi yang didapatkan dari analisis deret waktu dapat diketahui berdasarkan nilai koefisien korelasi. Perhitungan koefisien korelasi dilakukan dengan menggunakan metode *pearson product momen* dan nilai koefisien korelasi (r) yang telah didapatkan dapat diinterpretasi tingkat keeratan hubungannya (Serimbing, 2024). Analisis komponen utama terdiri atas beberapa tahapan yang standarisasi data menggunakan *Z-score* untuk menyamakan skala variabel, menghitung kovarian matriks untuk menggambarkan hubungan antar parameter, penentuan nilai dan *vector eigen* sebagai pembentukan komponen utama (Rosyada & Utari, 2024). Jumlah komponen utama ditentukan berdasarkan kriteria Kaiser, yaitu komponen dengan nilai *eigen* ≥ 1 (Rosyada & Utari, 2024). Tranformasi data dengan karakteristik baru yang merupakan hasil reduksi dalam analisis komponen utama untuk mendapatkan nilai komponen utama (PC). Parameter domain dalam komponen utama yang dihasilkan dapat ditentukan apabila nilai *loading* $\geq 0,7$ (Bunting, 2020). Tahap terakhir dalam analisis statistik adalah dilakukannya analisis kluster dari hasil komponen utama. Analisis kluster dimulai dengan menentukan jumlah kluster yang optimal menggunakan metode *silhouette*. Apabila nilai koefisien *silhouette* mendekati nilai 1, maka pengelompokan data dalam satu kluster semakin baik, apabila mendekati nilai -1, maka pengelompokan

data dalam satu kluster semakin buruk. Proses pengelompokan dilakukan dengan metode *K-means* yang meliputi inisial pusat kluster secara acak pada sejumlah kalster, menghitung jarak antar data dengan pusat kluster menggunakan jarak *Ecludiden*, serta mengelompokkan data berdasarkan jarak terdekat anatara setiap data terhadap pusat kluster. Pusat kluster diperbarui berdasarkan nilai rata-rata anggota kluster dan proses iterasi dilakukan hingga mencapai kondisi konvergen yaitu ketika pusat kluster stabil dan tidak terjadi perpindahan anggota kluster (Rosyada & Utari, 2024). Kluster yang terbentuk menunjukkan kemiripan karakteristik kualitas air yang diinterpretasikan sebagai indikasi interaksi. Perhitungan nilai koefisien korelasi, analisis komponen utama, dan analisis kluster dilakukan dengan bantuan paket program komputer *Orange Data Mining* versi 3.38.1.

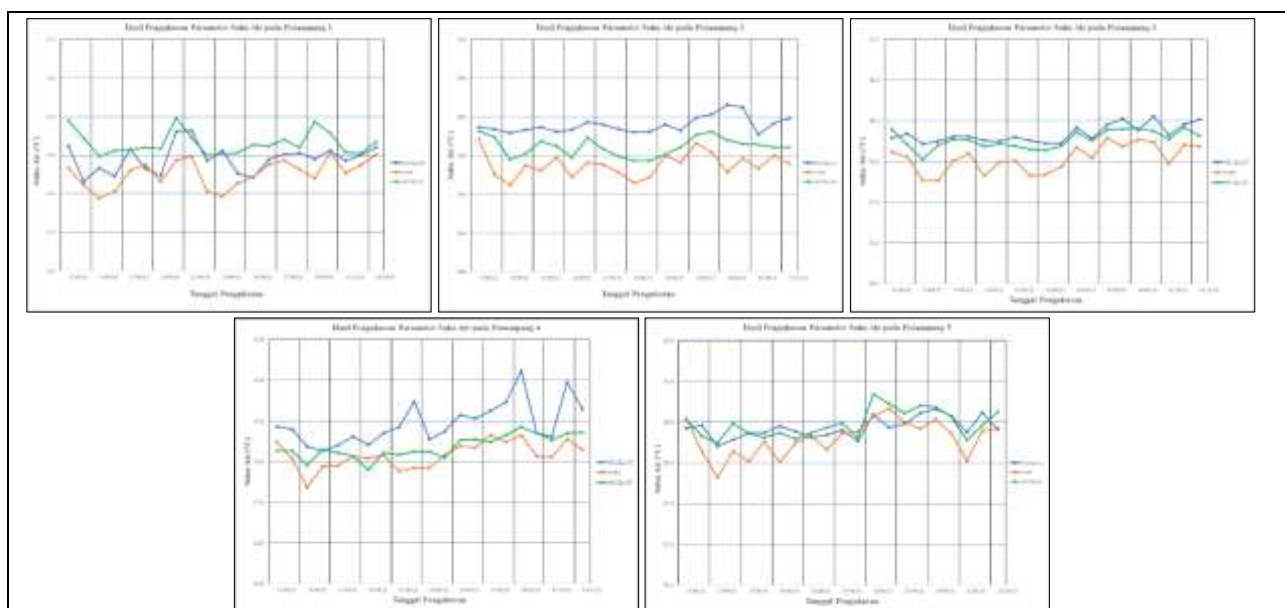
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

