

KUALITAS AIR TANAH DI KOTA GORONTALO: INTEGRASI BERBASIS SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS MELALUI KETERKAITAN UNIT GEOMORFOLOGI DAN PARAMETER FISIK-KIMIA AIR TANAH

Siti Suhartini S Napu¹, Wahyu Wilopo^{2*}, Doni Prakasa Eka Putra²

¹Program Studi Magister Teknik Geologi, Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

e-mail : wilopo_w@ugm.ac.id

Abstrak. Penelitian terdahulu terkait kualitas air tanah di Kota Gorontalo, umumnya masih bersifat lokal, deskriptif, tanpa mengaitkannya dengan unit geomorfologi Kota Gorontalo. Oleh karena itu, makalah ini bertujuan untuk mengaitkan karakteristik kualitas air tanah dengan unit geomorfologi menggunakan pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG). Data kualitas air tanah yang digunakan adalah sifat fisik-kimia berupa Total Zat Padat Terlarut/TDS, Daya Hantar Listrik/DHL, warna, bau, rasa dan pH. Data diperoleh dari 63 titik sumur gali, sedangkan unit geomorfologi hasil interpretasi DEMNAS dan observasi lapangan. Semua parameter direklasifikasi berdasarkan standar baku mutu air minum dan digabungkan secara spasial untuk menghasilkan peta kualitas air tanah Kota Gorontalo. Hasil penelitian menunjukkan nilai TDS >300 mg/L dan DHL >750 μ S/cm ditemukan pada satuan perbukitan intrusi, piroklastik, karst, dataran danau, dan pantai. Sebaliknya, nilai TDS dan DHL yang sesuai standar ditemukan pada dataran aluvial dan banjir. Nilai pH >8,5 diidentifikasi pada dataran pantai dan beberapa titik lokal di dataran aluvial. Peta kualitas air tanah menunjukkan gradasi dari zona air tanah layak menuju zona air tanah cukup layak dan zona air tanah tidak layak sejalan dengan perubahan unit geomorfologi. Air tanah dengan kualitas terbaik terkonsentrasi pada unit geomorfologi dataran aluvial dan banjir di bagian utara dan timur Kota Gorontalo, yang termasuk dalam kategori layak. Secara keseluruhan, penelitian kualitas air tanah di Kota Gorontalo dipengaruhi oleh kombinasi kondisi geomorfologi, interaksi air dengan batuan sekitar, serta keterbatasan pengimbuhan lokal. Pendekatan integrasi berbasis SIG ini dapat diterapkan di kota-kota tropis lainnya sebagai dasar perencanaan konservasi zona resapan dan pengendalian pencemaran air tanah.

Kata Kunci: kualitas air tanah; unit geomorfologi; SIG

Abstract. Previous studies on groundwater quality in Gorontalo City have predominantly been local in scope and descriptive in nature, lacking an explicit connection to the geomorphological units of the area. This study aims to establish such a linkage by examining groundwater quality characteristics across geomorphological units using a Geographic Information System (GIS) approach. The groundwater quality data comprise physical-chemical parameters, including Total Dissolved Solids (TDS), Electrical Conductivity (EC), color, odor, taste, and pH. These data were collected from 63 dug wells, while geomorphological units were identified through DEMNAS interpretation and field observations. All parameters were reclassified according to drinking water quality standards and subsequently integrated spatially to produce a groundwater quality map for Gorontalo City. The findings indicate that TDS values exceeding 300 mg/L and EC values above 750 μ S/cm occur within intrusive hill, pyroclastic, karst, lake plain, and coastal units. Conversely, TDS and EC values that meet the standards are present in alluvial and floodplain units. pH values greater than 8.5 were observed in coastal plains and at several localized points within the alluvial plains. The resulting groundwater quality map displays a gradation from suitable groundwater zones to moderately suitable zones and finally to unsuitable zones, corresponding to transitions between geomorphological units. The highest groundwater quality is concentrated in the alluvial and floodplain units located in the northern and eastern parts of Gorontalo City, which are classified as suitable. Overall, groundwater quality in Gorontalo City is influenced by the interplay of geomorphological conditions, water rock interactions, and limited local recharge. This integrated GIS-based approach offers applicability to other tropical urban settings as a foundation for infiltration zone conservation and groundwater pollution control.

Keywords: groundwater quality; geomorphological units; GIS

PENDAHULUAN

Air tanah masih menjadi penopang utama kebutuhan domestik di banyak kota di Indonesia (Jiang & Rohendi, 2018; Fadillah dkk., 2023; Razi dkk., 2024), termasuk di Kota Gorontalo. Air tanah di Kota Gorontalo juga dimanfaatkan untuk kebutuhan industri (Lihawa dkk., 2013) pertanian, dan sektor lainnya (BPS

Kota Gorontalo, 2025). Wilayah lain yang juga sangat bergantung pada air tanah untuk pasokan domestik yaitu Arusha di Tanzania (Chacha dkk., 2018), dan Lagos di Nigeria (Danert & Healy, 2021). Pertumbuhan penduduk mendorong perluasan kawasan terbangun sehingga tekanan terhadap mutu air tanah cenderung meningkat (Gabor dkk., 2017; Lapworth dkk., 2017), limpasan permukaan bertambah (Camara dkk., 2019; kumar dkk., 2017), zona resapan menyempit (Kumari Yadav., 2023), dan peluang masuknya polutan ke akuifer semakin tinggi (Daskalaki & Voudouris., 2007; Jiang dkk., 2018).

Aspek geomorfologi berperan dalam menentukan tingkat kerentanan air tanah terhadap pencemaran (Gao dkk., 2020) karena memengaruhi infiltrasi, limpasan, dan dinamika pergerakan polutan yang menentukan seberapa cepat kontaminan dapat mencapai akuifer (Bridget dkk., 2024). Berbagai metode pemetaan kerentanan seperti DRASTIC, SINTACS, dan SEEPAGE memasukan paramater topografi atau kemiringan lereng dalam menilai seberapa rentan suatu wilayah dalam proses degradasi kualitas air tanah akibat pencemaran (Gogu & Dassargues, 2000; Narisetty dkk., 2023). Kondisi tersebut menegaskan bahwa mutu air tanah, tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia air tanah tetapi juga oleh kondisi dari unit geomorfologi yang menentukan tingkat perlindungan alami akuifer dalam menahan pergerakan kontaminan.

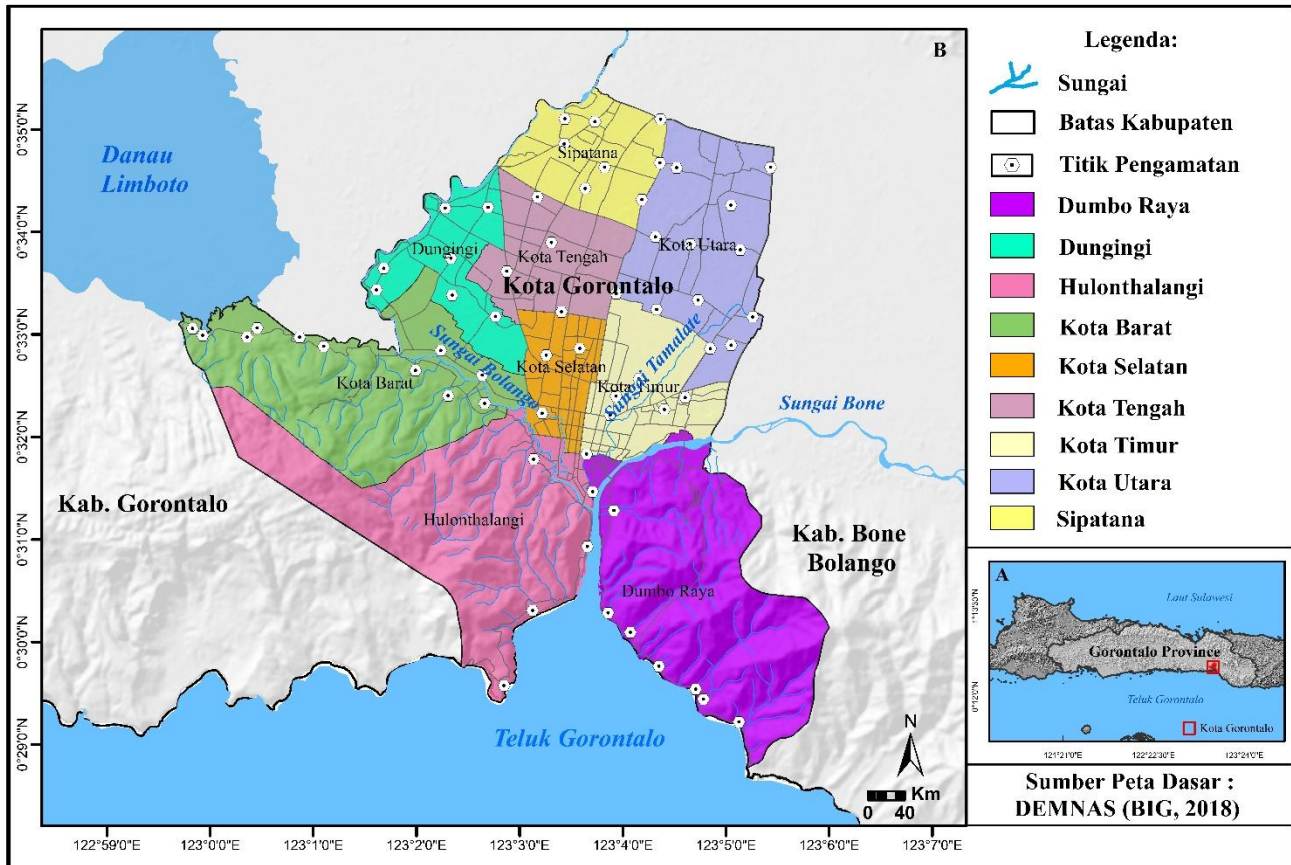
Kajian di Indonesia khususnya di Kota Gorontalo hingga saat ini berfokus pada penilaian kualitas air tanah berdasarkan hasil pengamatan lapangan atau uji laboratorium pada wilayah atau lokasi tertentu (Permana, 2019; Mahmud dkk., 2023). Pendekatan seperti ini sering kali berhenti pada potret lokal tanpa menjelaskan mengapa nilai-nilai tersebut muncul dan bagaimana variasinya terkait dengan unit geomorfologi. Celah inilah yang menjadi dasar penelitian ini mengaitkan parameter fisik–kimia air tanah dengan unit geomorfologi, menggunakan kerangka analisis spasial pada aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG).

Berdasarkan uraian diatas, tujuan penelitian ini adalah menilai keterkaitan kualitas air tanah dengan kondisi geomorfologi (bentuk lahan) terhadap parameter fisik-kimia yang mempengaruhi kualitas air tanah di Kota Gorontalo berbasis SIG. Pendekatan yang menggabungkan kondisi geomorfologi dan parameter fisik-kimia air tanah secara spasial, diharapkan dapat memberikan gambaran spasial tentang kualitas air tanah di Kota Gorontalo, yang selanjutnya dapat dimanfaatkan oleh pemerintah daerah sebagai dasar untuk pengelolaan sumber daya air tanah serta bisa menjadi acuan untuk penelitian sejenis.

