

## Analisis Salinitas Air Sumur sebagai Indikator Intrusi Air Laut di Pesisir Karst Gunungkidul

Tsaqifa Dina Kamila<sup>1\*</sup>, Uchsin 'Usyaqi 'Athiyya<sup>2</sup>, Toni Rahmanto<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, MAS Darul Qur'an, Jl. Nusantara No.17, Ledoksari, Kepek, Wonosari, Gunungkidul, DIY, Indonesia  
Email Correspondent : [shineofwinter@gmail.com](mailto:shineofwinter@gmail.com)

### Abstract

*The coastal karst region of Gunungkidul has unique aquifer characteristics with high porosity and permeability, making it vulnerable to seawater intrusion. This study analyzed groundwater salinity as an indicator of seawater intrusion in the coastal karst aquifer around Sundak and Sadranan Beaches, Tepus District. Using a quantitative descriptive-analytical approach, groundwater samples were taken from 14 resident wells at varying distances from the coastline. Parameters measured included salinity, Total Dissolved Solids (TDS), Electrical Conductivity (EC), pH, and temperature. The results of salinity measurements in the 14 resident wells showed an average salinity value of 0.797 ppt and TDS of 797.43 mg/L. The analysis results showed that 86% (12 wells) were classified as unintruded, while 7% (1 well) each indicated mild intrusion and 7% indicated moderate intrusion. Interestingly, the salinity level was not always directly proportional to the distance from the coastline; Several wells inland showed higher salinity than those closer to the coast. This phenomenon is driven by the heterogeneous characteristics of the karst aquifer and local pumping activity that affects the hydrostatic balance. These findings provide a foundation for sustainable coastal groundwater monitoring and management in the region*

**Keywords:** *coastal karst aquifer, groundwater salinity, Gunungkidul, seawater intrusion, Sundak and Sadranan beach*

### Abstrak

Wilayah karst pesisir Gunungkidul memiliki karakteristik akuifer unik dengan porositas dan permeabilitas tinggi, menjadikannya rentan terhadap intrusi air laut. Studi ini menganalisis salinitas air tanah sebagai indikator intrusi air laut di akuifer karst pesisir sekitar Pantai Sundak dan Sadranan, Kecamatan Tepus. Menggunakan pendekatan deskriptif-analitis kuantitatif, sampel air tanah diambil dari 14 sumur penduduk dengan jarak yang bervariasi dari garis pantai. Parameter yang diukur meliputi salinitas, *Total Dissolved Solids* (TDS), *Electrical Conductivity* (EC), pH, dan suhu. Hasil pengukuran salinitas di 14 sumur warga menunjukkan nilai rata-rata salinitas sebesar 0,797 ppt dan TDS 797,43 mg/L. Hasil analisis menunjukkan sebesar 86% (12 sumur) tergolong tidak terintrusi, sementara masing-masing 7% (1 sumur) menunjukkan indikasi intrusi ringan dan 7% terindikasi intrusi sedang. Menariknya, tingkat salinitas tidak selalu berbanding lurus dengan jarak dari garis pantai; beberapa sumur di daratan yang lebih dalam menunjukkan salinitas yang lebih tinggi daripada sumur yang lebih dekat ke pantai. Fenomena ini didorong oleh karakteristik heterogen dari akuifer karst dan aktivitas pemompaan lokal yang memengaruhi keseimbangan hidrostatik. Temuan ini memberikan landasan awal bagi pemantauan dan pengelolaan air tanah pesisir yang berkelanjutan di wilayah tersebut.

**Kata Kunci:** akuifer karst, Gunungkidul, intrusi air laut, Pantai Sundak dan Sadranan, salinitas air tanah

### PENDAHULUAN

Wilayah pesisir Gunungkidul didominasi oleh litologi karbonat dengan sistem akuifer karst yang sangat heterogen (Widura & Mardiatno, 2022). Karakteristik

tanah yang tipis disertai tingginya konektivitas pori batuan menyebabkan infiltrasi permukaan langsung masuk ke sistem karst; akibatnya, kapasitas penyimpanan air tanah menjadi sangat

terbatas meskipun alirannya relatif cepat (Cahyadi et al., 2024). Akuifer terbuka ini juga menciptakan jalur konektivitas hidrolik langsung antara air tanah bebas dengan perairan laut (Fleury et al., 2007). Dinamika tersebut menyebabkan muka air tanah mudah berfluktuasi secara nonlinier akibat tekanan antropogenik, khususnya pemompaan intensif selama musim kemarau yang dengan cepat menurunkan tekanan hidrostatik menahan air asin (Wu et al., 2023). Kondisi ini memicu kerentanan alami yang tinggi terhadap fenomena intrusi air laut di sepanjang pesisir Gunungkidul.