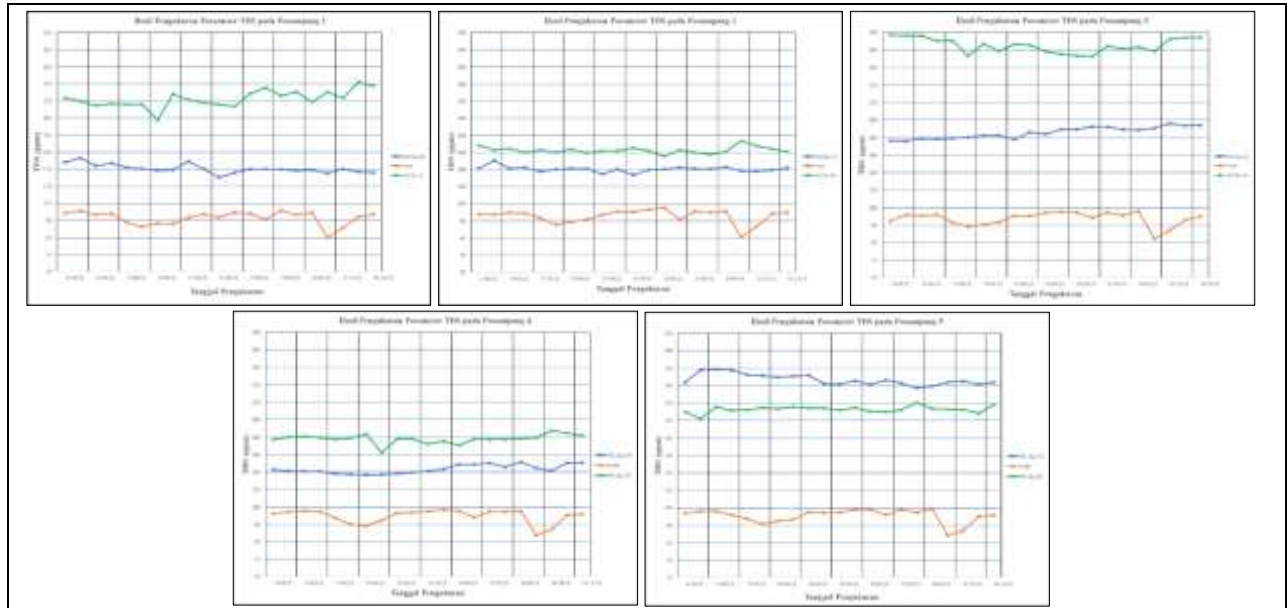
Berdasarkan analisis deret waktu dapat dinyatakan bahwa adanya kemiripan pola fluktuasi parameter fisik-kimiawi antara air tanah dan air permukaan pada seluruh penampang. Kemiripan pola fluktuasi parameter fisik-kimiawi dapat dilihat melalui grafik nilai pH, suhu, TDS, dan DHL pada setiap penampang seperti ditunjukkan dalam Gambar 2 hingga Gambar 5.