METODOLOGI

Penelitian ini berlokasi di Kota Gorontalo, Provinsi Gorontalo, dengan luas wilayah administratif sebesar 79,59 km² yang meliputi sembilan kecamatan (Gambar 1). Secara astronomis, Kota Gorontalo berada pada koordinat 0°30'0" LU - 0°35'40" LU dan 122°59'22" BT - 123°5'19" BT. Secara geografis Kota Gorontalo berbatasan dengan Kabupaten Gorontalo di bagian utara, barat, serta bagian timur. Berbatasan dengan Kabupaten Bone-Bolango di bagian timur, dan dengan Teluk Gorontalo di bagian selatan. Kota Gorontalo didominasi oleh dataran rendah, dan menjadi kawasan dengan aktivitas perkotaan yang padat seperti pusat kegiatan sosial, kawasan pendidikan dan kebudayaan, kawasan permukiman, perdagangan, industri dan pertanian (Rachman dkk., 2020; BPS Kota Gorontalo, 2025) sehingga berpotensi terhadap penurunan kualitas air tanah.

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Tilamuta (Bachri dkk., 1993), dan Peta Geologi Regional Lembar Kotamobagu (Apandi & Bachri, 1997), Kota Gorontalo tersusun atas beberapa formasi yaitu Diorit Bone (Tmb), Batuan Gunung api Pinogu (Tqpv), Endapan Danau (Qpl), dan Batugamping Terumbu (Ql). Kota Gorontalo termasuk dalam zona Sesar Gorontalo.



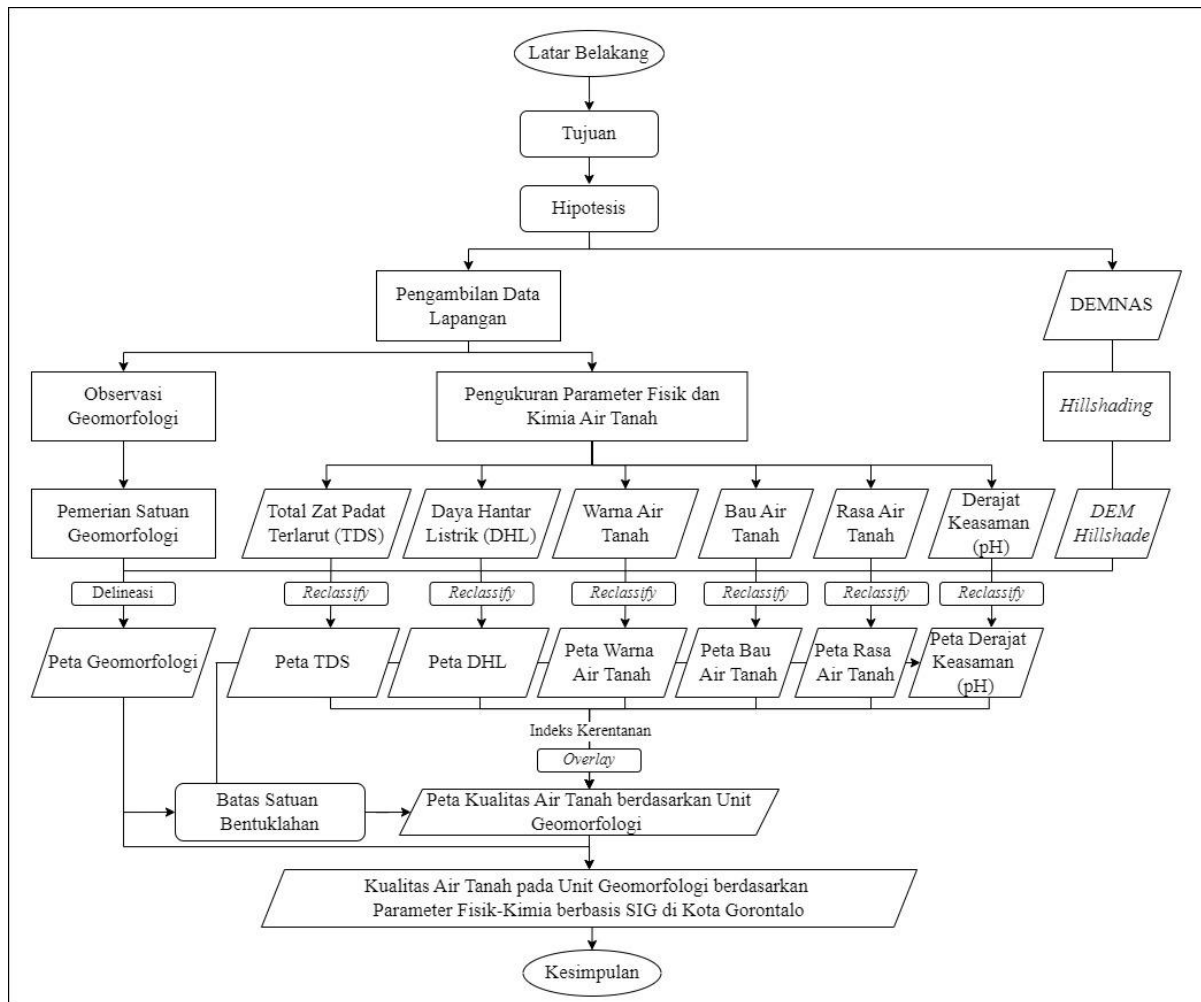
Gambar 1. (A) DEM *hillshade* Provinsi Gorontalo dan sekitarnya. (B) Peta administasi lokasi penelitian yang menampilkan titik pengambilan sampel fisik-kimia air tanah di Kota Gorontalo. Pengambilan sampel didasarkan pada pembagian *grid* di peta dengan luas 1 km². Setiap *grid* diwakili oleh 1 sumur gali. Total sampel air tanah yang diukur berasal dari 63 sumur gali yang tersebar di seluruh kecamatan di Kota Gorontalo.

Berdasarkan hidrogeologi regional, Kota Gorontalo menunjukkan penyebaran dan produktivitas air tanah yang terbagi ke dalam 7 (tujuh) kelompok yaitu akuifer produktif sedang, akuifer produktif sedang dengan penyebaran luas, akuifer produktif dengan penyebaran luas, akuifer setempat produktif, akuifer produktif kecil setempat berarti, dan daerah air tanah langka (Sukrisno dkk., 1994).

Pengamatan geomorfologi meliputi pengamatan morfografi (perbukitan dan dataran), morfometri, morfostruktur aktif (kekar), dan morfostruktur pasif (batuan) seperti yang dilakukan oleh Harun dkk. (2022), Manyoe dkk. (2022), Sumarjis dkk. (2023), dan Mamonto dkk. (2024). Morfometri berupa kelereng (%), relief, dan ketinggian relatif (m) diolah menggunakan aplikasi SIG dari DEMNAS merujuk pada klasifikasi Van Zuidam (1985).

Metode penelitian yang digunakan melalui penggabungan data primer dan sekunder. Data primer meliputi data geomorfologi (bentuk lahan) Kota Gorontalo, karakteristik fisik air tanah (TDS, DHL, warna, bau, dan rasa), dan karakteristik kimia air tanah (pH) pada 63 titik sumur gali yang tersebar secara representatif. Untuk data sekunder berupa data *Digital Elevation Model* (DEM) *hillshade* yang diekstrak dari data DEM Nasional (BIG, 2018) dan diolah menggunakan aplikasi SIG untuk menjadi peta dasar pada peta geomorfologi dan peta tematik untuk masing-masing parameter fisik – kimia air tanah (**Gambar 2**).

Hasil pengamatan di lapangan berupa pemerian satuan geomorfologi kemudian dipadukan dengan data DEM *hillshade* sehingga menghasilkan peta geomorfologi. Penamaan satuan bentuk lahan merujuk pada klasifikasi oleh Brahmantyo dan Bandono (2006), sedangkan warna bentuk lahan merujuk pada klasifikasi warna berdasarkan Van Zuidam (1985). Warna bentuk lahan yang termasuk pada bentang alam atau kelas geomorfik yang sama menggunakan warna dasar yang sama dengan perubahan gradasi.



Gambar 2. Diagram alir penelitian. Data lapangan (geomorfologi dan parameter fisik–kimia air tanah) dan DEMNAS yang diolah menggunakan aplikasi SIG untuk menghasilkan peta tematik tiap parameter. Seluruh *layer* direklasifikasi dan diintegrasikan melalui *weighted overlay* (integrasi multikriteria) guna menganalisis pengaruh geomorfologi terhadap kualitas air tanah di Kota Gorontalo.

Pengukuran kualitas air tanah dilakukan pada 63 titik sumur gali yang tersebar secara representatif di seluruh Kota Gorontalo dengan menggunakan alat multiparameter *water quality* meter portabel tipe pena. Kalibrasi pH dilakukan sebelum melakukan pengukuran dengan menggunakan larutan *buffer* pH 4,01, 6,86 dan 9,18 pada suhu 25°C sesuai dengan petunjuk penggunaan. Jumlah titik pengukuran ditentukan dengan mempertimbangkan distribusi spasial dan sebaran pemanfaatan air tanah oleh masyarakat, sehingga hasil pengukuran mampu mencerminkan variasi kondisi air tanah secara menyeluruh, selain itu digunakan sebagai dasar untuk menginterpretasi kondisi kualitas air tanah. Pada setiap titik dilakukan pengamatan dan pengukuran parameter fisik – kimia, serta pencatatan koordinat geografis. Koordinat geografis digunakan dalam analisis pada aplikasi SIG untuk menghasilkan peta tematik dari tiap parameter.

Proses *reclassify* menggunakan aplikasi SIG dilakukan terhadap data fisik – kimia air tanah (**Tabel 1**). Pengkelasan atau *reclassify* merujuk pada standar baku mutu air. TDS, warna, bau, dan pH merujuk pada Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023. DHL merujuk pada Sen (2015). Rasa merujuk pada Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010. Warna dibedakan atas berwarna dan tidak berwarna. Hasil *reclassify* menghasilkan peta tematik untuk masing-masing parameter fisik-kimia air tanah.

Tabel 1. Pengkelasan (*reclassify*), *skoring*, dan pembobotan tiap parameter fisik – kimia air tanah.