Minimnya sumber air permukaan yang stabil menyebabkan masyarakat setempat sangat bergantung pada pemanfaatan akuifer melalui sumur gali dan sumur bor untuk memenuhi kebutuhan domestik, sanitasi, dan pertanian (Herlina & Diyono, 2020). Peningkatan aktivitas antropogenik dan pesatnya perkembangan sektor pariwisata pesisir saat ini mempercepat ancaman degradasi kualitas air (Paladan et al., 2025). Secara global, intrusi air laut pada sistem karst terbukti memicu peningkatan salinitas secara masif yang menurunkan kesuburan tanah, menginduksi stres fisiologis tanaman, dan merusak infrastruktur domestik akibat sifat korosifnya (Rachman et al., 2018; Qothrunnada et al., 2023). Pemantauan fluktuasi kualitas air (TDS, EC, dan pH) secara berkala menjadi instrumen mitigasi dini yang krusial sebelum dampak sosio-ekonomi merugikan ini meluas ke rumah tangga petani dan pelaku wisata (Ariyanto & Mardiyanto, 2016).

Meskipun urgensi mitigasi telah diketahui, pemetaan risiko intrusi air laut di wilayah karst pesisir Gunungkidul sejauh ini masih sering bertumpu pada generalisasi

spasial yang mengabaikan variabilitas lokal. Penelitian terdahulu umumnya mengkaji intrusi pada akuifer berpori seragam, sedangkan studi komparatif berskala mikro yang membedakan dampak intrusi pada sumur gali (air tanah bebas) dan sumur bor (air tanah tertekan) di ekosistem karst yang heterogen masih sangat terbatas. Ketiadaan data spasial aktual berbasis integrasi parameter hidrogeokimia (salinitas, EC, TDS) antar-jenis sumur ini menimbulkan celah informasi (*research gap*) yang signifikan. Akibatnya, pemerintah daerah dan masyarakat kesulitan merumuskan zonasi pemanfaatan air bersih dan strategi pembuatan sumur yang presisi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memetakan sebaran spasial indikator salinitas pada sumur gali dan sumur bor guna mengidentifikasi zona kritis risiko intrusi air laut secara adaptif dan terarah di pesisir Gunungkidul.

## METODE

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-analitis. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menyajikan visualisasi data rona awal kualitas air tanah pada setiap titik sampling. Pendekatan analitis diterapkan untuk mengkaji variasi nilai parameter hidrogeokimia terhadap jarak spasial sumur dari garis pantai guna mendeteksi kecenderungan intensitas intrusi air laut. Penelitian ini bersifat eksploratif tanpa melakukan manipulasi variabel terhadap objek di lapangan.

Penelitian dilaksanakan di MA Darul Qur'an. Adapun rincian tempat dan waktu penelitian sebagai berikut:

**Tabel 1.** Waktu dan Tempat Penelitian

| No | Tahapan Penelitian  | Waktu Pelaksanaan                  | Tempat Pelaksanaan                 |
|----|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1. | Tahap Persiapan     | 7 – 20 November 2025               | MA Darul Qur'an/Pondok pesantren   |
| 2. | Tahap Perencanaan   | 21 November – 26 Desember 2025     | MA Darul Qur'an/Pondok pesantren   |
| 3. | Tahap Pelaksanaan 1 | 27 Desember 2025 – 02 Januari 2026 | Pantai Sundak-Sadranan Gunungkidul |
| 4. | Tahap Pelaksanaan 2 | 27 Desember 2025 – 02 Januari 2026 | MA Darul Qur'an/Pondok pesantren   |

Dalam penelitian ini, populasi yang ditetapkan mencakup seluruh air tanah dangkal (akuifer bebas) dan air tanah dalam (akuifer tertekan) yang diakses melalui sumur warga di sekitar kawasan Pantai Sundak dan Pantai Sadranan. Dari populasi tersebut, sampel ditentukan sebanyak 14 titik sumur milik warga meliputi kombinasi sumur galian untuk akuifer bebas dan sumur bor untuk akuifer tertekan dengan kedalaman berkisar antara 18 hingga 20 meter. Penarikan sampel menggunakan metode *purposive sampling*, di mana kriteria penentuan titik didasarkan pada sumur yang masih aktif digunakan untuk kebutuhan domestik, posisi geografis yang membentuk pola transek tegak lurus dari garis pantai ke arah daratan untuk melihat variabilitas intrusi, serta mempertimbangkan keterjangkauan dan keamanan lokasi pengambilan sampel.