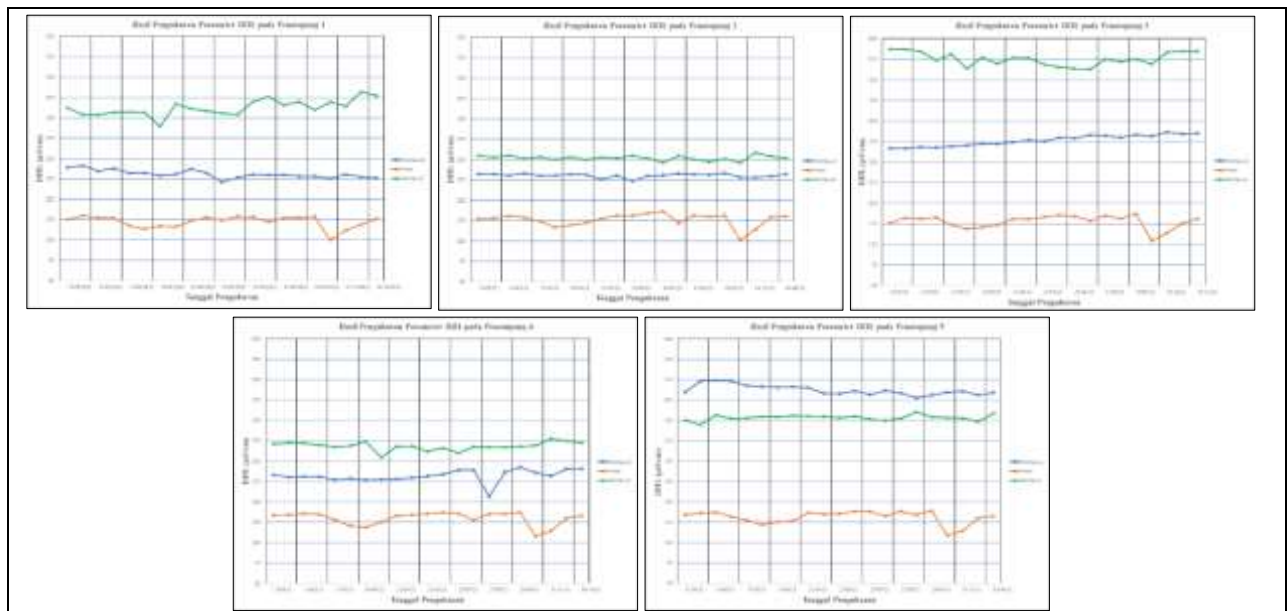
Gambar 2. Grafik nilai parameter pH pada setiap penampang selama periode pengamatan



Gambar 3. Grafik nilai parameter suhu pada setiap penampang selama periode pengamatan



Gambar 4. Grafik nilai parameter TDS pada setiap penampang selama periode pengamatan



Gambar 5. Grafik nilai parameter DHL pada setiap penampang selama periode pengamatan

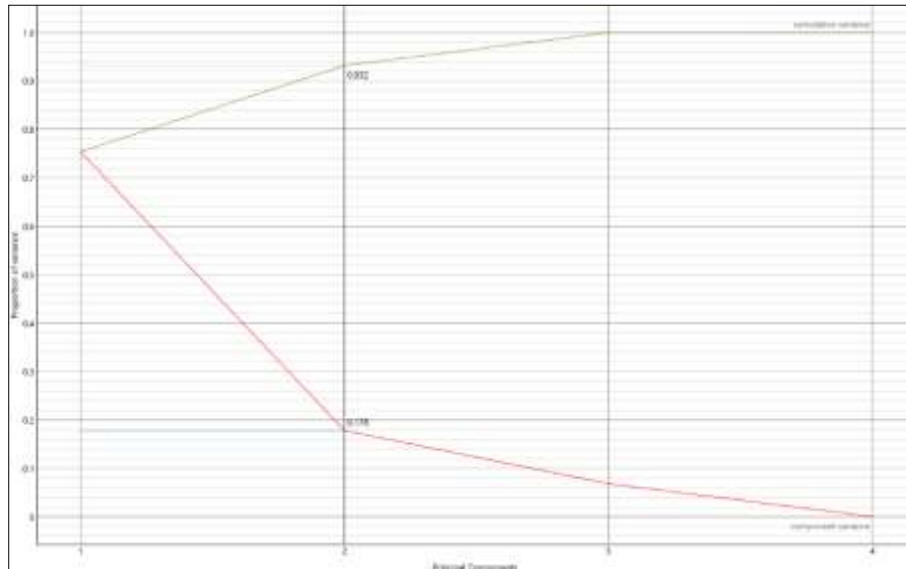
Hasil perhitungan dari analisis korelasi antar parameter disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa parameter pH memiliki koefisien korelasi tertinggi dibandingkan parameter lainnya. Korelasi air tanah dan air sungai berdasarkan parameter TDS dan DHL termasuk dalam kategori hubungan yang lemah pada seluruh penampang.