No	Parameter		Pengkelasan (<i>Reclassify</i>)		Skor	Bobot	Standar Acuan
1	Fisik	TDS	<300 mg/L	Sesuai standar	0	0,2	Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023
			>300 mg/L	Tidak sesuai standar	1		
2	Fisik	DHL	<750 µS/cm	Sesuai standar	0	0,2	Klasifikasi Sen (2015)
			>750 µS/cm	Tidak sesuai standar	1		
3	Fisik	Warna	Tidak berwarna	Sesuai standar	0	0,1	Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023
			Berwarna	Tidak sesuai standar	1		
4	Fisik	Bau	Tidak berbau	Sesuai standar	0	0,1	Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023
			Berbau	Tidak sesuai standar	1		
5	Fisik	Rasa	Tidak berasa	Sesuai standar	0	0,1	Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010
			Berasa	Tidak sesuai standar	1		
6	Kimia	pH	6,5 - 8,5	Sesuai standar	0	0,3	Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023
			<6,5 dan >8,5	Tidak sesuai standar	1		

Proses selanjutnya yaitu perhitungan indeks kualitas untuk masing-masing parameter menggunakan pendekatan agregasi linier (Persamaan 1) yang digunakan dalam berbagai literatur indeks kualitas air dan kerentanan (Uddin dkk, 2022). Setiap *layer* peta diberikan pembobotan (Tabel 1). Pembobotan *layer* peta didasarkan pada urgensi ilmiah atau tingkat signifikansi terhadap kesehatan dan kesesuaian dengan standar baku mutu air minum (Tiwari dkk., 2017) yang diakui oleh standar internasional seperti WHO (2022) dan nasional. Urutan bobot mengikuti pengaruh langsung terhadap kesehatan manusia dan kestabilan kimia air, yaitu pH (0,30) > TDS (0,20) = DHL (0,20) > Warna (0,10) = Bau (0,10) = Rasa (0,10). Struktur bobot memastikan bahwa indeks kualitas air tanah yang dihasilkan mencerminkan prioritas parameter secara ilmiah, serta konsisten dengan model penilaian kualitas air yang diakui oleh WHO (2022), Sen (2015), Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010, dan Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023.

$$\text{Indeks Kualitas} = \sum (\text{Skor}_i \times \text{Bobot}_i) \quad (1)$$

Selanjutnya dilakukan *overlay* masing-masing parameter indeks kualitas menghasilkan indeks komposit dengan rentang 0 – 1. yang kemudian diklasifikasikan menjadi tiga kelas kualitas yaitu layak (0–0,33), cukup layak (0,33–0,66), dan tidak layak (0,66–1). Kemudian dilakukan analisis keterkaitan unit geomorfologi terhadap kualitas air tanah di Kota Gorontalo.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geomorfologi Kota Gorontalo

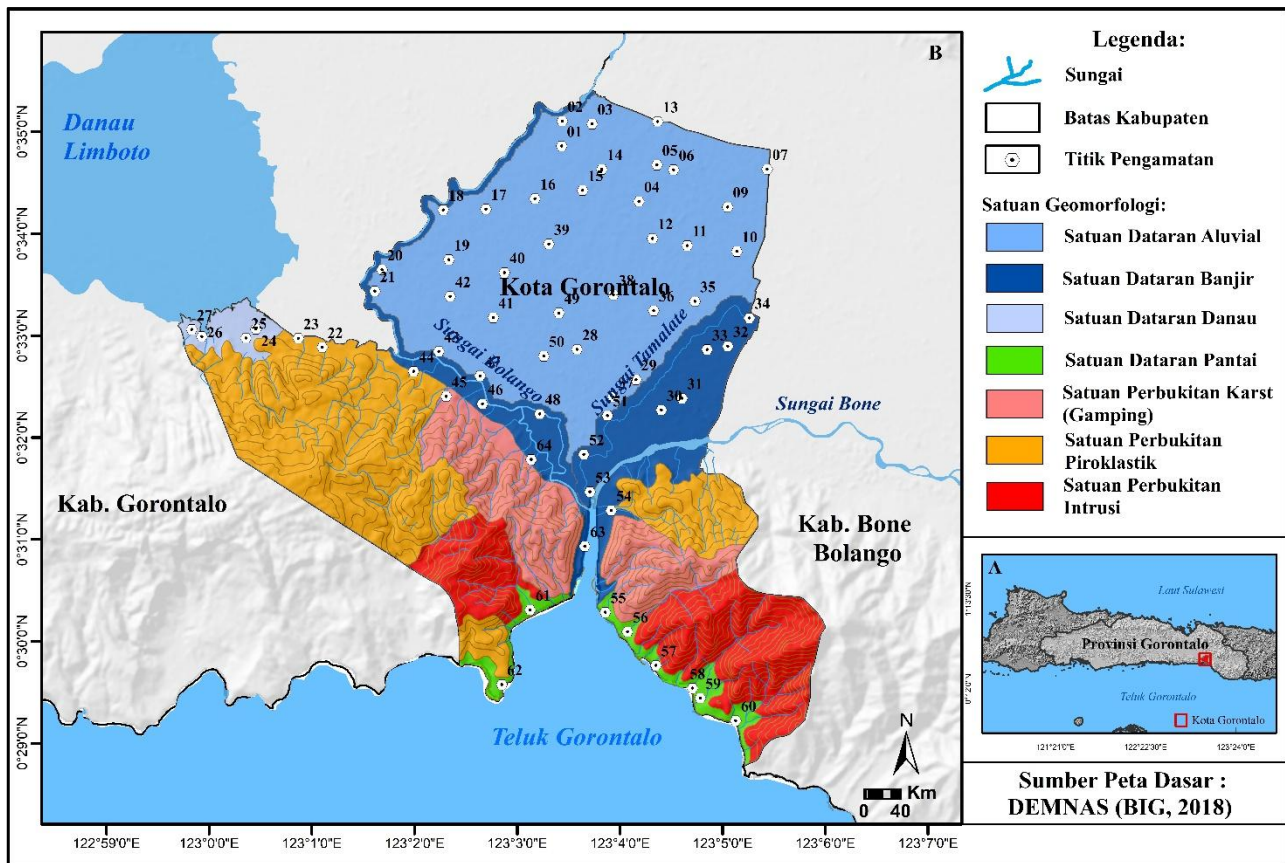
Geomorfologi Kota Gorontalo berdasarkan klasifikasi Brahmantyo dan Bandono (2006) tersusun atas 7 (tujuh) satuan bentuk lahan (Gambar 3). Satuan-satuan bentuk lahan di Kota Gorontalo yaitu satuan perbukitan intrusi, satuan perbukitan piroklastik, satuan perbukitan karst (gamping), satuan dataran aluvial, satuan dataran banjir, satuan dataran danau, dan satuan dataran pantai.

Satuan Perbukitan Intrusi

Satuan perbukitan intrusi terletak di bagian selatan Kota Gorontalo, yang menurut klasifikasi geomorfologi oleh Brahmantyo dan Bandono (2006), termasuk dalam kategori bentang alam pegunungan gunung api. Perbukitan intrusi ini terbentuk akibat aktivitas magmatik yang menerobos batuan induk, diikuti oleh proses pengangkatan dan denudasi, sehingga menghasilkan morfologi perbukitan dengan relief curam.

Satuan perbukitan intrusi berada pada elevasi 200-414 mdpl, dengan kemiringan >18%. Luas satuan perbukitan intrusi yaitu 7,39 km² dengan morfostruktur aktif berupa kekar dan morfostruktur pasif berupa batuan intrusi. Perbukitan intrusi memiliki permeabilitas rendah kecuali pada zona kekar/rekahan. Di lokasi

penelitian terdapat dua tubuh perbukitan intrusi yang dipisahkan oleh aliran Sungai Bone, yang bermuara langsung ke Teluk Gorontalo.



Gambar 3. Peta Geomorfologi Kota Gorontalo. DEM hilshade yang menjadi peta dasar diekstrak dari DEMNAS (BIG, 2018) dan diolah menggunakan aplikasi SIG. Tujuh satuan bentuk lahan mengacu pada klasifikasi Brahmantyo dan Bandono (2006). Warna satuan bentuk lahan mengacu pada klasifikasi Van Zuidam (1985).

Satuan perbukitan intrusi di bagian timur menempati daerah Dumbo Raya, sementara bagian barat berkembang di daerah Hulontalo. Secara litologi, perbukitan ini tersusun atas granit, granodiorit, serta hasil lapukan keduanya. Adanya morfostruktur aktif berupa kekar memperlihatkan kontrol struktur terhadap proses pelapukan dan erosi. Tingkat erosi dan pelapukan pada bentuk lahan ini tergolong ringan hingga sedang, sehingga meskipun terdapat degradasi, morfologi perbukitan masih relatif terjaga.

Pemanfaatan lahan pada bentuk lahan perbukitan intrusi di lokasi penelitian sangat terbatas. Tata guna lahan didominasi oleh pemukiman, pertambangan batuan, jaringan jalan, dan lahan terbuka yang ditutupi oleh vegetasi alami berupa belukar dan semak tinggi yang tumbuh secara tidak terkelola. Kondisi ini mengindikasikan bahwa secara geomorfologi, perbukitan intrusi di selatan Kota Gorontalo berperan sebagai bentang alam yang membatasi sistem aliran Sungai Bone dengan Teluk Gorontalo.

Satuan Perbukitan Piroklastik

Bentuk lahan perbukitan piroklastik di bagian selatan Kota Gorontalo menurut klasifikasi Brahmantyo dan Bandono (2006) termasuk dalam bentang alam pegunungan gunung api. Satuan ini umumnya memperlihatkan topografi bergelombang hingga curam. Satuan perbukitan piroklastik berada pada elevasi 200-596 mdpl, dengan kelerengan >18%. Luas satuan perbukitan piroklastik yaitu 8,69 km² dengan morfostruktur aktif berupa kekar dan morfostruktur pasif berupa batuan piroklastik. Litologi penyusun satuan perbukitan piroklastik berupa breksi vulkanik.

Perbukitan piroklastik memiliki permeabilitas rendah sampai sedang, karena karaktersitik fisik dari fragmen vulkanik yang bercampur dan cenderung rapat sehingga ruang pori terbatas (Quintero dkk., 2024). Proses geomorfologi perbukitan piroklastik terbentuk dari akumulasi fragmen vulkanik sebagai hasil dari erupsi eksplosif berukuran halus hingga kasar yang termampatkan atau terkonsolidasi sehingga menghasilkan morfologi perbukitan piroklastik yang curam hingga sangat curam. Pemanfaatan lahan pada satuan bentuk lahan ini cukup bervariasi, mulai dari jaringan jalan, perkantoran, dan permukiman, namun sebagian besar masih didominasi oleh tutupan vegetasi alami berupa semak belukar tinggi.

Satuan Perbukitan Karst

Satuan perbukitan karst di bagian barat Kota Gorontalo menurut klasifikasi Brahmantyo dan Bandono (2006) termasuk ke dalam bentang alam pegunungan karst. Satuan ini tersusun atas Batugamping yang di beberapa lokasi memperlihatkan kandungan fosil foraminifera sebagai penanda dulunya merupakan lingkungan pengendapan laut dangkal. Satuan perbukitan karst berada pada elevasi 200-432 mdpl, dengan kelerengan >18%.

