

Analisis Dampak Aktivitas Antropogenik Terhadap Kualitas Air Sungai Bawah Tanah Seropan, Kawasan Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul

Tjahyo Nugroho Adji^{1,2}, Ahmad Cahyadi^{1,2*}, Gifari Shadad Ramadhan³, Eko Haryono^{1,2}, Setyawan Purnama², Naufal Fattah Tastian¹, Rasyiida Acitya¹, Rakhmat Dwi Putra³

¹Departemen Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Jalan Kaliurang Km 4,5, Bulaksumur, Depok, Sleman, D.I.Yogyakarta 55281

²Kelompok Studi Karst, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Jalan Kaliurang Km 4,5, Bulaksumur, Depok, Sleman, D.I.Yogyakarta 55281

³Magister Pengelolaan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Jalan Kaliurang Km 4,5, Bulaksumur, Depok, Sleman, D.I.Yogyakarta 55281

*E-mail: ahmad.cahyadi@ugm.ac.id

Received: 19 09 2022 / Accepted: 19 01 2023/ Published online: 26 01 2023

ABSTRAK

Sungai Bawah Tanah Seropan memiliki peranan yang sangat penting dalam penyediaan air baku di Kabupaten Gunungkidul, sehingga kondisinya dari sisi kualitas dan kuantitas sangat penting untuk dijaga. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak aktivitas antropogenik terhadap kualitas Sungai Bawah Tanah Seropan. Pengambilan sampel airtanah dilakukan setiap dua minggu selama Bulan Februari sampai dengan Juni 2022. Analisis hidrogeokimia yang dilakukan meliputi analisis kimia, fisika dan biologi dengan berfokus pada beberapa parameter yang mengindikasikan terjadinya pencemaran oleh aktivitas antropogenik seperti Nitrat (NO_3^-), Fosfat (PO_4^{3-}), Klorida (Cl^-), Sulfat (SO_4^-) dan Koliform Total. Analisis yang dilakukan meliputi analisis *matching* dengan baku mutu kualitas air, analisis ion dominan dan proses dominan dengan diagram Schoeller dan Trilinear, serta analisis perbandingan ion untuk melihat indikasi dampak aktivitas antropogenik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun hanya dua parameter yang melebihi baku mutu (Fosfat dan Koliform Total), tetapi nilai Klorida yang melebihi Natrium pada 3 sampel, korelasi Sulfat yang rendah dibandingkan dengan Anion yang lain serta tingginya kandungan Nitrat dibandingkan Klorida menunjukkan adanya indikasi dampak dari aktivitas antropogenik. Aktivitas antropogenik yang berdampak pada kualitas air Sungai Bawah Tanah Seropan adalah pembuangan *black water* (tinja) dan pupuk pada aktivitas pertanian.

Kata Kunci: Aktivitas Antropogenik, Kualitas Air, Sungai Bawah Tanah, Karst

ABSTRACT

The Seropan Underground River has a very important role in the supply of clean water in Gunungkidul Regency, so its condition in terms of quality and quantity is very important to be maintained. The study aims to analysis of the impact of anthropogenic activities on the quality of the Seropan Underground River. Groundwater sampling is carried out every two weeks during February to June 2022. Hydrogeochemical analysis includes chemical, physical and biological analysis by focusing on several parameters that indicate pollution by anthropogenic activities such as Nitrate (NO_3^-), Phosphate (PO_4^{3-}), Chloride (Cl^-), Sulfate (SO_4^-) and Total Coliform. The analysis includes matching analysis with water quality standards, dominant ion analysis and dominant process with Schoeller diagrams and piper diagrams, as well as ion comparison analysis to see indications of the impact of anthropogenic activities. The results of the reserach show that although only two parameters exceed the quality standard (phosphate

and total coliform), but the value of chloride that exceeds Sodium in 3 samples, the low correlation of Sulfate compared to other anions and the high content of nitrate compared to chloride indicate an indication of the impact of the anthropogenic activities. Based on the results of the analysis, anthropogenic activities that have an impact on the water quality of the Seropan Underground River are the disposal of black water (feces) and fertilizers in agricultural activities.

Keywords: Anthropogenic Activities, Water Quality, Underground River, Karst

PENDAHULUAN

Salah satu tantangan terbesar di abad ini adalah pemenuhan kebutuhan air bersih (Kraiem et al, 2014; Wang et al, 2020). Tantangan ini semakin berat dengan semakin banyaknya jumlah penduduk yang semakin memusat di suatu wilayah yang relatif sempit (perkotaan), aktivitas manusia yang semakin beragam, serta perubahan iklim yang menyebabkan imbuhan air sungai atau airtanah menjadi semakin sedikit dan tidak menentu (de Fraiture & Wichelns, 2008; Alexakis & Tskiris, 2010). Peningkatan produktivitas pangan dan keperluan industri yang semakin bertambah serta pencemaran sumberdaya air juga menjadi salah satu faktor penyebab tantangan pemenuhan kebutuhan air menjadi semakin berat.

Sidang umum Perserikatan Bangsa-bangsa (PBB) di Bulan September 2015 menetapkan Agenda 2030 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) atau lebih dikenal dengan istilah *Sustainable Development Goals* (SDGs). Salah satu tujuan yang akan dicapai dalam pilar pembangunan lingkungan adalah pemenuhan kebutuhan air bersih dan sanitasi yang layak (Tujuan 6). Hal ini menunjukkan betapa pentingnya persoalan terkait dengan pemenuhan air bersih ini, tidak saja sebagai masalah bagi satu atau dua negara saja, tetapi telah menjadi permasalahan di tingkat dunia.

Salah satu kawasan yang memiliki peranan yang besar dalam penyediaan air bersih di seluruh dunia adalah akuifer di kawasan karst. Kawasan karst diperkirakan berkontribusi terhadap pemenuhan kebutuhan air bersih bagi

seperempat penduduk di dunia, meskipun luasannya diperkirakan hanya 10-15% dari luasan total daratan di permukaan Bumi (Ford & Williams, 2007; Chen et al., 2017). Kondisi ini juga dapat dilihat di beberapa wilayah di Indonesia di mana banyak sumber air bersih yang berasal dari mataair atau sungai bawah tanah kawasan karst.

Meskipun kawasan karst memiliki potensi airtanah yang besar, di sisi yang lain kawasan karst memiliki karakteristik akuifer yang paling rentan terhadap pencemaran dibandingkan dengan akuifer non-karst (Williams, 1993; Parise & Pascali, 2003; Wang et al., 2020). Perkembangan atau pelebaran retakan, bidang perlapisan dan lorong konduit akibat proses pelarutan yang berlangsung intensif menyebabkan bahan pencemar dapat masuk dengan cepat ke dalam sistem akuifer kawasan karst (Goldscheider & Drew, 2007). Lorong pelarutan seperti *sinkhole*, *ponor/ swallet*, dan jendela karst (*karst window*) adalah lorong berukuran besar yang menjadi jalan masuknya bahan pencemar dengan sangat cepat tanpa proses penyaringan secara alamiah (Prohic, 1989; Ford, 1993; Ford & Williams, 2007).

Airtanah di suatu akuifer termasuk akuifer karst dianggap memiliki kerentanan terhadap pencemaran yang lebih rendah dibandingkan dengan air permukaan seperti sungai dan danau. Meskipun demikian, pada kenyataannya banyak kasus pencemaran telah terjadi pada airtanah yang menyebabkan tidak layak digunakan sebagai sumber air bersih (Helena et al., 2000; Cabeza et al.,

2012; Lopez *et al.*, 2015; Moreau *et al.*, 2019). Selain itu, pencemaran yang terjadi pada airtanah di kawasan karst ternyata membutuhkan penanganan yang lebih sulit dan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk memulihkannya (Parise *et al.*, 2004).