Tabel 1. Hasil Analisis Korelasi

	Lokasi	P1	P2	P3	P4	P5
pH	SGKa-06	SGKi-02	SGKa-23	SGKi-16	SGKa-20	SGKi-34
	0,742	0,645	0,767	0,824	0,881	0,833
Suhu	SGKa-06	SGKi-02	SGKa-23	SGKi-16	SGKa-20	SGKi-34
	0,601	0,482	0,372	0,682	0,828	0,901
TDS	SGKa-06	SGKi-02	SGKa-23	SGKi-16	SGKa-20	SGKi-34
	0,298	-0,000	0,143	-0,641	-0,095	-0,007
DHL	SGKa-06	SGKi-02	SGKa-23	SGKi-16	SGKa-20	SGKi-34
	0,269	-0,118	0,152	0,047	-0,046	-0,012

Keterangan: SK = hubungan sangat kuat, K = hubungan kuat, S = hubungan sedang, L = hubungan lemah, SL = hubungan sangat lemah

Untuk mereduksi data serta mengidentifikasi parameter yang paling berperan dalam pola interaksi dilakukan analisis komponen utama. Hasil analisis komponen utama adalah terdapat dua komponen utama (PC), yaitu PC1 dan PC2 yang secara kumulatif menjelaskan 93,16% variasi data sehingga dinilai cukup merepresentasikan pola hubungan antarparameter kualitas air (Purnama, 2019). Hasil analisis komponen utama dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 2.

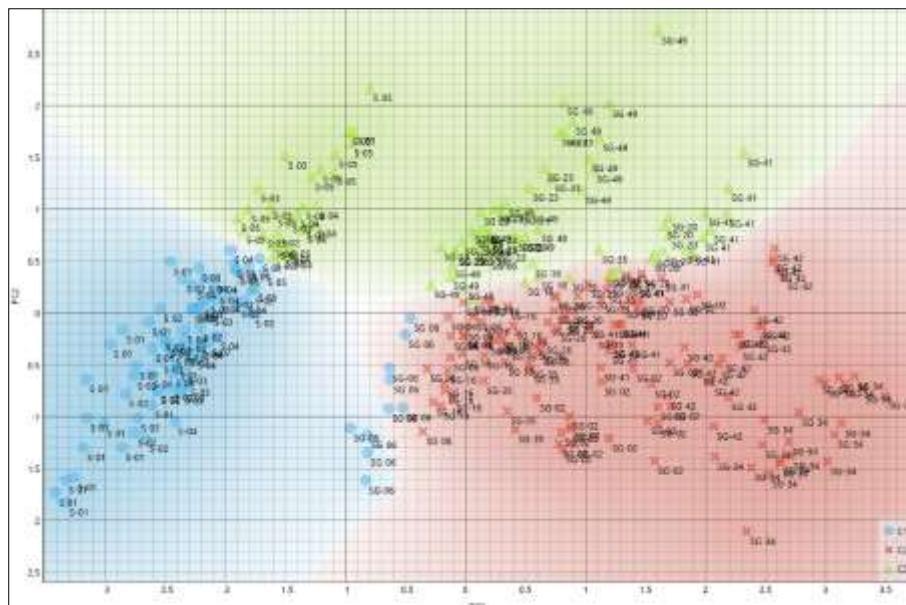


Gambar 6. Grafik hasil analisis komponen utama

Tabel 2. Hasil analisis komponen utama

No	Komponen	Varian	pH	Suhu	TDS	DHL
1	PC1	0,753602	-0,511716	0,390793	0,541314	0,540747
2	PC2	0,178037	-0,146156	0,837986	-0,370685	-0,372841

Hasil analisis kluster menyatakan bahwa tidak ada air tanah dan air sungai pada domain pada kluster yang sama seperti ditunjukkan dalam Gambar 7. Hasil tersebut diperoleh dari pengelompokan komponen utama PC1 dan PC2. Pengelompokan tersebut dimulai dengan penentuan jumlah kluster optimal yang dapat ditunjukkan dari Skor *Silhouette* tertinggi, yaitu 0,401 yang diperoleh pada jumlah kluster sebanyak tiga ($k = 3$). Nilai ini lebih tinggi dibandingkan konfigurasi yang lain sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 3. Identifikasi masing-masing kluster berdasarkan hasil pengelompokan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 7. Hasil *Scatter Plot* Analisis Kluster