Luas satuan perbukitan karst yaitu 15,4 km². Relief pada satuan perbukitan karst yaitu perbukitan curam. Di bagian barat, perbukitan karst terbagi atas 2 (dua) kelompok yaitu perbukitan karst Hulontalangi – Kota Barat yang lebih luas, dekat dengan Danau Limboto, dan perbukitan karst Hulontalangi yang relatif sempit, dekat dengan Teluk Gorontalo. Kedua perbukitan ini dipisahkan oleh perbukitan piroklastik. Sementara itu di bagian timur, perbukitan karst Dumbo Raya terletak dekat dengan Sungai Bone.

Perbukitan karst memiliki sifat akuifer yang dipengaruhi oleh sistem rekahan dan pelarutan sehingga menghasilkan permeabilitas yang tinggi. Perbukitan karst di Hulontalangi – Kota Barat yang terletak di dekat Danau Limboto, berperan sebagai zona imbuhan yang menyuplai air tanah ke dataran sekitarnya. Perbukitan karst Hulontalangi yang terletak di dekat Teluk Gorontalo, keberadaan rekahan dan sistem pelarutan berpotensi menjadi jalur keluaran (*discharge*) air tanah yang bermuara ke pesisir. Sementara itu perbukitan karst di Dumbo Raya yang terletak di dekat Sungai Bone, rekahan dan bidang sesar menjadi jalan aliran bawah permukaan sekaligus keluaran air tanah yang menuju ke sungai. Tata guna lahan pada perbukitan gamping bervariasi, mulai dari jaringan jalan, perkantoran, dan permukiman, tambang batuan, pemanfaatan untuk kegiatan pariwisata, dan tutupan vegetasi.

Satuan Dataran Aluvial

Bentuk lahan dataran aluvial yang tersebar dari bagian utara hingga tengah Kota Gorontalo dalam klasifikasi Brahmantyo dan Bandono (2006) termasuk ke dalam bentang alam dataran sungai dan danau. Bentuk lahan dataran aluvial terbentuk dari proses pengendapan material hasil transportasi sungai yang terdiri atas lempung, lanau, pasir, hingga kerikil dengan sortasi yang bervariasi. Satuan dataran aluvial berada pada elevasi <50 mdpl Luas satuan dataran aluvial yaitu 26,72 km².

Satuan dataran aluvial berperan sebagai akuifer sedang sampai produktif dengan penyebaran luas, karena tersusun oleh material lepas sehingga memiliki porositas dan permeabilitas yang tinggi. Kondisi topografi yang relatif datar menjadikan satuan dataran aluvial sebagai pusat dari berbagai aktivitas manusia, mencakup kawasan pemukiman, perkantoran, fasilitas kesehatan dan pendidikan, fasilitas olahraga, industri, jaringan jalan, pusat perdagangan, dan lahan pertanian, sehingga menjadikannya pusat utama perkembangan Kota Gorontalo. Kondisi ini dapat berdampak pada penurunan kualitas air tanah dan rentan terhadap pencemaran.

Satuan Dataran Banjir

Bentuk lahan dataran banjir di Kota Gorontalo menurut klasifikasi Brahmantyo dan Bandono (2006) termasuk ke dalam bentang alam dataran sungai dan danau. Satuan ini berkembang di sepanjang aliran Sungai Bone, Sungai Bolango, dan Sungai Tamalate. Sungai Bone mengalir dari arah timur Kota Gorontalo menuju barat, kemudian berbelok ke selatan hingga bermuara di Teluk Gorontalo.

Sungai Bolango mengalir di sisi barat kota dari utara ke selatan menuju muara Sungai di Teluk Gorontalo. Sungai Tamalate mengalir dari arah timur laut, melewati Kota Gorontalo menuju muara yang sama. Dataran

banjir terbentuk oleh hasil pengendapan material lepas yang menunjukkan perbedaan ukuran butir secara lateral, di mana pada bagian yang dekat dengan badan sungai didominasi oleh pasir dan kerikil, sedangkan pada bagian yang lebih jauh dari sungai material yang diendapkan semakin halus berupa lanau dan lempung. Satuan dataran banjir berperan penting sebagai zona imbuan lokal dan pengatur interaksi antara aliran permukaan dan air tanah dangkal. Satuan dataran banjir berada pada elevasi <50 mdpl dengan luas 9,97 km². Tata guna lahan pada dataran banjir yaitu pemukiman, perkantoran, fasilitas pendidikan, dan tambang pasir.

Satuan Dataran Danau

Bentuk lahan dataran danau di bagian barat Kota Gorontalo menurut klasifikasi Brahmanytyo dan Bandonno (2006) termasuk dalam bentang alam dataran sungai dan danau yang terbentuk dari akumulasi material lepas di tepi Danau Limboto. Satuan ini memiliki relief datar dengan ketinggian yang relatif rendah, sehingga menjadi zona transisi antara perairan danau dengan dataran di sekitarnya. Material penyusunnya berupa endapan lempung halus hingga sedang hasil proses sedimentasi danau, yang menunjukkan dinamika pengendapan berulang akibat fluktuasi muka air danau.

Satuan dataran danau berada pada elevasi <50 mdpl dengan luas 1,1 km². Satuan dataran danau berperan sebagai zona interaksi langsung antara air permukaan Danau Limboto dengan air tanah dangkal dan memiliki permeabilitas rendah. Pemanfaatan lahan pada dataran danau cukup beragam, mencakup kawasan pariwisata yang memanfaatkan panorama Danau Limboto, pemukiman penduduk, jalur transportasi darat, serta keberadaan pangkalan perahu nelayan sebagai sarana berlabuhnya perahu-perahu kecil yang digunakan untuk aktivitas perikanan dan transportasi lokal.

Satuan Dataran Pantai

Berdasarkan klasifikasi Brahmanytyo dan Bandonno (2006), dataran pantai termasuk dalam bentang alam dataran pantai, delta, dan laut yang berkembang di bagian selatan Kota Gorontalo di sepanjang pesisir Teluk Gorontalo. Dataran pantai tersusun oleh material lepas berukuran kasar, seperti pasir, kerikil, dan fragmen pecahan fosil laut yang diendapkan melalui proses gelombang, arus, dan pasang surut. Pada beberapa lokasi, pengendapan fluvial turut berperan yaitu di daerah dekat aliran sungai. Morfologi dataran pantai relatif datar dengan elevasi rendah. Satuan dataran pantai berkembang di pesisir Teluk Gorontalo di bagian selatan Kota Gorontalo.

Morfografi berupa dataran dengan elevasi <50 mdpl. Luas satuan dataran pantai yaitu 1,79 km². Satuan dataran pantai berperan sebagai akuifer dangkal yang terbentuk dari material lepasan berupa pasir dan kerikil sehingga memiliki permeabilitas tinggi dan rentan terhadap intrusi air laut. Tata guna lahan di dataran pantai yaitu pemukiman, jaringan jalan, lokasi tambatan perahu nelayan, pelabuhan, dermaga perikanan, dan pariwisata.

Parameter Fisik dan Kimia Air Tanah

Data hasil pengamatan dan pengukuran parameter TDS, DHL warna, bau, rasa, dan pH dari 63 sumur gali di Kota Gorontalo diberikan pada **Tabel 2**. Hasil pengukuran kualitas air tanah menunjukkan variasi di tujuh unit geomorfologi. Satuan dataran aluvial umumnya memiliki nilai pH rata-rata 7,7 dan masih sesuai standar acuan, TDS memiliki rata-rata 358 mg/L sedikit diatas standar acuan sedangkan untuk DHL rata-rata sebesar 721 µS/cm dan masih sesuai standar. Pada satuan dataran banjir TDS memiliki nilai rata-rata 413 mg/L dan DHL 829 µS/cm. Kedua nilai ini cenderung sedikit lebih tinggi dan tidak sesuai standar acuan, tetapi memiliki nilai rata-rata pH 7,8 yang tergolong netral dan sesuai standar. Sama seperti pada satuan dataran danau yang memiliki nilai rata-rata TDS sebesar 524 mg/L dan rata-rata DHL 1,040 µS/cm yang tinggi, tapi punya nilai rata-rata pH 7,6 dan masih masuk kategori sesuai standar.

Di dataran pantai nilai pH rata-rata 8,0 dan masih sesuai standar, TDS memiliki rata-rata sebesar 627 mg/L, dan DHL rata-rata 721 µS/cm yang keduanya tidak sesuai standar acuan baku mutu air tanah. Pada perbukitan intrusi memiliki nilai pH rata-rata 7,8, nilai rata-rata TDS 555 mg/L dan nilai rata-rata DHL 1,122

$\mu\text{S/cm}$. Sedangkan pada perbukitan karst memiliki nilai rerata TDS sebesar 627 mg/L dan rerata DHL 1,246 $\mu\text{S/cm}$ yang tinggi, tapi punya nilai rata-rata pH 8,0 yang masih masuk kategori sesuai standar.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa nilai TDS berkisar dari 183 – 1210 mg/L dengan rata-rata 431 ± 179 mg/L. Nilai DHL memiliki nilai rentang mulai dari 369 – 2379 $\mu\text{S/cm}$ dengan rata-rata sebesar 865 ± 353 $\mu\text{S/cm}$. Sedangkan nilai pH berada pada kisaran 7,27 – 8,67 dengan rata-rata sebesar $7,75 \pm 0,33$. Berdasarkan hasil pengamatan dan pengukuran sampel air tanah menunjukkan 81% sampel tidak berwarna, 94% tidak berbau, dan 98% tidak berasa, sebesar 16% TDS, 33% DHL, dan 95% pH pada sampel sesuai dengan standar baku mutu air, sehingga kondisi geomorfologi turut berperan dalam mengendalikan kualitas air tanah.

Tabel 2. Hasil pengukuran parameter fisik dan kimia air tanah.