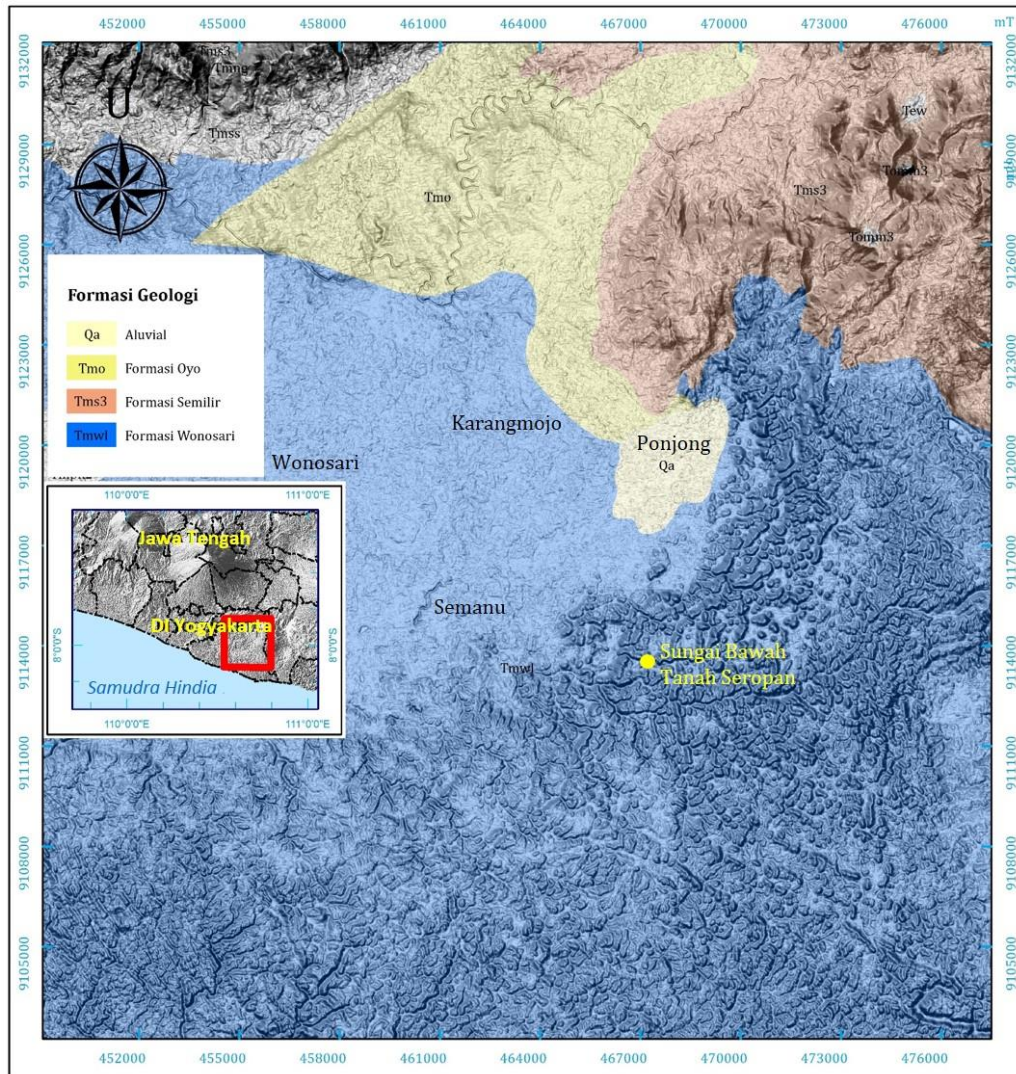
Aktivitas antropogenik adalah salah satu penyebab terjadinya pencemaran airtanah di kawasan karst (Jiang *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2012; Rebreski *et al.*, 2022). Helena *et al.* (2000) menyebutkan bahwa aktivitas antropogenik yang berpotensi menyebabkan terjadinya pencemaran meliputi kegiatan pertanian, industri, pembangunan perkotaan, pertambangan, budidaya perairan atau perikanan dan aktivitas eksploitasi sumberdaya air. Meskipun demikian, kawasan karst khususnya di negara berkembang umumnya memiliki masalah pencemaran yang terkait dengan aktivitas pertanian karena kegiatan tersebut masih menjadi aktivitas utama (Parise *et al.*, 2004; Kalvāns *et al.*, 2021). Pencemaran oleh aktivitas antropogenik ini harus mendapatkan perhatian yang sangat serius dalam akuifer karst selain karena menurunkan kemanfaatan sumberdaya air (hanya layak untuk peruntukan tertentu saja), juga karena menyebabkan beberapa risiko terkait penyakit, hilangnya keanekaragaman hayati pada lingkungan serta dapat menyebabkan terjadinya kematian (Wang *et al.*, 2020). Oleh karenanya, kajian tentang pencemaran akibat aktivitas antropogenik menjadi sangat penting dilakukan, khususnya pada sumber air yang digunakan untuk pemenuhan kebutuhan air bersih.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan menganalisis dampak aktivitas antropogenik terhadap kualitas air di Sungai Bawah Seropan yang menjadi salah satu sumber air bersih terbesar di Kabupaten Gunungkidul. Sungai Bawah Tanah Seropan merupakan sumber air

terbesar bagi Perusahaan Air Minum Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Handayani yang melayani kawasan karst Gunungsewu dan sekitarnya. Kapasitas debit yang dimanfaatkan sampai tahun 2019 adalah sebesar 190 liter/detik dan saat ini terus ditambah kapasitasnya sampai menjadi optimal (380 liter/detik) (PDAM Tirta Handayani, 2019). Di sisi yang lain, beberapa indikasi terjadinya pencemaran air di Kawasan Karst di Gunungsewu juga telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya (Cahyadi dkk., 2013; Adji & Sudarmadji., 2008; Widyastuti dkk., 2019) meskipun hanya berasal dari pengambilan sampel air sesaat (satu waktu), sehingga kajian terkait dengan pencemaran oleh aktivitas antropogenik menjadi sangat penting untuk dilakukan.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian berada di Sungai Bawah Tanah Seropan, yang secara administratif terletak di Dusun Ketonggo, Desa Gombang, Kecamatan Ponjong, Kabupaten Gunungkidul. Secara astronomis, lokasi penelitian terletak di Zona UTM 49L 0465025; 9113946. Wilayah ini menempati bagian dari Kawasan Karst Gunungsewu yang tersusun atas batuan gamping Formasi Wonosari (Gambar 1). Lokasi ini menurut Haryono dkk. (2017) dan Cahyadi (2020) merupakan bagian dari Subsistem Hidrogeologi Wonosari-Bribin-Seropan yang merupakan salah satu subsistem hidrogeologi di Kawasan Karst Gunungsewu yang dicirikan dengan keberadaan sungai bawah tanah yang besar dengan arah aliran utamanya menuju ke arah selatan dan barat laut. Sungai Bawah Tanah Seropan merupakan sungai bawah tanah yang alirannya mengalir sepanjang tahun dengan debit minimum sebesar 810 liter/detik dan debit maksimum sebesar 979,5 liter/detik (Adji & Misqi, 2010; Adji dkk., 2014).



Gambar 1. Peta Lokasi Sungai Bawah Tanah Seropan
(Sumber: Demnas, Badan Informasi Geospasial dan Peta Geologi, Badan Geologi)

Identifikasi dampak aktivitas antropogenik pada aliran Sungai Bawah Tanah Seropan didasarkan pada analisis parameter kimia, fisika dan biologis dari sampel air yang diambil secara temporal dengan interval dua minggu. Interval ini menurut Currens (1999) dan Field (2021) merupakan waktu yang cukup baik dan efisien untuk menggambarkan kondisi hidrokimia termasuk pencemaran di kawasan karst yang telah berkembang aliran konduktivitasnya seperti yang dijumpai di Sungai Bawah Tanah Seropan. Pengambilan sampel dilakukan dari Awal Januari 2022 sampai dengan Akhir Mei 2022.

Parameter yang digunakan sebagai penciri dampak aktivitas antropogenik pada aliran Sungai Bawah Tanah Seropan meliputi Nitrat (NO_3^-), Fosfat (PO_4^{3-}), Klorida (Cl^-), Sulfat (SO_4^{2-}) dan Koliform Total (*Total Coliform*). Selain itu, dianalisis juga parameter ion mayor sebagai penguat analisis untuk mengidentifikasi dampak dari aktivitas antropogenik. Ion mayor yang dianalisis terdiri dari Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Magnesium (Mg^{2+}), Kalsium (Ca^{2+}), Klorida, Bikarbonat (HCO_3^-) dan Sulfat (SO_4^{2-}). Beberapa parameter diukur dan dianalisis di lapangan seperti derajat keasaman (pH), Daya Hantar Listrik

(DHL), *Total Dissolved Solid* (TDS), dan bikarbonat (HCO_3^-) yang dianalisis langsung di lapangan dengan titrasi menggunakan *alkalinity test kit*.