Tabel 3. Hasil Skor *Silhouette*

Jumlah Kelompok	Skor <i>Silhouette</i>
2	0,391
3	0,401
4	0,387
5	0,398

Tabel 4. Hasil skor *Silhouette*

Penampang	Air Tanah Kiri	Air Sungai	Air Tanah Kanan
1	✓	✓	×
2	×	×	×
3	✓	×	✓
4	×	×	×
5	×	×	×

Keterangan: ✓ = Dominasi pada satu klaster yang sama, × = Tidak dominasi pada satu klaster yang sama

Pembahasan

Rentang nilai pH terbagi atas dua kategori utama, yaitu rentang pH untuk air sungai dan air tanah. Air sungai memiliki rentang pH yang berkisar antara 7,5 hingga 8,5, sedangkan air tanah memiliki nilai rentang pH yang berkisar antara 6,0 hingga 7,0. Konsistensi perbedaan rentang nilai pH tersebut menunjukkan bahwa air sungai bersifat netral hingga basa (*alkaline*) sedangkan air tanah bersifat lebih asam (*acidic*). Kondisi ini dapat terjadi pada air tanah karena proses perkolasi air hujan yang sedikit asam melalui lapisan tanah, serta akumulasi asam organik dari dekomposisi bahan organik dalam akuifer (Wang *et al.*, 2024).

Suhu air sungai umumnya lebih rendah dibandingkan suhu air tanah. Perbedaan rentang nilai suhu air tanah dan air sungai dapat dijelaskan melalui mekanisme perpindahan panas bawah permukaan, dimana air tanah berada dalam media tanah dan batuan menerima panas melalui proses konduksi dan konveksi serta terlindungi oleh sifat isolatif tanah sehingga suhu air tanah cenderung lebih tinggi dan stabil (Karisallen *et al.*, 2022). Sebaliknya, air sungai yang terbuka dan berinteraksi langsung dengan atmosfer yang sangat dipengaruhi oleh radiasi matahari dan cuaca harian sehingga menyebabkan variasi suhu yang lebih tidak stabil (Jung *et al.*, 2022).

Nilai parameter TDS air sungai cenderung lebih rendah dibandingkan dengan air tanah. Konsentrasi TDS air tanah yang lebih tinggi mencerminkan waktu tinggal yang lebih lama serta proses pelarutan mineral akuifer yang lebih intensif (Kannan *et al.*, 2025). Fluktuasi TDS pada air sungai dan air tanah memperlihatkan pola temporal yang cenderung sama.

Pada pengamatan tanggal 30 September 2025 hingga 1 Oktober 2025, seluruh penampang menunjukkan adanya pola penurunan pada nilai TDS dan DHL secara bersamaan. Kondisi ini disebabkan oleh hujan lebat yang meningkatkan volume air sungai secara signifikan. Masuknya air hujan dan limpasan permukaan ke dalam sungai menyebabkan efek pengenceran (*flushing effect*), yaitu menurunnya konsentrasi zat terlarut dalam air sungai karena terencerkan oleh air hujan yang memiliki kandungan mineral lebih rendah (Huang *et al.*, 2020). Parameter TDS dan DHL menunjukkan kecenderungan pola yang sama karena keduanya memiliki hubungan linear, di mana peningkatan nilai TDS diikuti oleh peningkatan nilai DHL (Rusydi, 2018).