No	Kode Pengukuran Sumur	pH	DHL ($\mu\text{S/cm}$)	TDS (mg/L)	Warna	Bau		Rasa		Unit Geomorfologi
						Y	T	Y	T	
1	SN 01	7.43	791	400	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
2	SN 02	8	904	468	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
3	SN 03	7.56	785	380	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
4	SN 04	7.4	578	285	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
5	SN 05	7.86	458	227	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
6	SN 06	7.39	438	217	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
7	SN 07	7.4	454	230	Kuning	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
8	SN 09	7.39	639	317	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
9	SN 10	7.27	578	288	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
10	SN 11	7.3	655	327	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
11	SN 12	7.43	842	414	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
12	SN 13	8.26	484	237	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
13	SN 14	7.4	369	183	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
14	SN 15	7.55	699	346	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
15	SN 16	7.57	822	413	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
16	SN 17	7.54	966	480	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
17	SN 18	7.34	709	352	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
18	SN 19	7.63	926	460	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
19	SN 20	7.34	826	406	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
20	SN 21	7.5	932	461	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
21	SN 22	7.72	860	425	Bening	✓		✓		Satuan Perbukitan Karst
22	SN 23	7.73	900	450	Bening	✓		✓		Satuan Perbukitan Karst
23	SN 24	7.63	998	552	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Danau
24	SN 25	7.9	1147	570	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Danau
25	SN 26	7.55	1049	522	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Danau
26	SN 27	7.41	966	453	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Danau
27	SN 28	7.86	773	387	Coklat Muda	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
28	SN 29	7.62	1123	550	Coklat	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
29	SN 30	8.2	681	340	Coklat	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
30	SN 31	7.78	375	188	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
31	SN 32	7.4	894	444	Kuning	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
32	SN 33	7.44	906	449	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
33	SN 34	7.72	814	408	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Banjir
34	SN 35	7.53	812	404	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
35	SN 36	7.47	681	377	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
36	SN 37	7.41	745	370	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
37	SN 38	8.62	751	373	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
38	SN 39	7.71	681	345	Bening	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
39	SN 40	8.59	755	375	Hijau	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial
40	SN 41	7.76	872	430	Hijau	✓		✓		Satuan Dataran Aluvial

Tabel 2. Hasil pengukuran parameter fisik dan kimia air tanah (Lanjutan)

No	Kode Pengukuran Sumur	pH	DHL (µS/cm)	TDS (mg/L)	Warna	Bau		Rasa		Unit Geomorfologi
						Y	Y	Y	T	
41	SN 42	7.71	822	409	Hijau		√		√	Satuan Dataran Aluvial
42	SN 43	7.85	870	432	Hijau		√		√	Satuan Dataran Banjir
43	SN 44	7.54	1358	673	Bening		√		√	Satuan Perbukitan Karst
44	SN 45A	7.78	1175	582	Bening		√		√	Satuan Perbukitan Intrusi
45	SN 46	7.85	2261	1133	Bening		√		√	Satuan Dataran Banjir
46	SN 47A	8.17	812	403	Coklat muda		√		√	Satuan Dataran Banjir
47	SN 48	8.35	418	207	Bening	√			√	Satuan Dataran Banjir
48	SN 49	8.1	789	387	Bening		√		√	Satuan Dataran Aluvial
49	SN 50A	8.34	721	312	Kuning	√		√		Satuan Dataran Aluvial
50	SN 51	7.78	635	317	Bening		√		√	Satuan Dataran Banjir
51	SN 52	7.75	677	337	Bening		√		√	Satuan Dataran Banjir
52	SN 53	7.67	476	236	Bening		√		√	Satuan Dataran Banjir
53	SN 54	7.81	970	487	Bening		√		√	Satuan Dataran Banjir
54	SN 55	7.83	1382	702	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
55	SN 56	8.06	822	398	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
56	SN 57	7.75	2379	1210	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
57	SN 58A	7.93	902	446	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
58	SN 59	7.91	1083	585	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
59	SN 60	7.88	1455	710	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
60	SN 61	8.1	761	377	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
61	SN 62	8.67	1187	587	Bening		√		√	Satuan Dataran Pantai
62	SN 63	7.85	840	416	Bening		√		√	Satuan Dataran Banjir
63	SN 64	7.79	1069	528	Bening		√		√	Satuan Perbukitan Intrusi

Y = Ya

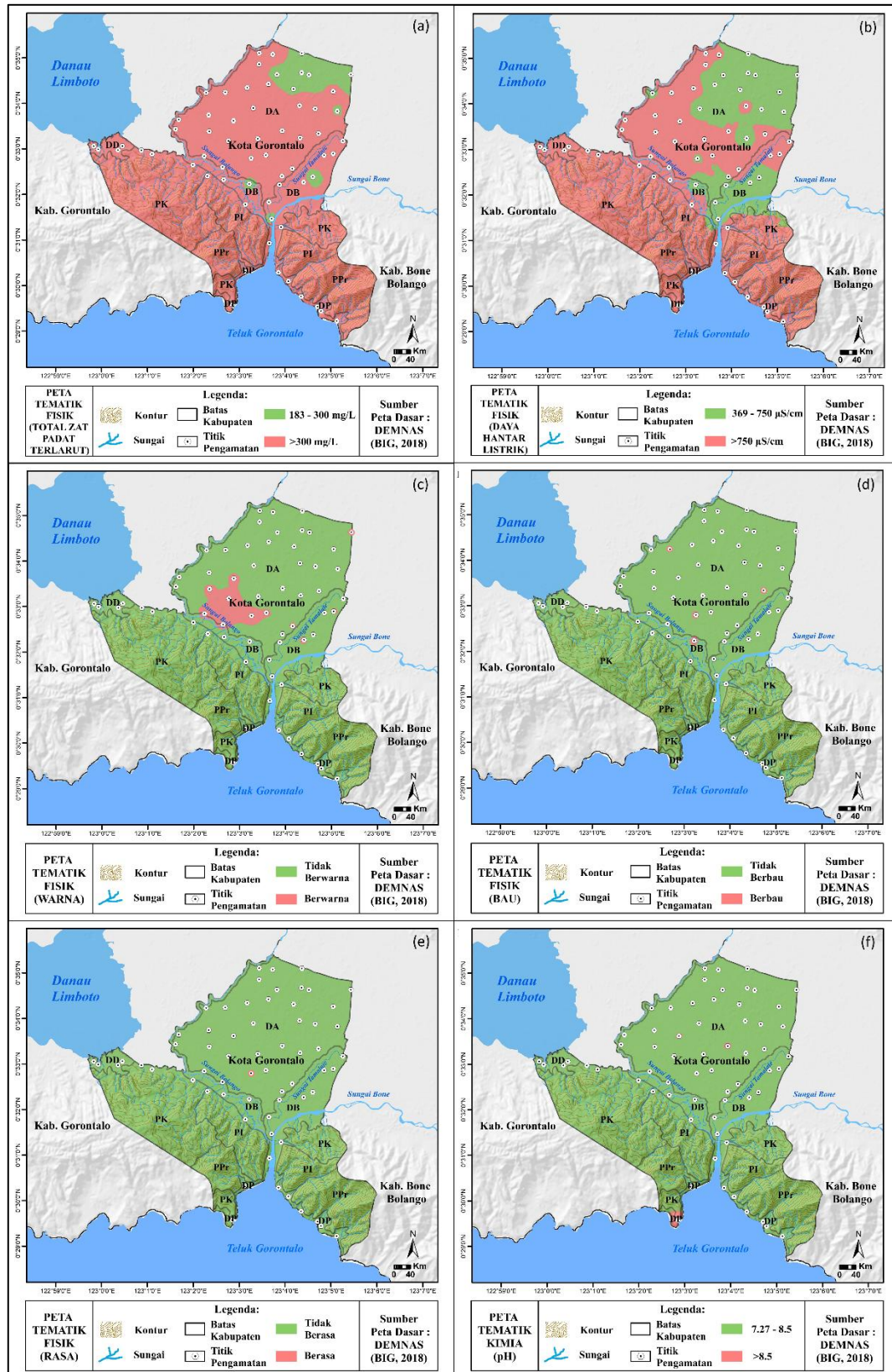
T = Tidak

Total Zat Padat Terlarut (TDS)

Zonasi parameter TDS menunjukkan konsentrasi TDS yang dibagi menjadi dua kelas utama yaitu 183–300 mg/L yang sesuai standar dan >300 mg/L yang melebihi standar yang merujuk pada Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023. Nilai yang sesuai standar (hijau) dominan pada sebagian dataran aluvial dan minor di dataran banjir. Nilai >300 mg/L (merah) mencakup sebagian besar dataran aluvial, dataran banjir, dataran danau, dataran pantai, serta perbukitan intrusi, piroklastik, dan karst (Gambar 4a).

Peningkatan TDS di atas 300 mg/L dapat dikaitkan dengan interaksi formasi geologi dengan air (Cowie dkk., 2015), intrusi air laut (Ferchichi dkk., 2018, Wang dkk., 2017), dan laju penguapan tinggi (Cartwright dkk., 2009). Proses alami ini dapat diperparah oleh aktivitas manusia seperti eksploitasi air tanah yang berlebihan (Minderhoud dkk., 2017). Hal ini yang menjelaskan nilai TDS di sebagian besar dataran aluvial, dataran banjir, dataran danau, dataran pantai, serta perbukitan intrusi, piroklastik, dan karst memiliki nilai > 300 mg/L. Sedangkan air tanah di dataran aluvial dan beberapa titik di dataran banjir memiliki TDS <300 mg/L.

Kondisi ini disebabkan oleh minimnya interaksi air tanah dengan batuan, secara terus menerus diperbarui oleh aliran air permukaan dan bawah permukaan (contohnya pada Redwan dkk., 2016). Selain itu, faktor antropogenik juga berperan secara lokal seperti pengelolaan limbah domestik yang baik, penggunaan pupuk dan pestisida yang terkontrol, serta menghindari kegiatan eksploitasi air tanah yang berlebihan (contohnya pada Aleem dkk., 2018; Zhang dkk., 2018). Kondisi ini diperkuat oleh peta tata guna lahan Kota Gorontalo (Algiffari dkk., 2025) yang menunjukkan lahan perkebunan yang masih mendominasi, sehingga sebagian dataran aluvial dan beberapa titik di dataran banjir memiliki kualitas air tanah yang relatif baik.



Gambar 4. Peta tematik fisik – kimia air tanah setelah proses *reclassify* menggunakan SIG. (a) Peta TDS, (b) Peta DHL, (c) Peta warna air tanah, (d) Peta bau air tanah, (e) Peta rasa air tanah, dan (f) Peta pH. Warna hijau merepresentasikan daerah dengan sampel air tanah yang sesuai standar, dan warna merah merepresentasikan yang tidak sesuai standar. Singkatan: PI = Perbukitan Intrusi, PPr = Perbukitan Piroklastik, PK = Perbukitan Karst, DA = Dataran Aluvial, DB = Dataran Banjir, DD = Dataran Danau, DP = Dataran Pantai.

Daya Hantar Listrik (DHL)

Zonasi DHL yang dibuat berdasarkan klasifikasi oleh Sen (2015) dengan menggunakan aplikasi SIG menunjukkan 2 (dua) kelas dengan kandungan DHL berbeda (**Gambar 4b**). Kelas dengan nilai DHL 369 – 750 $\mu\text{S/cm}$ ditandai dengan warna hijau pada peta merupakan daerah dengan kandungan DHL yang layak untuk air minum, sedangkan kelas dengan nilai DHL >750 $\mu\text{S/cm}$ merupakan daerah dengan kandungan DHL sedang hingga sangat buruk.

Nilai DHL >750 $\mu\text{S/cm}$ tersebar di perbukitan intrusi, perbukitan piroklastik, perbukitan karst, dataran danau, dataran pantai, dan sebagian dataran aluvial dan dataran banjir. Hal ini dapat dipengaruhi oleh kandungan mineral dalam formasi geologi (Nagaraju dkk., 2016), faktor antropogenik (Armanuos dkk., 2016), dan pola pengimbuhan (*recharge pattern*) yang terbatas (Panghal dan Bhateria, 2020). Sedangkan, sebagian dataran aluvial dan dataran banjir yang memiliki nilai DHL 369 – 750 $\mu\text{S/cm}$ dipengaruhi oleh pola pengimbuhan (*recharge pattern*) yang teratur yaitu suatu kondisi yang menunjukkan keseimbangan antara infiltrasi dan limpasan permukaan secara berkelanjutan (Panghal dan Bhateria, 2020), dan minimnya faktor antropogenik (Armanuos dkk., 2016).