Analisis data pertama yang dilakukan adalah analisis baku mutu berdasarkan pada Peraturan Pemerintah (PP) Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Baku mutu yang digunakan termuat di dalam Lampiran VI tentang Baku Mutu Air Nasional. Peraturan ini adalah peraturan terbaru yang mengubah dan mencabut beberapa peraturan sebelumnya. Beberapa aturan yang dicabut dan diubah meliputi PP No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, PP No. 19 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran, PP No. 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, PP No. 27 Tahun 2012 tentang Izin Lingkungan, PP No. 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Berbahaya dan Beracun, dan/atau Perusakan Laut dan PP No. 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan. Beberapa parameter yang tidak diatur PP No. 22 Tahun 2021, kemudian dianalisis berdasarkan baku

mutu yang digunakan secara internasional menurut Todd & Mays (2005).

Analisis unsur utama pada sampel air dilakukan dengan diagram Schoeller. Analisis ini digunakan untuk menganalisis anion dan kation yang dominan pada sampel. Dampak aktivitas antropogenik dapat terlihat apabila nilai ion sulfat cukup dominan dalam diagram ini (Ren and Zhang, 2020). Analisis fasies hidrogeokimia berdasarkan ion mayor utama juga dianalisis berdasarkan pada diagram piper segitiga (diagram trilinear) yang dimodifikasi oleh Back & Hanshaw (1965). Diagram trilinear juga digunakan untuk analisis proses hidrogeokimia utama yang terjadi. Hal ini didasarkan pada diagram trilinear yang dimodifikasi oleh Hodgson (2004).

Terakhir, identifikasi dampak aktivitas antropogenik dalam penelitian ini dianalisis berdasarkan perbandingan ion dengan *Scatter Plot Diagram*. Analisis ini akan sangat spesifik mendefinisikan sumber dari ion tertentu, sehingga diketahui proses yang terjadi termasuk input dari aktivitas antropogenik. Secara lebih detail perbandingan ion yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Hasil Analisis Hidrogeokimia dengan *Scatter Plot Diagram*

Parameter	Nilai < dari 1:1
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ dibandingkan $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-$	Jika nilainya mendekati 1:1 maka proses utama berasal dari pelarutan karbonat (kalsium dan dolomit)
Na^+ dibandingkan HCO_3^-	Jika nilainya mendekati 1:1 maka proses utama berasal dari pelarutan silikat
$\text{Cl}^- - \text{SO}_4^-$ dibandingkan Na^+	Jika nilainya mendekati 1:1 maka proses utama berasal dari pelarutan sodium/natrium sulfat dan halit
Na^+ dibandingkan Cl^-	Nilai < 1:1 = input polutan dari antropogenik > 1:1 = Pelapukan silika atau terjadi pertukaran kation
Total Anion – SO_4^- dibandingkan SO_4^-	Jika korelasinya tidak besar (>0.60), maka penambahan SO_4^- berasal dari sumber lain selain dari proses hidrogeokimia utama dalam airtanah dan kemungkinan besar berasal dari antropogenik
NO_3^- dibandingkan dengan Cl^-	Jika nilainya 8:1 sampai dengan 1:1, maka nitrat berasal dari pencemaran aktivitas antropogenik (tinja)

Sumber: Diringkas dari Putra (2010), Fathmawati *et al.* (2018) dan Hoaghia *et al.* (2021)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis dari Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran lapangan dan analisis laboratorium untuk parameter pH, DHL, TDS, Kekeruhan dan Koliform Total. Tabel 2 menunjukkan bahwa dari lima parameter tersebut, hanya parameter Koliform Total yang melebihi baku mutu. Johnson *et al.* (2011) menyebutkan bahwa tingginya Koliform Total di dalam aliran air pada akuifer karst merupakan indikator yang mencerminkan pencemaran yang berasal dari tinja manusia, meskipun secara alamiah koliform sudah terdapat di dalam tanah. Namun demikian, nilai yang sangat tinggi dari koliform total merupakan indikasi yang kuat terjadinya pencemaran yang berasal dari tinja (Wang *et al.*, 2020). Nayono *et al.* (2011) dan Cahyadi dkk. (2013) menyebutkan bahwa tingginya pencemaran yang berasal dari tinja atau air hitam (*black water*) di Kawasan Karst Gunungsewu terjadi karena pengelolaan yang masih kurang baik, terutama terkait dengan konstruksi tangki septik (*septic tank*) yang belum dapat mengolah limbah *black water* serta masih

memungkinkannya adanya kebocoran dan masuk ke sistem akuifer karst.

Nilai pH di lokasi kajian menunjukkan nilai 7,0 – 7,5. Hal ini menurut klasifikasi yang disusun oleh Sen (2015) masuk dalam kategori netral meskipun berada di atas rerata normal yakni 7,0. Kondisi ini umum dijumpai di kawasan karst yang memiliki nilai pH yang cenderung basa. Nilai DHL dan TDS tidak melebihi baku mutu, dan menurut Younger (2007) serta Sen (2015) keduanya masuk dalam kategori airtanah tawar yang layak digunakan sebagai air baku untuk air minum. Meskipun demikian, nilai DHL dan TDS untuk airtanah yang tidak dipengaruhi oleh air laut dan air fosil masuk dalam kategori yang cukup tinggi. Nilai tersebut menunjukkan kandungan ion yang terkandung di dalamnya cukup tinggi. Nilai kekeruhan yang ditampilkan dalam Tabel 2 menunjukkan rendahnya nilai kekeruhan dalam aliran air selama pengambilan sampel, sehingga nilainya berada masih memenuhi baku mutu.

Tabel 2. Hasil Analisis pH, DHL, TDS dan Total Koliform di Lokasi Kajian

No	Tanggal	pH	DHL (μ mhos/cm)	TDS (ppm)	Kekeruhan (NTU)	Koliform Total
1	02/1/2022	7,0	512	364	1	23
2	16/1/2022	7,1	512	363	1	23
3	01/2/2022	7,2	543	388	1	1.600
4	13/2/2022	7,2	550	392	1	49
5	27/2/2022	7,3	543	385	3	24.000
6	13/3/2022	7,3	539	383	5	16.000
7	27/3/2022	7,3	545	284	1	240
8	10/4/2022	7,2	553	393	2	540
9	24/4/2022	7,5	561	394	2	24.000
10	08/5/2022	7,1	526	373	20	54.000
11	22/5/2022	7,2	558	393	6	5.400
	Permenkes (2021)	6 - 9	-	1000	-	-
	Todd and Mays (2005)	-	1000	-	25	0

Sumber: Hasil Pengukuran Lapangan dan Analisis Laboratorium (2022)

Keterangan: Angka yang Dicetak Tebal Melebihi Baku Mutu

Tabel 3 menyajikan hasil pengukuran lapangan (Bikarbonat) dan hasil analisis laboratorium untuk unsur mayor dan unsur minor. Tabel 3 menunjukkan bahwa parameter yang melebihi baku mutu hanya Fosfat. Meskipun demikian, nilai parameter seperti Kalsium dan Nitrat sudah mendekati baku mutu yang dipersyaratkan. Nilai Fosfat dalam airtanah di lokasi kajian yang tinggi dapat berasal dari pupuk kimia yang digunakan dalam pertanian, kotoran manusia dan hewan (yang paling banyak pada wilayah yang didominasi oleh lahan pertanian berasal dari penggunaan pupuk hewan yang berasal dari kotoran hewan), serta dari sabun cuci dan mandi (Effendi, 2003; Wakida & Lerner, 2006). Hasil tersebut menunjukkan adalah indikasi dampak

aktivitas antropogenik pada kualitas air di Sungai Bawah Tanah Seropan.

Diagram Schoeller yang disajikan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa unsur mayor dominan yang terkandung dalam airtanah di lokasi kajian adalah Kalsium dan Bikarbonat. Hal ini tidak mengejutkan mengingat akuifer karst di lokasi kajian disusun atas batugamping Formasi Wonosari. Diagram ini juga menunjukkan bahwa dengan dominannya dua unsur tersebut, dampak dari aktivitas antropogenik tidak nampak begitu besar, seperti dapat dilihat dari nilai Klorida dan Sulfat yang relatif kecil (Jiang *et al.*, 2008; Ren & Zhang, 2020). Meskipun demikian, hal ini bukan berarti bahwa tidak ada dampak aktivitas antropogenik dalam airtanah di lokasi kajian.