Secara keseluruhan, fluktuasi parameter fisik-kimiawi antara air tanah dan air sungai memiliki pola kecenderungan yang sama seperti yang telah disajikan pada Gambar 2 hingga Gambar 5. Hal ini mengindikasikan adanya interaksi aktif antara air tanah dan air sungai. Penampang 1, 2, 3, dan 5 menunjukkan kondisi *loosing stream* atau kondisi air sungai mengisi air tanah. Hal ini terjadi karena ketika air sungai mengalami kenaikan atau penurunan nilai parameter, maka beberapa waktu kemudian air tanah juga mengalami kenaikan atau penurunan nilai parameter yang serupa. Kondisi ini menjadi indikasi bahwa air sungai meresap ke dalam tanah, sehingga perubahan yang terjadi di sungai juga akan terjadi pada air tanah dalam selang waktu tertentu. Sebaliknya, pada Penampang 4, terjadi kondisi *gaining stream* atau kondisi air tanah mengisi air sungai. Pada kondisi ini, air tanah mengalami kenaikan atau penurunan nilai parameter terlebih dahulu yang kemudian terjadi pada air sungai. Temuan ini sejalan dengan teori interaksi air tanah dan air sungai yaitu kesamaan respons temporal parameter kualitas air mencerminkan keterkaitan hidrologis antara kedua sistem (Khan *et al.*, 2025).

Lemahnya tingkat hubungan TDS dan DHL dalam analisis korelasi dipengaruhi oleh proses filtrasi dan adsorpsi ion terlarut di media tanah. Perubahan kandungan zat terlarut tidak selalu tercermin secara langsung (Ismayilov *et al.*, 2021). Kondisi ini merupakan indikasi bahwa pH dan suhu merupakan parameter paling sensitif dalam merepresentasikan interaksi air tanah dan air sungai yang terjadi (Alam *et al.*, 2021).

PC1 menjelaskan 75,36% variasi dan dikendalikan oleh TDS dan DHL dengan *loading* positif tinggi, serta pH dengan korelasi negatif, yang merepresentasikan faktor kandungan ion terlarut akibat interaksi air dengan batuan (Yousif & El-aassar, 2018). PC2 menjelaskan 17,80% variasi dan didominasi oleh suhu, yang mencerminkan pengaruh termal terhadap dinamika fisikokimia air (Baharvand *et al.*, 2019). Secara keseluruhan, hasil analisis komponen utama menunjukkan bahwa variasi kualitas air dipengaruhi oleh parameter kimia yang sama, yaitu TDS dan DHL. Kondisi ini menunjukkan adanya kontak antara air tanah dan air sungai sehingga sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa kesamaan proses pengontrol geokimia terjadi ketika terdapat interaksi antara air tanah dan air sungai (Banerjee & Ganguly, 2023).

Berdasarkan kombinasi PC1 dan PC2, terbentuk tiga kluster utama yang terpisah dengan jelas. Kluster 1 (Gambar 7, warna biru) didominasi air sungai dengan karakteristik fisik-kimia yang relatif homogen, kluster 2 (Gambar 7, warna merah) didominasi air tanah di sebelah kiri aliran sungai dengan nilai PC1 tinggi yang mencerminkan kandungan ion terlarut lebih besar, dan kluster 3 (Gambar 7, warna hijau) didominasi air tanah di sebelah kanan aliran sungai dengan nilai PC2 relatif tinggi berdasarkan pengaruh faktor termal. Pemisahan ini mengindikasikan perbedaan karakteristik kualitas air secara statistik multivariat antara ketiga komponen tersebut.