Warna

Zonasi parameter warna (Gambar 4c) memperlihatkan dua kelas yaitu kelas tidak berwarna yang ditandai dengan warna hijau pada peta dan kelas berwarna yang ditandai dengan warna merah. Pengkelasan parameter warna merujuk pada Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023. Kelas tidak berwarna menempati perbukitan intrusi, perbukitan piroklastik, perbukitan karst, dataran danau dan sebagian besar dataran aluvial, dan dataran banjir. Kelas air tanah berwarna menempati sebagian kecil dataran aluvial, dan dataran banjir.

Air tanah pada sumur gali di dataran banjir dan dataran aluvial dapat berwarna karena adanya interaksi antara air dan bahan organik dalam kondisi kolom air yang stagnan (Takem dkk., 2009). Air tanah yang memiliki sirkulasi air lebih baik airnya tetap jernih dan tidak berwarna (Salvadori dkk., 2024). Sirkulasi air tanah yang baik terjadi pada litologi pasir dan kerikil (Jiang dkk., 2018), batupasir (Hayes dkk., 2019), batu gamping berongga (karst) (Salvadori dkk., 2024), dan batuan vulkanik yang memiliki rekahan (Fenta dkk., 2020). Hal ini yang dapat menjelaskan 19% air tanah di Kota Gorontalo berwarna dan 51% tidak berwarna.

Bau

Zonasi bau air tanah (Gambar 4d) menunjukkan dua kelas yaitu kelas air tanah tidak berbau (sesuai standar Peraturan Menteri Kesehatan No 2 tahun 2023) yang ditandai dengan warna hijau pada peta, dan kelas air tanah berbau yang ditandai warna merah pada peta. Pengukuran terhadap total 63 sumur menunjukkan bahwa hanya ada 4 (empat) sumur yang tidak sesuai standar.

Sumur yang memiliki bau berada pada satuan dataran banjir dan dataran aluvial. Sehingga diinterpretasikan bahwa anomali ini hanya merupakan kejadian lokal yang dapat pengaruh dari kolom air yang lama stagnan, sehingga kehilangan kandungan oksigen dan menjadi tempat pertumbuhan bakteri, jamur dan organisme berbahaya lainnya (Zhu dkk., 2016).

Rasa

Zonasi parameter rasa (Gambar 4e) menunjukkan dua kelas yaitu kelas air tanah yang tidak berasa (sesuai standar Peraturan Menteri Kesehatan No 492 tahun 2010) yang ditandai dengan warna hijau pada peta, dan kelas air tanah berasa yang ditandai oleh warna merah pada peta. Parameter fisik rasa terdeteksi hanya ada 1 titik (satu) sumur gali yang berasa dari total 63 sumur gali. 1 (satu) titik sumur gali yang berasa berada pada satuan dataran aluvial sehingga diinterpretasikan disebabkan oleh kejadian lokal yang dipengaruhi oleh air stagnan dan adanya endapan organik berbahaya pada sumur (Kanyerere dkk., 2012).

Derajat Keasaman (pH)

Zonasi parameter derajat keasaman (pH) yang dibuat berdasarkan klasifikasi pH oleh Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 (2023) menggunakan aplikasi SIG menunjukkan 2 (dua) kelas dengan kandungan pH berbeda (Gambar 4f). Kelas dengan nilai pH 7,27 – 8,5 ditandai dengan warna hijau pada peta merupakan daerah

dengan kandungan pH yang layak untuk air minum, sedangkan kelas dengan nilai pH >8,5 merupakan daerah dengan kandungan pH yang tidak sesuai standar untuk air minum.

Daerah dengan kandungan pH air tanah yang layak minum tersebar pada satuan geomorfologi dataran banjir, dataran danau, perbukitan intrusi, perbukitan piroklastik, perbukitan karst, dan sebagian besar dataran aluvial, dan dataran pantai. Daerah dengan kandungan pH yang tidak layak untuk air minum terpusat pada dataran pantai yang berada di bagian tanjung Hulontalangi (Tanjung Kramat), dan 2 titik berada di dataran aluvial. Dataran pantai yang memiliki pH > 8,5 dipengaruhi oleh adanya batuan karbonat (Carstensen & Duarte, 2019) dan intrusi air laut yang kuat (Wootton & Pfister, 2012).

Hal ini yang menyebabkan dataran pantai di Tanjung Kramat memiliki pH >8,5. Dataran pantai di Tanjung Kramat berdekatan dengan perbukitan karst dan menerima pengaruh dari intrusi air laut yang lebih kuat dibanding pada dataran pantai lainnya.

Air tanah di dataran aluvial Kota Gorontalo yang memiliki pH >8,5 dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik seperti di Dataran Deccan India (Vasu dkk., 2016), Dataran Sanjiang China (Wang dkk., 2017), dan Lembah Sungai Vistula Polandia (Furtak dkk., 2024). Air tanah pada satuan geomorfologi lainnya di Kota Gorontalo yang memiliki pH ideal (6,5-8,5) dipengaruhi oleh aliran air tawar yang kuat (Chilton dkk., 2021) meskipun berada di perbukitan karst dan sekitarnya.

Kualitas Air Tanah pada Unit Geomorfologi

Berdasarkan Tabel 3, kualitas air tanah di berbagai unit geomorfologi menunjukkan variasi yang signifikan. Parameter fisik air tanah seperti warna, bau, dan rasa umumnya sangat baik, dengan nilai 76-100% di seluruh unit geomorfologi. Nilai pH juga menunjukkan stabilitas dalam rentang 97–100% di hampir semua satuan, kecuali dataran pantai yang memiliki nilai 88%, menunjukkan kondisi netral hingga sedikit basa yang masih dapat diterima untuk pemanfaatan air tanah sebagai air minum.

Sebaliknya, parameter TDS dan DHL menunjukkan variasi spasial yang signifikan. Nilai tertinggi ditemukan pada dataran aluvial (TDS 24%, DHL 48%) dan dataran banjir (TDS 18%, DHL 41%), sementara satuan lainnya menunjukkan nilai 0%. Persentasi kualitas air tanah yang sesuai baku mutu ini disajikan pada (Tabel 3) dan tergambarkan dengan lebih jelas secara spasial pada Gambar 5 setelah perhitungan indeks kualitas air tanah.

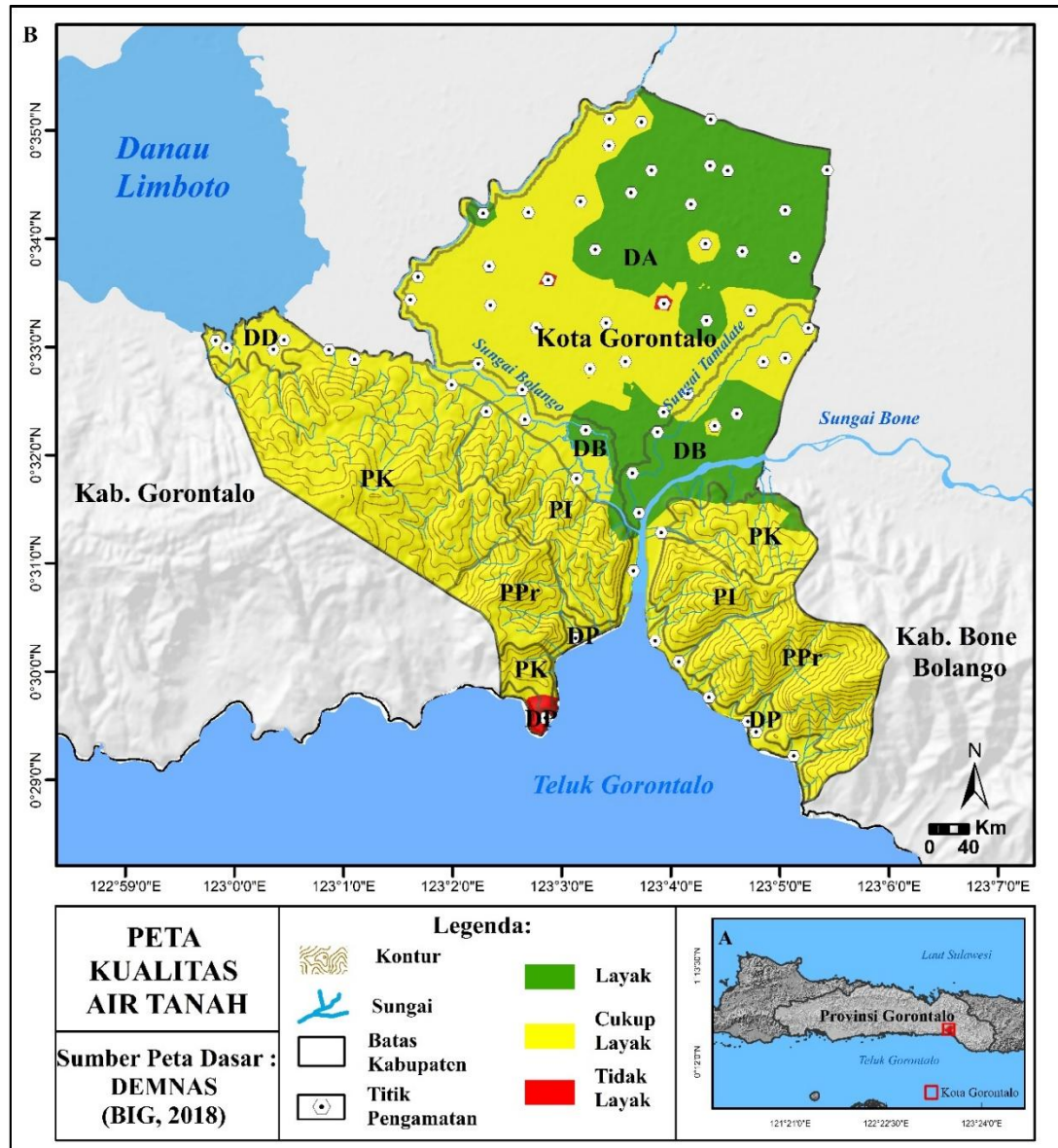
Tabel 3. Kualitas air tanah berdasarkan parameter fisik-kimia pada tiap unit geomorfologi. Nilai persentasi parameter fisik – kimia air tanah pada tiap unit geomorfologi yang diberikan dalam tabel merupakan nilai persentasi yang sesuai standar untuk pemanfaatan air tanah sebagai air minum.