Tabel 3. Hasil Analisis Unsur Mayor dan Minor Sungai Bawah Tanah Seropan

No	Tanggal	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
		dalam satuan mg/l								
1	2/1/2022	86,33	18,07	6,68	6,68	5,00	162,90	6,00	9,22	0,555
2	16/1/2022	99,20	10,21	2,75	2,75	5,00	319,40	5,00	9,50	0,189
3	1/2/2022	94,40	15,55	6,75	6,75	5,00	303,50	6,00	8,88	0,117
4	13/2/2022	98,49	11,24	7,06	7,06	4,00	325,70	5,00	9,73	0,340
5	27/2/2022	93,13	4,84	3,38	3,38	14,50	242,70	9,00	9,59	0,349
6	13/3/2022	94,72	10,16	3,34	3,34	4,00	313,00	7,00	8,66	0,142
7	27/3/2022	98,40	5,83	3,86	3,86	5,50	325,70	5,00	9,83	0,040
8	10/4/2022	99,20	11,66	3,75	3,75	5,00	308,00	7,00	9,78	0,101
9	24/4/2022	96,80	7,29	3,95	3,95	5,50	295,60	6,00	9,56	0,132
10	08/5/2022	89,15	3,87	3,57	3,57	4,50	302,00	2,00	9,63	0,659
11	22/5/2022	63,68	8,71	3,37	3,37	6,90	217,40	9,00	2,23	0,218
	Permenkes (2021)					300,00		300,00	10,00	0,200
	Todd and Mays (2005)	100,00	50,00	200,00	50,00		500,00			

Sumber: Hasil Pengukuran Lapangan dan Analisis Laboratorium (2022)

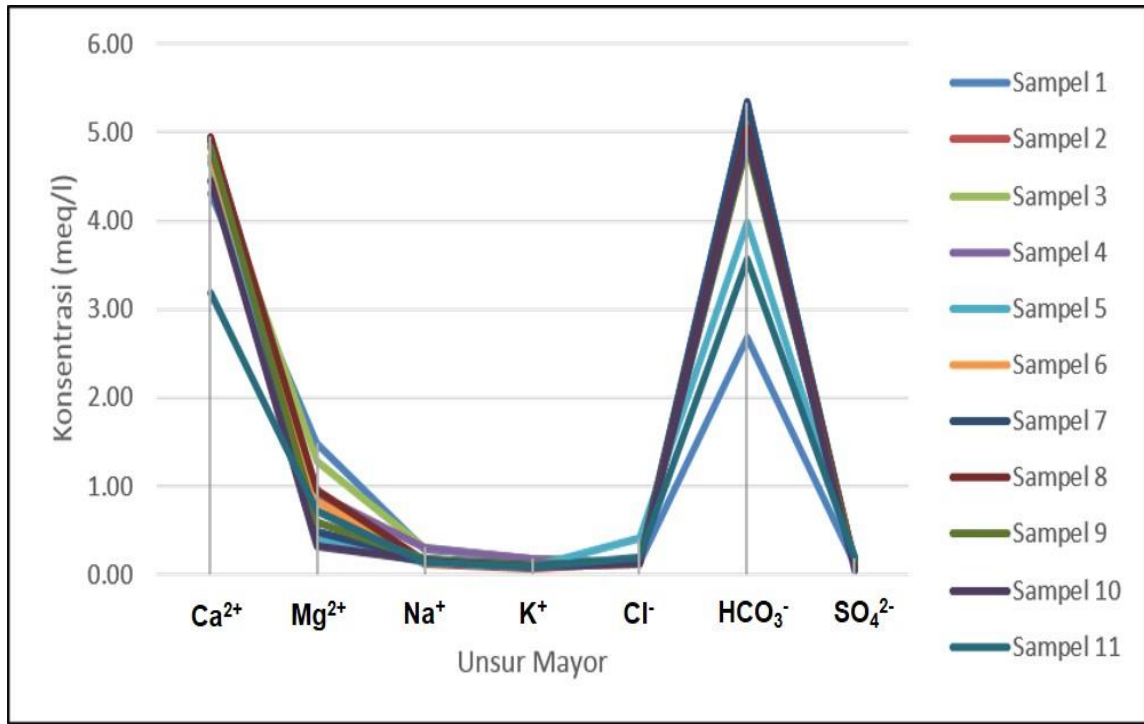
Keterangan: Angka yang Dicitak Tebal Melebihi Baku Mutu

Hasil analisis dengan diagram trilinear (Gambar 3) yang telah dimodifikasi oleh Back & Hanshaw (1965) menunjukkan hidrogeokimia di lokasi kajian masuk dalam tipe Kalsium (tipe A) untuk kation, tipe Bikarbonat (tipe B) untuk anion dan secara keseluruhan termasuk dalam tipe Kalsium + Magnesium (tipe I) serta tipe bikarbonat (tipe J). Diagram trilinear pada penelitian

ini tidak menunjukkan indikasi dampak aktivitas antropogenik (misalnya akan nampak pada tipe F, G, L, N dan P) karena dominannya ion mayor Kalsium, Magnesium dan Bikarbonat. Jumlah Kalsium dan Magnesium dalam sampel yang dianalisis berkisar antara 92,29% sampai dengan 96,82% dari total kation pada unsur mayor, dengan rata-rata sebesar 94,72%. Kondisi yang hampir

sama terjadi pada kandungan Bikarbonat pada sampel yang dianalisis, yakni antara 86,96% sampai dengan 96,71% dari total

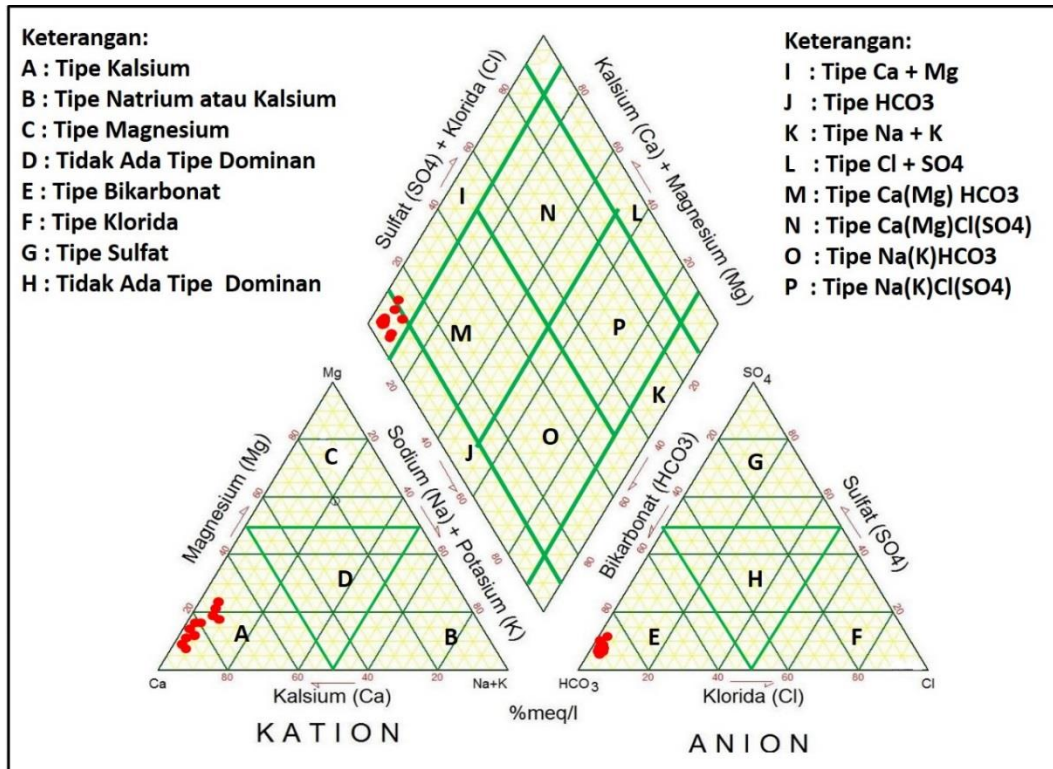
anion pada unsur mayor, dengan rata-rata sebesar 93,75%.