Berdasarkan Tabel 4 di atas, dapat diketahui bahwa tidak ada penampang yang menunjukkan air sungai dan air tanah berada pada domain pada kluster yang sama. Istilah domain menunjukkan bahwa mayoritas sampel suatu komponen berada dalam satu kluster sehingga sebagian sampel dapat muncul pada kluster lain dan membentuk zona *overlap*. Secara statistik, pemisahan kluster ditentukan oleh jarak *Eclidean* antar sampel dalam ruang multivariat, dimana terdapat perbedaan nilai parameter yang menghasilkan jarak statistik yang besar sehingga terbentuk pemisahan kluster yang tegas. Tidak ditemukannya komponen air tanah dan air sungai pada domain dalam kluster yang sama menunjukkan bahwa interaksi tidak terjadi secara intensif, sedangkan keberadaan sampel pada kluster non-domain menunjukkan variabilitas spasial dan temporal alami (Tiri & Lahbari, 2017).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, secara umum dapat disimpulkan bahwa pada Sungai Asem ruas antara Bendung Brugpurwo hingga Bendung Boreng secara statistik menunjukkan adanya interaksi antara air tanah dan air sungai. Hasil analisis menunjukkan bahwa interaksi yang teridentifikasi pada sebagian besar penampang cenderung memperlihatkan pola *loosing stream*, di mana air sungai berperan sebagai sumber imbuhan bagi air tanah, dengan variasi respon yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan jangka waktu pengamatan yang lebih lama untuk lebih merepresentasikan variasi musiman.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, A. U., Clyne, D., & Deen, M. J. (2021). A Low-Cost Multi-Parameter Water Quality Monitoring System, 21(11), 3775. <https://doi.org/10.3390/s21113775>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Lumajang. (2021). *Persentase Rumah Tangga dan Sumber Air Minum Rumah Tangga di Jawa Timur di Kabupaten Lumajang Tahun 2009–2016*. Lumajang: BPS Kabupaten Lumajang.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *Air dan Air Limbah – Bagian 58: Metoda Pengambilan Contoh Air Tanah*. SNI 6989.58:2008. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Baharvand, S., Reza, M., & Daneshvar, M. (2019). Impact Assessment of Treating Wastewater on The Physiochemical Variables of Environment: A Case of Kermanshah Wastewater Treatment Plant in Iran. *Environmental Systems Research*, 8(18): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0146-0>
- Banerjee, D. & Ganguly, S. (2023). A Review on The Research Advances in Groundwater–Surface Water Interaction with An Overview of The Phenomenon. *Water*, 15(8), 1552. <https://doi.org/10.3390/w15081552>
- Benisch, J., Helm, B., Chang, X., & Krebs, P. (2024). Can Short-Term Online-Monitoring Improve The Current WFD Water Quality Assessment Regime? Systematic Resampling of High-Resolution Data From Four Saxon Catchments. *Water*, 16(6), 889. <https://doi.org/10.3390/w16060889>