No	Parameter Fisik -Kimia	Unit Geomorfologi						
		Dataran Aluvial n = 29	Dataran Banjir n = 17	Dataran Danau n = 4	Dataran Pantai n = 8	Perbukitan Karst n = 3	Perbukitan Piroklastik n = 0	Perbukitan Intrusi n = 2
1	TDS	24%	18%	0%	0%	0%	0%	0%
2	DHL	48%	41%	0%	0%	0%	0%	0%
3	Warna	76%	76%	100%	100%	100%	100%	100%
4	Bau	90%	94%	100%	100%	100%	100%	100%
5	Rasa	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6	pH	97%	100%	100%	88%	100%	100%	100%

Peta kualitas air tanah Kota Gorontalo (Gambar 5) menunjukkan perbedaan tingkat kualitas air tanah yang terbagi ke dalam tiga kelas kualitas yaitu layak (hijau), cukup layak (kuning), dan tidak layak (merah). Hasil penilaian menunjukkan bahwa 32% sampel termasuk dalam kelas kualitas layak. Kelas kualitas cukup layak mendominasi Kota Gorontalo dengan persentasi 63% dari total sampel. Di sisi lain, hanya 5% dari sampel yang termasuk dalam kelas kualitas tidak layak.

Kelas kualitas layak menempati dataran aluvial bagian utara dan timur laut, dan dataran banjir bagian timur. Kelas kualitas cukup layak menempati perbukitan intrusi, perbukitan piroklastik, perbukitan karst, sebagian besar dataran aluvial, dan dataran banjir bagian barat. Kelas kualitas tidak layak menempati dataran

pantai pada daerah tanjung yang berbatasan langsung dengan Teluk Gorontalo, dan pada 2 (titik) yang ada di dataran aluvial



Gambar 5. Peta kualitas air tanah Kota Gorontalo yang menunjukkan 3 (tiga) kelas kualitas. Singkatan: PI = Perbukitan Intrusi, PPr = Perbukitan Piroklastik, PK = Perbukitan Karst, DA = Dataran Aluvial, DB = Dataran Banjir, DD = Dataran Danau, DP = Dataran Pantai.

Zona kualitas air tanah layak menempati sebagian utara dan sebagian menurun ke bagian selatan, pada Gambar 5, zona kualitas air tanah layak ditandai dengan warna hijau. Secara administrasi zona ini berada di 4 (empat) Kecamatan antara lain Kecamatan Sipatana, Kota Tengah, Kota Utara dan Kota Timur. Zona kualitas air tanah layak memiliki nilai TDS yang sesuai standar dan tidak sesuai standar, namun memiliki nilai DHL, pH, warna, bau, dan rasa yang sesuai standar. Perpaduan nilai ini yang menyebabkan termasuk dalam kelas kualitas air tanah layak. Hal ini dipengaruhi oleh sirkulasi air yang baik pada bagian utara dan timurlaut dataran aluvial, dan bagian barat pada dataran banjir. Dataran aluvial bagian utara dan timur laut belum banyak berinteraksi dengan batuan, dan dataran banjir bagian timur menerima proses pengimbuhan yang terus menerus baik dari air permukaan maupun bawah permukaan. Hal ini didukung oleh posisi dataran banjir bagian barat yang berada di pertemuan tiga sungai yaitu Sungai Bone, Sungai Tamalate, dan Sungai Bolango.

Zona kualitas air tanah cukup layak mendominasi lokasi penelitian yang tersebar di beberapa Kecamatan seperti Kecamatan Sipatana, Duingingi, Kota Selatan, Kota Barat, Hulonthalangi dan Dumbo Raya. Zona ini

ditandai dengan warna kuning (Gambar 5). Zona kualitas air tanah cukup layak ditandai oleh air tanah yang tidak berasa, tidak berbau, tidak berwarna, dan pH ideal, namun memiliki nilai TDS, dan DHL yang tidak sesuai standar. Kualitas air tanah cukup layak disebabkan oleh adanya interaksi air tanah dengan batuan, dan pola pengimbuhan yang terbatas.

Zona kualitas air tanah tidak layak ditandai dengan warna merah (Gambar 5). Zona ini muncul secara lokal dalam bentuk area kecil yang berada di beberapa Kelurahan seperti Kelurahan Tanjung Kramat, Dembe Jaya dan Kelurahan Dulalowo. Zona kualitas air tanah tidak layak ditandai oleh air tidak berasa, tidak berbau, dan tidak berwarna, namun memiliki pH, TDS, dan DHL yang tidak sesuai standar. Hal ini dipengaruhi oleh pepaduan antara adanya interaksi dengan batuan karbonat pada perbukitan karst yang berbatasan dengan dataran pantai dan pengaruh intrusi air laut. Pengaruh intrusi air laut ini tidak terlalu kuat namun mempengaruhi nilai TDS, dan DHL. Sedangkan nilai tinggi pada dua (2) titik di dataran aluvial diinterpretasikan oleh karena adanya pengaruh lokal seperti oleh air stagnan dan adanya endapan organik pada sumur.

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Kualitas air tanah di Kota Gorontalo dipengaruhi oleh faktor geomorfologi, dan pada beberapa kasus dipengaruhi oleh kondisi lokal, meliputi kolom air stagnan, dan intrusi air laut. Nilai TDS dan DHL tidak sesuai standar atau baku mutu ($TDS > 300 \text{ mg/L}$ dan $DHL > 750 \text{ }\mu\text{S/cm}$) banyak dijumpai di perbukitan intrusi, perbukitan piroklastik, perbukitan karst, dataran danau, dataran pantai, sebagian besar dataran aluvial, dan dataran banjir akibat interaksi air tanah dengan batuan. Nilai TDS, dan DHL yang sesuai standar ($TDS < 300 \text{ mg/L}$ dan $DHL < 750 \text{ }\mu\text{S/cm}$) berada pada zona dengan pengimbuhan yang baik akibat dekat dengan air permukaan seperti pertemuan Sungai Bone, Sungai Bolango, dan Sungai Tamalate. Nilai pH tidak sesuai standar ($> 8,5$) di dataran pantai dan 1 (satu) titik ada di dataran aluvial dipengaruhi oleh interaksi dengan batuan karbonat serta aktivitas antropogenik.

Peta kualitas air tanah berbasis SIG menunjukkan gradasi dari layak di bagian utara-timur menuju cukup dan tidak di bagian tengah dan selatan yang dipengaruhi oleh interaksi dengan batuan pada daerah perbukitan, dan kurangnya pola pengimbuhan. Dengan demikian, kualitas air tanah terbaik terkonsentrasi pada unit geomorfologi dataran (aluvial dan banjir) di utara dan timur Kota Gorontalo yang termasuk ke dalam kelas layak.

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa rekomendasi yang dapat dijadikan saran yaitu prioritas pengelolaan pada unit geomorfologi dataran, pemantauan kualitas air tanah secara berkala, dan riset lanjutan perlu dilakukan. Prioritas pengelolaan pada dataran rendah seperti dataran aluvial, dataran banjir, dataran danau, dan dataran pantai penting dilakukan melalui pengelolaan limbah yang memadai, pembatasan eksploitasi air tanah, dan tidak memperluas area kedap air yang menghambat infiltrasi.

Pemantauan kualitas air tanah atas parameter fisik-kimia air tanah secara berkala pada setiap unit geomorfologi diperlukan untuk mendeteksi tren degradasi kualitas air tanah sehingga membantu penilaian kebijakan mitigasi. Riset ke depan juga harus memasukkan evaluasi kualitas air tanah berdasarkan tata guna lahan untuk melihat dampak antropogenik. Riset lanjutan berbasis model kuantitatif disarankan untuk pengembangan model indeks kerentanan misalnya menggunakan metode DRASTIC dan metode SVV dengan parameter seperti kedalaman muka air tanah, imbuhan air tanah, media akuifer, media tanah, kemiringan (topografi), dampak zona tidak jenuh, konduktivitas hidrolik, dan jenis lapisan.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Republik Indonesia melalui beasiswa Program Magister.

DAFTAR PUSTAKA

- Apandi, T., & Bachri, S. (1997). Peta geologi Lembar Kotamobagu, Sulawesi skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Aleem, M., Shun, C. J., Li, C., Aslam, A. M., Yang, W., Nawaz, M. I., Ahmed, W. S., & Buttar, N. A. (2018). Evaluation of Groundwater Quality in the Vicinity of Khurrianwala Industrial Zone, Pakistan. *Water*, 10(10), 1321. <https://doi.org/10.3390/w10101321>
- Algiffari, M. F., Martosenjoyo, T., Beddu, S., & Ishak, R. A. (2025). Analisis Fungsi dan Daya Dukung Lahan: Pembangunan Berkelanjutan Kota Gorontalo. *Jurnal Vokasi Sains Dan Teknologi*, 5(1), 53–63. <https://doi.org/10.56190/jvst.v5i1.105>
- Armanuos, A. M., Valeriano, O. C. S., & Negm, A. (2016). Groundwater Quality Investigation Using Multivariate Analysis — Case Study: Western Nile Delta Aquifer, Egypt. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2016.v7.732>
- Bachri, S., Sukido, & Ratman, N. (1993). Peta Geologi Lembar Tilamuta, Sulawesi (Geological Map of Tilamuta Sheet, Sulawesi). Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Badan Informasi Geospasial. (2018). Seamless Digital Elevation Model (DEM) dan Batimetri Nasional. Retrieved from, <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/>
- BPS (2026). Gorontalo dalam Angka 2025. Gorontalo: Badan Pusat Statistik Kota Gorontalo.
- Brahmantyo, B., & Bandono. (2006). Klasifikasi bentuk muka bumi (landform) untuk pemetaan geomorfologi pada skala 1: 25.000 dan aplikasinya untuk penataan ruang. *Jurnal Geoaplika*, 1(2), 71–79.
- Bridget, U., Chukwuemeka, I. C., Emmanuel, A. E., Nkiru, N. C., Juliana, O. I., Osita, I. P., Ifeanyi, O. S., Okechukwu, O. S., & Iheanyichukwu, O. A. (2024). Hydrogeological assessment and contaminant transport modelling of Enyimba landfill site in Aba, Nigeria. *Water Practice & Technology*. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.122>
- Camara, M., Jamil, N. R., & Abdullah, A. F. B. (2019). Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review. *Ecological Processes*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0164-x>
- Carstensen, J., & Duarte, C. M. (2019). Drivers of pH Variability in Coastal Ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 53(8), 4020–4029. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03655>
- Cartwright, I., Hall, S., Tweed, S., & Leblanc, M. (2009). Geochemical and isotopic constraints on the interaction between saline lakes and groundwater in southeast Australia. *Hydrogeology Journal*, 17(8), 1991–2004. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0492-5>
- Chacha, N., Muzuka, A. N. N., Njau, K. N., & Lugomela, G. V. (2018). Hydrogeochemical characteristics and spatial distribution of groundwater quality in Arusha well fields, Northern Tanzania. *Applied Water Science*, 8(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0760-4>
- Chilton, D., Brookes, J., Nagelkerken, I., Reid, R., Sheaves, M., Waltham, N. J., Cook, P., Hamilton, D. P., & Hipsey, M. R. (2021). Environmental Flow Requirements of Estuaries: Providing Resilience to Current and Future Climate and Direct Anthropogenic Changes. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.764218>
- Danert, K., & Healy, A. (2021). Monitoring Groundwater Use as a Domestic Water Source by Urban Households: Analysis of Data from Lagos State, Nigeria and Sub-Saharan Africa with Implications for Policy and Practice. *Water*, 13(4), 568. <https://doi.org/10.3390/w13040568>
- Daskalaki, P., & Voudouris, K. (2007). Groundwater quality of porous aquifers in Greece: a synoptic review. *Environmental Geology*, 54(3), 505–513. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0843-2>
- Fadillah, A., Harijoko, A., Hendrayana, H., Wibowo, H. E., Baud, B., Lachassagne, P., ... & Dörfliger, N. (2023). Hydrogeological interpretation using electrical resistivity tomography: methodology and conceptual model in andesitic volcanic context. *GEOMATE Journal*, 24(106), 25–36. <https://doi.org/10.21660/2023.106.3728>
- Fenta, M. C., Anteneh, Z. L., Szanyi, J., & Walker, D. (2020). Hydrogeological framework of the volcanic aquifers and groundwater quality in Dangila Town and the surrounding area, Northwest Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100408. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100408>
- Ferchichi, H., Farhat, B., Ben Hamouda, M. F., & Ben Mammou, A. (2018). Assessment of groundwater salinity using GIS and multivariate statistics in a coastal Mediterranean aquifer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(11), 2473–2492. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1767-y>