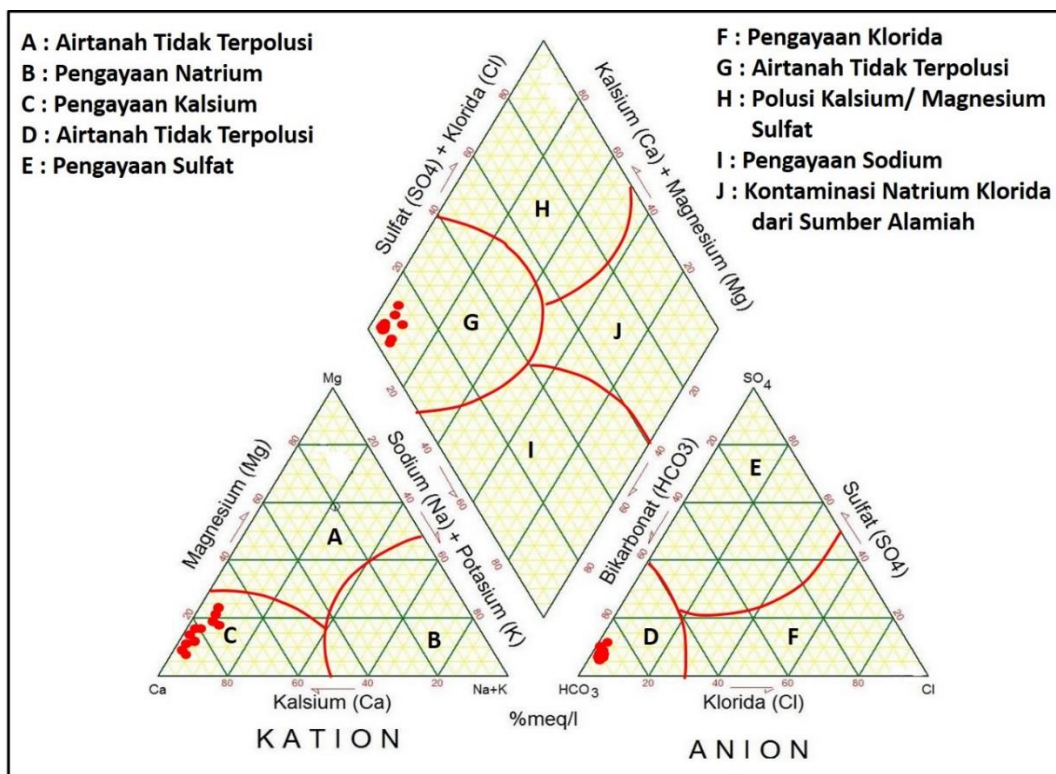
Gambar 2. Diagram Schoeller yang Menunjukkan Ion Major Dominan di Sungai Bawah Tanah Seropan

Hasil analisis dengan diagram trilinear (Gambar 4) yang telah dimodifikasi oleh Hodgson (2004) menunjukkan bahwa sampel yang diambil memiliki karakteristik sebagai airtanah yang tidak terpolusi dan mengalami pengayaan Kalsium. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses dominan yang terjadi di lokasi kajian terkait dengan pelarutan batugamping yang menyusun akuifer di lokasi kajian. Meskipun demikian, hal ini tidak selalu berarti bahwa tidak terjadi pencemaran oleh aktivitas antropogenik, karena persentase yang kecil dalam unsur mayor

menyebabkan kenaikan unsur penciri aktivitas antropogenik (Klorida dan Sulfat) tidak begitu nampak. Selain itu, metode klasifikasi tipe hidrogeokimia dengan menggunakan diagram trilinear modifikasi Hodgson (2004) memiliki kelemahan yang hanya dapat menganalisis pencemaran yang terjadi dengan penambahan unsur mayor, sehingga tidak dapat mendeteksi pencemaran yang terjadi oleh penambahan unsur minor (Cahyadi *et al.*, 2018; Cahyadi *et al.*, 2021a; Cahyadi *et al.*, 2021b).



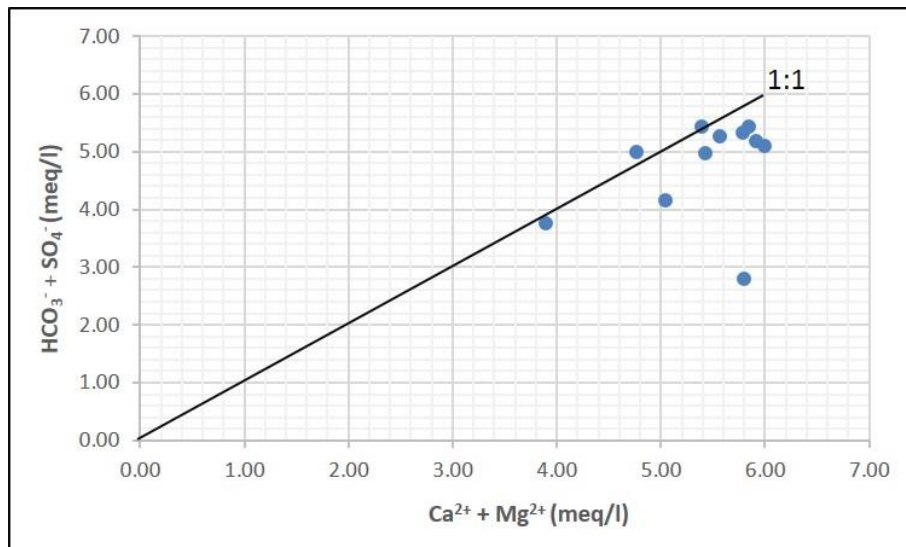
Gambar 3. Diagram Trilinear yang Menunjukkan Fasies (Tipe) Hidrogeokimia di Sungai Bawah Tanah Seropan



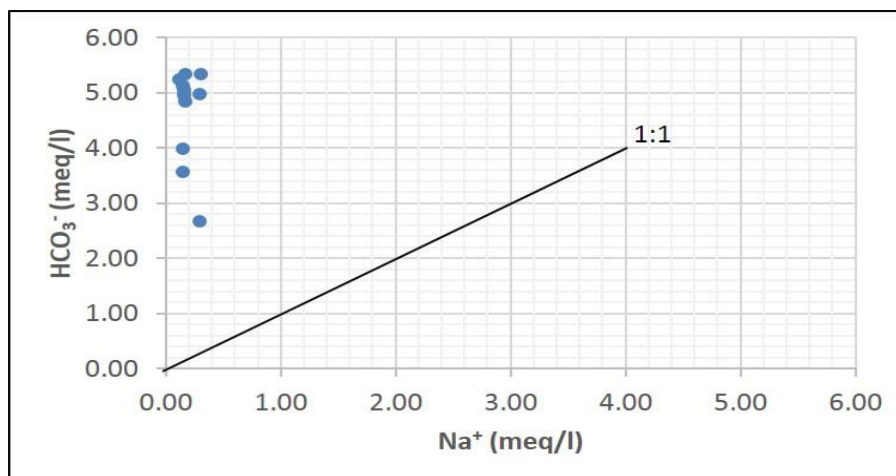
Gambar 4. Diagram Trilinear yang Menunjukkan Proses Dominan yang Terjadi di Sungai Bawah Tanah Seropan

Besarnya pengaruh dari proses pelarutan batugamping juga ditunjukkan oleh *scatter plot* parameter $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ dibandingkan $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-$ (Gambar 5). Hasil pengeplotan data menunjukkan bahwa hampir semua sampel memiliki nilai mendekati 1:1 (10 sampel dari 11 sampel) yang berarti bahwa pelarutan batuan karbonat khususnya batugamping menjadi proses utama dalam airtanah di lokasi kajian (Hoaghia *et al.*, 2021). Gambar 6 memberikan penguatan dari hasil sebelumnya di mana hasil pengeplotan sampel pada *scatter plot* parameter Na^+ dibandingkan HCO_3^-