- Bunting, M. (2020). Dimensions and Indicators of Non-Profit Financial Condition: Evidence from South African Public Universities. *South African Journal of Economic and Management Sciences*, 23(1): 131–131. <https://doi.org/10.4102/sajems.v23i1.2974>
- Cui, G., Meng, Y., Li, X., Wang, Z., Yao, Q., Li, W., Dong, L., & Xia, L. (2025). Analysis of Spatio-Temporal Characteristics of Water Quality for Ecological Water Replenishment in The Gorge Section of Yongding River, 17(24): 1–21. <https://doi.org/10.3390/w17243454>
- Darul, A., Irawan, D. E., Trilaksono, N. J., Pratama, A., & Fitria, U. R. (2016). Conceptual model of groundwater and river water interactions in Cikapundung Riverbank, Bandung, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 29(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/29/1/012026>
- Elsiana, R. A., Putra, D. P. E. & Wilopo, W. (2023). Pengaruh interaksi air tanah dan air sungai terhadap konsentrasi nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) di sekitar Sungai Winongo, Kota Yogyakarta, D.I. Yogyakarta. *Jurnal Ilmiah MTG*, 14(02), 1–12. <https://doi.org/10.31315/jmtg.v14i1.11009>
- Huang, G.-Z., Hsu, T., Yu, C.-K., Huang, J.-C., & Lin, T.-C. (2020). Dilution and Precipitation Dominated Regulation of Stream Water Chemistry of A Volcanic Watershed. *Journal of Hydrology*, 583, 124564. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124564>
- Irvandi, M. A., Siswoyo, H., & Irawan, D. E. (2022). Pemetaan pola aliran air tanah di sekitar Kali Sumpil Kota Malang. *Tecnoscienza*, 6(2): 389–403. <https://doi.org/10.51158/tecnoscienza.v6i2.717>
- Ismayilov, A. I., Mamedov, A. I., Fujimaki, H., Tsunekawa, A., & Levy, G. J. (2021). Soil Salinity Type Effects on The Relationship Between The Electrical Conductivity and Salt Content For 1:5 Soil-to-Water Extract. *Sustainability*, 1–11. <https://doi.org/10.3390/su13063395>
- jatimhariini.co.id. (2023). *Tingkatkan kualitas air Kali Asem Lumajang, Dinas PUTR gagasan Bersih Kaliku*. Jatim Hari Ini. <https://www.jatimhariini.co.id/jawa-timur/88211060227/tingkatkan-kualitas-air-kali-asem-lumajang-dinas-putr-gagasan-bersih-kaliku> Diakses pada 5 Februari 2025.
- Jung, J., Nam, J., Kim, J., Bae, Y. H., & Kim, H. S. (2020). Estimation of Temperature Recovery Distance and The Influence of Heat Pump Discharge On. *Water*, 12(4): 1–14. <https://doi.org/10.3390/w12040949>
- Kannan, P., Balasubramanian, G., & Karuppannan, S. (2025). Groundwater Quality Beyond Potability: Decoding The Hydrogeochemical Signatures Using Spatial and Statistical Methods in Regions of Dindigul District, Tamil Nadu. *Discover Sustainability*, 6(748). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01344-0>
- Karisallen, J. J., Mohammed, A. A., Tamborski, J. J., Jamieson, R. C., Danieleescu, S., & Kurylyk, B. L. (2022). Present and Future Thermal Regimes of Intertidal Groundwater Springs in A Threatened Coastal Ecosystem. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 4721–4740. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4721-2022>
- Khan, N., Khan, H. H., Siraj, G., & Khan, A. (2025). Temporal Variability in Groundwater–Surface Water Interactions Using Hydraulic and Hydrochemical Observations in A Segment Of Kali Nadi. *Discover Geoscience*, 3(69). <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00173-y>
- Loukika, K. N., Keesara, V. R., Buri, E. S., & Sridhar, V. (2025). Spatiotemporal Variations of Surface and Groundwater Interactions under Climate and Land Use Land Cover Change Scenarios, 6: 1–17. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1516031>
- Nanda, M., Fitri, A., Purba, H., Gultom, K., Sari, K.S., Muthmainah, N., & Ramadhan, F. (2023). Analisis Parameter Fisik dan Kandungan Besi (Fe) pada Sumur Gali dan Sumur Bor di Kelurahan Bantan, Kecamatan Medan Tembung. *Jurnal Kesehatan Tambusai*, 4(3): 2993–2997.
- Purnama, D. I. (2019). Analisis Komponen Utama pada Data Potensi Kecamatan di Kota Palu Sebelum Bencana Gempa Bumi dan Tsunami 28 September 2018. *JMSK*, 16(1), 25–32. <https://doi.org/10.20956/jmsk.v>
- Purnomo, P. & Sutadji, M. P. E. (2022). *Analisis Data Multivariat*. Malang: Universitas Negeri Malang.
- Rosyada, I. A. & Utari, D. T. (2024). Penerapan *Principal Component Analysis* untuk Reduksi Variabel pada Algoritma *K-Means Clustering*. *Jambura Journal of Probability and Statistics*, 5(1): 6–13. <https://doi.org/10.37905/jjps.v5i1.18733>
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation Between Conductivity and Total Dissolved Solid in Various Type of Water: A review. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
- Serimbing, D. (2024). *Statistika Deskriptif*. Bandung: Yrama Widya.
- Sinaga, E. (2023). Penerapan Metode *Least Squares Method* dalam Estimasi Penjualan Produk Elektronik.

- Journal of Computing and Informatics Research*, 2(2), 44–48.
<https://doi.org/10.47065/comforch.v2i2.380>
- Tiri, A., & Lahbari, N. (2017). Assessment of The Quality of Water by Hierarchical Cluster and Variance Analyses of The Koudiat Medouar Watershed. *Applied Water Science*, 4197–4206.
<https://doi.org/10.1007/s13201-014-0261-z>
- Wang, Y., Long, C., Yin, L., Liu, R., Liao, Y., He, G., & Liu, Z. (2024). Factors and Microbial Community Structure in Red. *RSC Advances*, 4482–4491. <https://doi.org/10.1039/d3ra08820k>
- Wijaya, D. T. & Budiman, D. S. (2016). *Penelitian Manajemen*. Yogyakarta: Percetakan Pohon Cahaya.
- Yousif, M., & El-Aassar, A. H. M. (2018). Rock-Water Interaction Processes Based on Geochemical Modeling and Remote Sensing Applications in Hyper-Arid Environment: Cases From The Southeastern Region Of. *Bulletin of The National Research*, 42(4): 1-23.
<https://doi.org/10.1186/s42269-018-0004-7>
- Yuniar, F. R., Siswoyo, H. & Irawan, D. E. (2022). Identifikasi pola aliran air tanah di wilayah sekitar aliran Sungai Jilu. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*, 5(1): 1–8. <https://doi.org/10.24246/juses.v5i1p1-8>