- Furtak, K., Marzec-Grządziel, A., Gawryjolek, K., & Niedźwiecki, J. (2024). The Influence of Human Agricultural Activities on the Quality of Selected Fluvisols from the Vistula River Valley, Poland—Preliminary Research. *Agronomy*, 14(3), 480. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030480>
- Gabor, R. S., Hall, S. J., Jameel, Y., Neilson, B. T., Stout, T., Gelderloos, A., Tennant, H., Barnes, M. L., Bowen, G. J., Millington, M., Brooks, P. D., & Eiriksson, D. P. (2017). Persistent Urban Influence on Surface Water Quality via Impacted Groundwater. *Environmental Science & Technology*, 51(17), 9477–9487. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.7b00271>
- Gao, X., Wang, W., Li, C., & Li, X. (2020). Human Activity and Hydrogeochemical Processes Relating to Groundwater Quality Degradation in the Yuncheng Basin, Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 867. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030867>
- Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), 549–559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>
- Harun, B., Arifin, Y. I., & Manyoe, I. N. (2022). Karakteristik Geomorfologi Daerah Posso Kabupaten Gorontalo Utara dan Sekitarnya. *Jambura Geoscience Review*, 4(2), 145–157. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v4i2.12712>
- Hayes, P., Gonzalez, S., Gornall, D., Morris, R., La Croix, A. D., Wang, J., Harfoush, A., Pearce, J., Helm, L., He, J., Moser, A., & Nicol, C. (2019). Enhancing geological and hydrogeological understanding of the Precipice Sandstone aquifer of the Surat Basin, Great Artesian Basin, Australia, through model inversion of managed aquifer recharge datasets. *Hydrogeology Journal*, 28(1), 175–192. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02079-9>
- Jiang, Y., & Rohendi, A. (2018). Domestic water supply, residential water use behaviour, and household willingness to pay: The case of Banda Aceh, Indonesia after ten years since the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Environmental Science & Policy*, 89, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.07.006>
- Jiang, Y., Zhang, Y., He, Q., Yuan, D., & Cao, M. (2018). Hydrogeological characterization and environmental effects of the deteriorating urban karst groundwater in a karst trough valley: Nanshan, SW China. *Hydrogeology Journal*, 26(5), 1487–1497. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1729-y>
- Kanyerere, T., Levy, J., Saka, J., & Xu, Y. (2012). Assessment of microbial contamination of groundwater in upper Limphasa River catchment, located in a rural area of northern Malawi. *Water SA*, 38(4). <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i4.14>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Parameter Fisik dalam Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2010. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Kumar, N., Kusche, J., Tischbein, B., Bogardi, J. J., & Beg, M. K. (2017). Impact of land-use change on the water resources of the Upper Kharun Catchment, Chhattisgarh, India. *Regional Environmental Change*, 17(8), 2373–2385. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1165-x>
- Kumari Yadav, S. (2023). Land Cover Change and Its Impact on Groundwater Resources: Findings and Recommendations. *Intechopen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110311>
- Lapworth, D. J., Nkhuwa, D. C. W., Okotto-Okotto, J., Pedley, S., Stuart, M. E., Tijani, M. N., & Wright, J. (2017). Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: current status and implications for water security and public health. *Hydrogeology Journal*, 25(4), 1093–1116. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1516-6>
- Lihawa, F., Mahmud, M., & Saleh, Y. (2013). Laporan pemantauan pelaksanaan upaya pengelolaan lingkungan hidup PLTD Telaga Gorontalo. PT PLN (Persero) Area Gorontalo.
- Mahmud, M., Womtami, R., Husnan, R., & Saleh, K. (2023). Evaluasi parameter fisik, kimia dan mikrobiologi air sumur bor sebagai sumber air bersih di kompleks perumahan solaria kota Gorontalo. *Jurnal Reka Lingkungan*, <http://dx.doi.org/10.26760/rekalingkungan.v11i1.25-36>
- Manyoe, I. N., Pongoliu, Y. I., & Napu, S. S. S. (2022). Geosite and geomorphosite assessment for geotourism purpose: Case study of the islands in Kwandang Bay, North Gorontalo. *Tunas Geografi*, 11(1), 11–18. <https://doi.org/10.24114/tgeo.v11i1.31005>

- Mamonto, F. K., Arifin, Y. I., Akase, N., & Manyoe, I. N. (2024). Karakteristik Geomorfologi Daerah Ayuhulalo Dan Sekitarnya Kecamatan Tilamuta, Kabupaten Boalemo. *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, 3(1), 51-61. <https://doi.org/10.34312/Jage.v3i1.26918>
- Minderhoud, P. S. J., Erban, L., Stouthamer, E., Erkens, G., Bui, V. T., Kooi, H., & Pham, V. H. (2017). Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7146>
- Nagaraju, A., Muralidhar, P., & Sreedhar, Y. (2016). Hydrogeochemistry and Groundwater Quality Assessment of Rapur Area, Andhra Pradesh, South India. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 04(04), 88-99. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.44012>
- Narisetty, N. G., Matijević, H., Kanga, S., Kumar, P., Đurin, B., Tripathi, G., Meraj, G., & Singh, S. K. (2023). Integrated Multi-Model Approach for Assessing Groundwater Vulnerability in Rajasthan's Semi-Arid Zone: Incorporating DRASTIC and SINTACS Variants. *Hydrology*, 10(12), 231. <https://doi.org/10.3390/hydrology10120231>
- Panghal, V., & Bhateria, R. (2020). A multivariate statistical approach for monitoring of groundwater quality: a case study of Beri block, Haryana, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(7), 2615-2629. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00654-8>
- Permana, A. (2019). Analisis Kedalaman dan Kualitas Air Tanah di Kecamatan Hulonthalangi Kota Gorontalo. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(1), 15-22. <https://doi.org/10.14710/jil.17.1.15-22>
- Rachman, A. P., Rompis, S. Y., & Timboeleng, J. A. (2020). Analisis Pengaruh Tata Guna Lahan Terhadap Kinerja Jalan di Kota Gorontalo. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 10(1).
- 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(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11477-6>
- Redwan, M., Amra, M. A., & Abdel Moneim, A. A. (2016). Effect of water-rock interaction processes on the hydrogeochemistry of groundwater west of Sohag area, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2). <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2042-x>
- Roman Quintero, D. C., Damiano, E., Olivares, L., & Greco, R. (2024). Mechanical and hydraulic properties of unsaturated layered pyroclastic ashes in landslide-prone areas of Campania (Italy). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(7) <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03783-x>
- Salvadori, M., Pennisi, M., Masciale, R., Fidelibus, M. D., Frollini, E., Ghergo, S., Parrone, D., Preziosi, E., & Passarella, G. (2024). Isotopic study for evaluating complex groundwater circulation patterns, hydrogeological zoning, and water-rock interaction in a Mediterranean coastal karst environment. *Science of the Total Environment*, 955, 176850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176850>
- Sen, Z. (2015). *Practical and Applied Hydrogeology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14020-2>
- Sukrisno, 1983. *Peta Hidrogeologi Indonesia, skala 1:250.000*, Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Bandung.
- Sumarjis, S. A., Arifin, Y. I., Hutagalung, R., Akase, N., & Manyoe, I. N. (2023). Bentuk Lahan Geomorfologi Di Daerah Gunungapi Ambang, Bolaang Mongondow Timur. *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, 2(1), 46-56. <https://doi.org/10.34312/jage.v2i1.19405>
- Takem, G. E., Ayonghe, S. N., Thambidurai, P., & Chandrasekharam, D. (2009). Pollution characteristics of alluvial groundwater from springs and bore wells in semi-urban informal settlements of Douala, Cameroon, Western Africa. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0342-8>
- Tiwari, K., Goyal, R., & Sarkar, A. (2017). GIS-Based Spatial Distribution of Groundwater Quality and Regional Suitability Evaluation for Drinking Water. *Environmental Processes*, 4(3), 645-662. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0257-4>
- Uddin, M. G., Nash, S., Rahman, A., & Olbert, A. I. (2022). A comprehensive method for improvement of water quality index (WQI) models for coastal water quality assessment. *Water Research*, 219, 118532. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118532>
- Van Zuidam, R.A. (1985) *Aerial Photo-Interpretation Terrain Analysis and Geomorphology Mapping*. Smits Publishers, The Hague, 442 p.
- Vasu, D., Tiwary, P., Ray, S. K., Singh, S. K., Chandran, P., & Duraisami, V. P. (2016). Pedogenic processes and soil-landform relationships for identification of yield-limiting soil properties. *Soil Research*, 55(3), 273. <https://doi.org/10.1071/SR16111>

- World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. World Health Organization.
- Wang, H., Gao, D.-W., & Liang, H. (2017). Occurrence and risk assessment of phthalate esters (PAEs) in agricultural soils of the Sanjiang Plain, northeast China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(24), 19723–19732. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9646-5>
- Wootton, J. T., & Pfister, C. A. (2012). Carbon System Measurements and Potential Climatic Drivers at a Site of Rapidly Declining Ocean pH. *PLoS ONE*, 7(12), e53396. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053396>
- Zhang, Y., Wu, J., & Xu, B. (2018). Human health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Jinghui canal irrigation area of the loess region, northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 77(7). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7456-9>
- Zhu, Y.-L., Zheng, G.-D., Gao, D., Chen, T.-B., Wu, F.-K., Niu, M.-J., & Zou, K.-H. (2016). Odor composition analysis and odor indicator selection during sewage sludge composting. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(9), 930–940. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1188865>