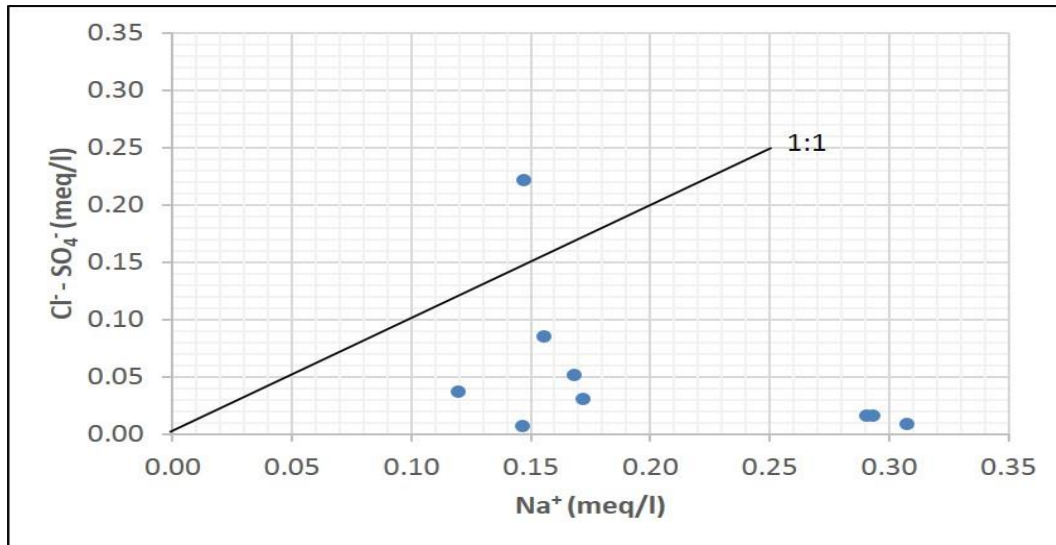
menunjukkan nilai yang tidak mendekati 1:1. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa proses pelarutan silikat bukan menjadi proses utama yang terjadi pada airtanah di lokasi kajian (Yuan *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020). Hasil yang serupa juga ditunjukkan dari hasil pengeplotan parameter $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^-$ dibandingkan Na^+ dari sampel airtanah (Gambar 7). Nilai yang tidak mendekati 1:1 pada Gambar 7 menunjukkan bahwa pelarutan sodium/natrium sulfat dan halit bukan merupakan proses utama dalam airtanah di lokasi kajian (Hoaghia *et al.*, 2021).



Gambar 5. *Scatter Plot* Parameter $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ dibandingkan $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-$ di Lokasi Kajian



Gambar 6. *Scatter Plot* Parameter Na^+ dibandingkan HCO_3^- di Lokasi Kajian



Gambar 7. Scatter Plot Parameter Cl⁻ - SO₄²⁻ dibandingkan Na⁺ di Lokasi Kajian

Scatter Plot parameter Na⁺ dibandingkan Cl⁻ (Gambar 8) menunjukkan bahwa nilainya dominan mendekati 1:1. Hanya satu sampel yang menunjukkan adanya pengaruh aktivitas antropogenik dan 3 sampel terindikasi terpengaruh pertukaran kation. Indikasi pengaruh aktivitas antropogenik nampak pada sampel yang diambil pada 27 Februari 2022, ditandai dengan lonjakan nilai klorida yang cukup tinggi. Nilai kandungan Klorida pada tanggal tersebut mencapai 14,5 mg/l, sedangkan pada sampel yang lain hanya berkisar antara 4,0 mg/l sampai dengan 6,9 mg/l dengan rata-rata sebesar 5,9 mg/l. Chen *et al.* (2002) menyampaikan bahwa keberadaan Klorida di dalam airtanah yang tidak terpengaruh oleh intrusi air laut atau airtanah fosil bersumber dari tinja, kotoran hewan, pupuk, sabun cuci dan pemutih pakaian. Keseluruhannya mengindikasikan adanya pengaruh aktivitas antropogenik yang mencemari airtanah (Sen, 2015).

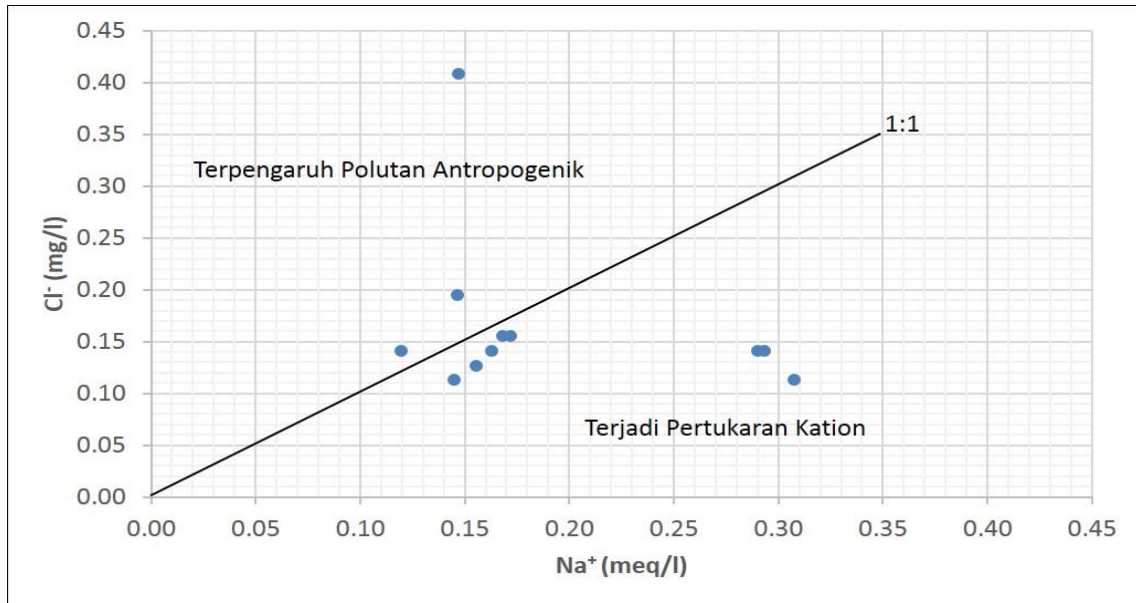
Gambar 9 menunjukkan korelasi yang rendah antara total anion - SO₄²⁻ dengan SO₄²⁻. Hal ini menunjukkan bahwa Sulfat dalam airtanah di lokasi kajian tidak terkait dengan proses utama yang terjadi di dalam airtanah. Sumber dari kandungan sulfat diindikasikan berasal

dari pencemaran yang berasal dari aktivitas antropogenik. Penambahan dan pengurangan kandungan sulfat bersifat acak dan tidak terkait dengan penambahan anion yang lain. Oleh karenanya, dapat disimpulkan bahwa sulfat berasal dari proses lain di luar proses utama yang terjadi dalam airtanah. Sulfat dalam airtanah dengan akuifer non-vulkanik umumnya berasal dari pupuk pertanian (Valdes *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2008). Jiang *et al.* (2009) juga menambahkan bahwa pupuk kimia yang umum digunakan dalam aktivitas pertanian dan kemungkinan menyebabkan terjadi pencemaran pada airtanah adalah urea (CO(NO₂)₂) sebagai sumber nitrat dan Amonium Sulfat ((NH₄)₂SO₄) sebagai sumber sulfat.

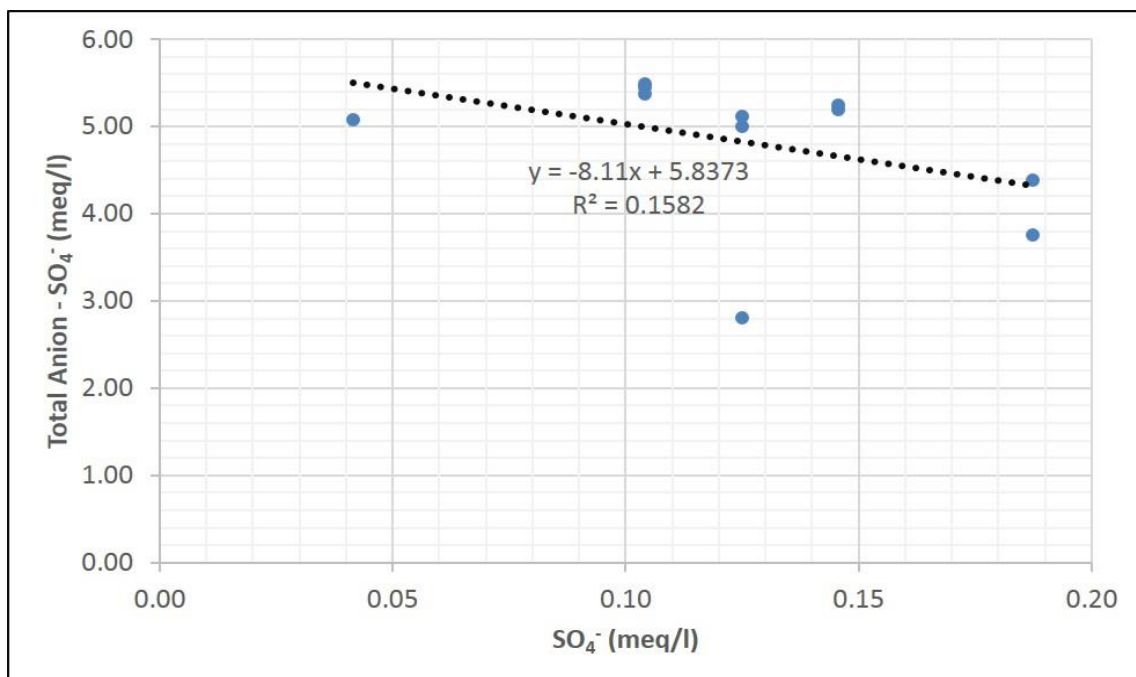
Hasil analisis dari Gambar 9 didukung pula dengan hasil yang disajikan pada Tabel 4. Hasil analisis pada tabel 4 menunjukkan bahwa nilai Nitrat lebih besar dibandingkan dengan Klorida dan memiliki perbandingan antara 11,46 : 1 sampai dengan 86,24 : 1. Nilai tersebut menunjukkan adanya indikasi pencemaran yang disebabkan oleh aktivitas antropogenik. Nilai nitrat yang tidak hanya lebih dari 8 kali lipat kandungan Klorida, menunjukkan bahwa nitrat yang mencemari airtanah bukan

berasal dari tinja (ARGOSS, 2001). Meskipun demikian, Fathmawati *et al.* (2018) menyebutkan bahwa kandungan nitrat sebesar 1 sampai dengan 20 kali lipat kadar Klorida masih mungkin berasal dari tinja jika dampak aktivitas antropogenik (dilihat dari penggunaan lahan permukiman yang dominan misalnya perkotaan) sangat dominan.

Namun demikian, kondisi di lokasi penelitian merupakan perdesaan yang didominasi oleh lahan pertanian. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai Nitrat yang tinggi juga berasal dari aktivitas antropogenik yang berasal dari pertanian (ARGOSS, 2001; Putra, 2010), seperti halnya dengan kandungan sulfat dalam pembahasan sebelumnya.



Gambar 8. Scatter Plot Parameter Na⁺ dibandingkan Cl⁻ di Lokasi Kajian



Gambar 9. Scatter Plot Parameter Total Anion – SO₄⁻ dibandingkan SO₄⁻ di Lokasi Kajian

KESIMPULAN

Parameter yang melebihi baku mutu dalam penelitian ini meliputi Fosfat dan Total Koliform, meskipun beberapa parameter seperti Kalsium dan Nitrat sebenarnya memiliki nilai yang hampir melebihi baku mutu pada beberapa kali pengambilan sampel. Keberadaan Total Koliform pada aliran mengindikasikan pencemaran dari *black water* (buangan dari limbah kegiatan mandi cuci kakus). Hidrogeokimia airtanah di Sungai Bawah Tanah Seropan sangat didominasi oleh proses pelarutan batugamping yang merupakan penyusun akuifer. Hal tersebut nampak pada diagram Schoeller yang menunjukkan unsur yang paling dominan adalah Kalsium dan Bikarbonat, serta ditunjukkan pula pada diagram Trilinear yang menunjukkan tipe hidrogeokimia Kalsium dan Bikarbonat serta proses pengayaan Kalsium yang dominan. Hasil yang sama juga nampak pada analisis perbandingan ion dengan *scatter plot* yang menunjukkan bahwa 10 dari 11 sampel memiliki proses hidrogeokimia utama berupa pelarutan batugamping, serta bukan merupakan hasil pelarutan silikat dan pelarutan sodium atau natrium sulfat atau mineral halit.

Meskipun indikasi pencemaran dari aktivitas antropogenik tidak nampak dalam analisis yang melibatkan keseluruhan unsur mayor (misalnya dengan diagram diagram Schoeller, diagram Trilinear dan analisis perbandingan ion), tetapi analisis dengan menggunakan sebagian ion penciri pencemaran antropogenik ternyata menunjukkan bahwa indikasi pencemaran dari aktivitas antropogenik telah nampak. Meskipun hanya dua parameter yang melebihi baku mutu (Fosfat dan Total Koliform), parameter Sulfat, Klorida dan Nitrat ternyata mengindikasikan adanya dampak dari aktivitas antropogenik. Nilai Klorida yang lebih besar dibandingkan Natrium pada 3 sampel, serta nilai sulfat

yang memiliki korelasi yang sangat rendah dibandingkan dengan anion yang lain, menunjukkan bahwa Klorida dan Sulfat berasal dari aktivitas antropogenik. Hal ini diperkuat dengan nilai perbandingan Nitrat dan Klorida yang menunjukkan tingginya nilai nitrat yang kemungkinan berasal dari aktivitas pertanian (nilai Nitrat lebih dari 8 kali lipat nilai Klorida).

PENGAKUAN

Penelitian ini merupakan bagian dari Hibah Penelitian Klaster Laboratorium Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada Tahun 2022 berdasarkan pada Surat Keputusan Dekan Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada Nomor 56/UN1/FGE/KPT/SETD/2022. Kami juga mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang terkait dengan berlangsungnya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T.N. and Sudarmadji. 2008. Hydrological Properties of Bribin Underground River System (Experience Learned for Seropan River System Project). *Proceedings of Integrated Water Resources Management Seminar*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Adji, T.N. and Misqi, M. 2010. The Distribution of Flood Hydrograph Recession Constant for Characterization of Karst Spring and Underground River Flow Components Releasing Within Gunung Sewu Karst Region. *Indonesian Journal of Geography*, 42(1), 35-46.
- Adji, T.N., Bahtiar, I.Y. dan Fatchurohman, H. 2014. Analisis Hidrograf Aliran untuk Penentuan Derajat Karstifikasi pada Beberapa Kondisi Mataair dan Sungai Bawah Tanah. *Laporan Penelitian*.

- Yogyakarta: Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.
- Alexakis, D. and Tsakiris, G. 2010. Drought Impacts on Karstic Spring Annual Water Potential. Application on Almyros (Heraklion Crete) Brackish Spring. *Desalination and Water Treatment*, 16, 1–9.
- ARGOSS. 2001. *Guidelines for Assessing The Risk to Groundwater from On-site Sanitation*. Nottingham: British Geological Survey. Comissioned Report, CR/01/142, 97pp.
- Back W. and Hanshaw B. 1965. *Chemical Geohydrology. Advanced in Hydrosience*, 2, 49-109.
- Cabeza, Y., Candela, L., Ronen, D. and Teijon, G. 2012. Monitoring The Occurrence of Emerging Contaminants in Treated Wastewater and Groundwater Between 2008 and 2010. The Baix Llobregat (Barcelona, Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 239–240, 32–39.
- Cahyadi, A., Ayuningtyas, E.A.A. dan Prabawa, B.A. 2013. Urgensi Pengelolaan Sanitasi dalam Upaya Konservasi Sumberdaya Air di Kawasan Karst Gunungsewu Kabupaten Gunungkidul. *Indonesian Journal of Conservation*, 2(1), 23-32.
- Cahyadi, A., Fatchurohman, H. and Riyanto, I.A. 2018. Groundwater quality analysis in dry seasons in Panggang Cay, Kepulauan Seribu, Jakarta, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 212(1), 1–8.
- Cahyadi, A. Haryono, E. Adji, T.N. Widyastuti, M. Naufal, M. Ramadhan, F. Agniy, R.F. dan Riyanto, I.A. 2020. Analisis Konektivitas dan Karakteristik Lorong pada Sistem Hidrogeologi Mataair Beton, Kawasan Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul dengan Uji Perunutan. *Jurnal Geografi*, 12(2), 105–114.
- Cahyadi, A., Riyanto, I.A., Adji, T.N., Haryono, E., Widyastuti, M., and Aji, A.P.K. (2021a). Temporal variations in the water quality of beton spring, Gunungsewu karst area, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 896(1).
- Cahyadi, A., Riyanto, I.A., Naufal, M., Haryono, E., Adji, T.N., Widyastuti, M., Muhammad, D.T.N., and Aji, A.P.K. (2021b). Multitemporal Water Quality Analysis of Karst Spring Affected by Allogenic Recharge. *Proceeding of 6th International Conference on Energy, Environment, epidemiology, and Information System*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Chen, J., Wang, F., Xia, X. and Zhang, L. 2002. Major Element of the Changjiang (Tangtze River). *Chemical Geology*, 187, 231-255.
- Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Drew, D., Griger, F., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Richts, A., Stevanovic, Z., Veni, G., and Goldscheider, N. 2017. The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal*, 25(3), 771–785.
- Currens, J.C. 1999. A Sampling Plan for Conduit-flow Karst Spring: Minimizing Sampling Cost and Minimizing Statistical Utility. *Engineering Geology*, 52, 121-128.
- de Fraiture, C. and Wichelns, D. 2008. Satisfying Future Water Demands for Agriculture. *Agricultural Water Management*, 97, 502–511.
- Effendi, H. 2003. *Telaah Kualitas Air bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Yogyakarta: Kanisius.

- Fathmawati, F., Fachiroh, J., Sutomo, A.H. and Putra, D.P. E. 2018. Origin and distribution of nitrate in water well of settlement areas in Yogyakarta, Indonesia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 628, <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6958-y>
- Field, M.S. 2021. Groundwater Sampling in Karst Terranes: Passive Sampling in Comparison to Event-Driven Sampling Strategy. *Hydrogeology Journal*, 29, 53-65.
- Ford, D.C. 1993. Environmental Change in Karst Areas. *Environmental Geology* 21 (3), 107–109.
- Ford, D. and Williams, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. New York: John Wiley and Sons, Ltd.
- Goldscheider, N. and Drew, D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. Leiden: Taylor and Francis Group.
- Haryono, E.; Barianto, D. dan Cahyadi, A. 2017. *Hidrogeologi Kawasan Karst Gunungsewu: Panduan Filedtrip Pekan Ilmiah Tahunan Perhimpunan Ahli Airtanah Indonesia*. Yogyakarta: Perhimpunan Ahli Airtanah Indonesia.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M., and Fernandez, L. 2000. Temporal Evolution of Groundwater Composition in an Alluvial (Pisuerga River, Spain) by Principal Component Analysis. *Water Research* 34, 807–816.
- Hoaghia, M. A., Moldovan, A., Kovacs, E., Mirea, I.C., Kenesz, M., Brad, T., Cadar, O., Micle, V., Levei, E.A., and Moldovan, O.T. (2021). Water quality and hydrogeochemical characteristics of some karst water sources in apuseni mountains, romania. *Water (Switzerland)*, 13(6), <https://doi.org/10.3390/w13060857>
- Hodgson, F.D.I. 2004. Processing and Presentation of Data. in Kovalevsky, V.S., Kruseman, G.P. and Rushton, K.R. 2004. *An International Guide for Hydrogeological Investigations*. Paris: UNESCO.
- Jiang, Y., Yuan, D., Zhang, C., Zhang, G., and He, R., 2008. Impact of Land Use Change on Groundwater Quality in A Typical Karst Watershed of Southwest China. *Hydrogeology Journal*, 16(4), 727–735.
- Jiang, Y., Wu, Y., Groves, C., Yuan, D., and Kambesis, P. 2009. Natural and Anthropogenic Factors Affecting The Groundwater Quality in The Nandong Karst Underground River System in Yunan, China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 109, 46-61.
- Johnson, T.B., McKay, L.D., Layton, A.C., Jones, S.W., Johnson, G.C., Cashdollar, J.L., Dahling, D.R., Villegas, L.F., Fout, G.S., Williams, D.E. and Sayler, G. 2011. Viruses and bacteria in karst and fractured rock aquifers in East Tennessee, USA. *Ground Water*, 49, 98–110.
- Kalvāns, A., Popovs, K., Priede, A., Koit, O., Retike, I., Bikše, J., Dēlina, A. and Babre, A. 2021. Nitrate Vulnerability of Karst Aquifers and Associated Groundwater-Dependent Ecosystems in the Baltic Region. *Environmental Earth Sciences*, 80, 628, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09918-7>
- Kraiem, Z., Zouari, K., Chkir, N., Agoune, A. 2014. Geochemical characteristics of arid shallow aquifers in Chott Djerid, southwestern Tunisia. *Journal of Hydro-environment Research*, 8, 460–473.

- Lopez, B., Ollivier, P., Togola, A., Baran, N., and Ghestem, J.P. 2015. Screening of French Groundwater for Regulated and Emerging Contaminants. *Science of the Total Environment*, 518–519, 562–573.
- Moreau, M., Hadfield, J., Hughey, J., Sanders, F., Lapworth, D.J., White, D., and Civil, W. 2019. A Baseline Assessment of Emerging Organic Contaminants in New Zealand Groundwater. *Science of the Total Environment*, 686, 425–439.
- Nayono, S., Lehn, H., Kopfmüller, J. and Londong, J. 2011. Options for Decentralized Waste Water Treatment in Rural Karst Area in Gunungkidul: Social Acceptance. *Proceeding of Asian Trans-Disciplinary Karst Conference 2011*. Yogyakarta: Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.
- Parise, M. and Pascali, V. 2003. Surface and Subsurface Environmental Degradation in The Karst of Apulia (Southern Italy). *Environmental Geology*, 44, 247–256.
- Parise, M., Qiriazhi, P. and Sala, S. 2004. Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas of Albania. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 569-581.
- PDAM Tirta Handayani. 2019. *Laporan Pelayanan Air Bersih 2015-2019*. Wonosari: PDAM Tirta Handayani Gunungkidul.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup: Lampiran VI tentang Baku Mutu Air Nasional.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2012 tentang Izin Lingkungan.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Berbahaya dan Beracun dan/atau Perusakan Laut.
- Prohic, E., 1989. Pollution Assessment in Carbonate Terrains. In Lamoreaux, P.E. 1989. *Hydrology of Limestone Terrains: Annotated Bibliography of Carbonate Rock: International Contributions to Hydrogeology*. Hannover: International Association of Hydrogeology.
- Putra, D.P.E. 2010. Estimation, Reality and Trend of Groundwater Nitrate Concentration Under Unsewered Area of Yogyakarta City–Indonesia. *Journal of South East Asian Applied Geology*, 2(1), 20–27.
- Reberski, J.L., Terzić, J., Maurice, L.D. and Lapworth, D.J. 2022. Emerging Organic Contaminants in Karst Groundwater: A Global Level Assessment. *Journal of Hydrology*, 604, 127242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127242>
- Ren, C. and Zhang, Q. 2020. Groundwater Chemical Characteristics and Controlling Factors in a Region of Northern China with Intensive Human Activity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 9126, <https://doi.org/10.3390/ijerph17239126>

- Sen, Z. 2015. *Practical and Applied Hydrogeology*. Amsterdam: Elsevier.
- Taylor, R.G., Scanlon, B., Doll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y. and Treidel, H. 2012. Ground Water and Climate Change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329.
- Todd, D.K. and Mays, L. 2005. *Groundwater Hydrology*. New York: John Wiley and Sons, Ltd.
- Valdes, D., Dupont, J.P., Laignel, B., Ogier, S., Leboulanger, T., and Mahler, B.J. 2007. A Spatial Analysis of Structural Controls on Karst Groundwater Geochemistry at A Regional Scale. *Journal of Hydrology* 340, 244–255.
- Wakida, F.T. and Lerner, D.N. 2006. Potential Nitrate Leaching to Groundwater from House Building. *Hydrological Processes*, 20, 2077–2081.
- Wang, Z., Torres, M., Paudel, P., Hu, L., Yang, G., and Chu, X. 2020. Assessing the Karst Groundwater Quality and Hydrogeochemical Characteristics of a Prominent Dolomite Aquifer in Guizhou, China. *Water*, 12, 2584. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2584>
- Widyastuti, M., Cahyadi, A., Adji, T.N., Purnama, S., Firizqi, F., Naufal, M., Ramadhan, F., Riyanto, I.A., dan Irshabdilah, M.R. 2019. Kualitas Air Sungai-sungai Alogenik di Kawasan Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul pada Musim Kemarau. *Prosiding Seminar Nasional Geografi III*. Yogyakarta: Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.
- Williams, P. W. 1993. Environmental Change and Human Impact on Karst Terrains: An Introduction. In Williams, P.W. (ed). 1993. Karst Terrains: Environmental Changes and Human Impact. *Catena, suppl.* 25, 1–20.
- Younger, P.L. 2007. *Groundwater in the Environment: an Introduction*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Yuan, J., Xu, F., Deng, G., Tank, Y. and Li, P. 2017. Hydrogeochemistry of shallow groundwater in A Karst Aquifer System of Bijie City, Guizhou Province. *Water*, 9, 625. <https://doi.org/10.3390/w9080625>
- Zhang, B., Zhao, D., Zhou, P., Qu, S., Liao, F., and Wang, G. 2020. Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Dominant Water–Rock Interactions in the Delingha Area, Qaidam Basin, Northwest China. *Water*, 12, 836. <https://doi.org/10.3390/w12030836>