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: TDS/EC/pH meter digital sebanyak 1 unit, refraktometer salinitas sebanyak 1 unit, Global Positioning System (GPS) sebanyak 1 unit, akuades sebanyak 5 liter, serta botol sampel sebanyak 14 pcs.

Guna menjamin akurasi dan validitas data numerik yang dihasilkan selama proses pengukuran di lapangan ataupun penelitian di laboratorium, prosedur kontrol kualitas (*quality control*) terhadap instrumen alat ukur

dilakukan melalui dua tahapan yang ketat dan sistematis yaitu:

1. Kalibrasi Mekanis: *Water quality* meter digital dikalibrasi menggunakan larutan standar buffer pH (pH 4,01; 7,00; dan 10,01) serta larutan standar konduktivitas (EC). *Salinity refractometer* dikalibrasi menggunakan akuades murni hingga menunjukkan skala tepat di angka 0 ‰ (ppt) sebelum dibawa ke lapangan.
2. Reliabilitas Pengukuran: Pengukuran *ex-situ* untuk setiap parameter kimia pada satu botol sampel dilakukan dengan skema *replicate measurement* (pengulangan pengukuran sebanyak 3 kali). Nilai akhir yang dicatat dalam tabel tabulasi adalah nilai rata-rata (*mean*) dari ketiga uji ulangan tersebut untuk meminimalisasi kesalahan acak (*random error*).

Tahapan pengumpulan data dan prosedur lapangan sebagai berikut:

1. Pengambilan Sampel: Air sumur galian diambil menggunakan metode penimbaan langsung, sedangkan air sumur bor diambil melalui keran pipa pompa yang telah dialirkan selama 2–3 menit terlebih dahulu agar mendapatkan air formasi akuifer yang representatif.
2. Pewadahan & Penglabelan: Sampel dimasukkan ke dalam botol steril berukuran penuh (tanpa menyisakan ruang udara/headspace untuk mencegah oksidasi), ditutup rapat, dan diberi kode identitas mencakup nomor sumur, jenis sumur, koordinat GPS, serta waktu sampling.
3. Pengujian *Ex-Situ*: Parameter Fisika-Kimia diukur segera di laboratorium mini lapangan. Suhu, pH, TDS, dan EC diukur dengan mencelupkan probe *water quality*

meter. Salinitas diukur dengan meneteskan 2-3 tetes sampel air pada prisma salinity refractometer. Sensor dibilas menggunakan akuades dan dikeringkan setiap kali berganti sampel.

Teknik analisis data dilakukan terhadap data numerik yang diperoleh dari hasil pengujian laboratorium lapangan dianalisis secara bertahap melalui sistem berikut:

#### 1. Tabulasi Data Spasial

Data mentah lapangan ditabulasi ke dalam matriks matriks data tunggal. Komponen baris diurutkan secara sekuensial berdasarkan jarak absolut sumur terhadap garis pantai (mulai dari sumur terdekat hingga terjauh ke arah darat). Struktur tabel memuat kolom koordinat, jarak (meter), jenis sumur (gali/bor), suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH, EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), TDS (mg/L), dan Salinitas ( $\%$  atau ppt).

#### 2. Klasifikasi Tingkat Salinisasi / Intrusi Air Laut

Penentuan status tingkat intrusi air laut didasarkan pada konversi baku mutu ilmiah salinitas air tanah (skala part per thousand/ppt atau  $\%$ ). Klasifikasi mengacu pada standar modifikasi hidrologi sebagai berikut:

- Air tawar :  $< 1 \%$  (ppt)
- Air agak payau :  $1,00 - 3,00 \%$  (ppt)
- Air payau :  $3,00 - 10 \%$  (ppt)
- Air asin :  $10.000 - 35.000 \%$  (ppt)
- Air sangat asin :  $>35.000 \%$  (ppt)

#### 3. Analisis Komparatif Fisika-Kimia Lintas Akuifer

Melakukan analisis deskriptif untuk memperbandingkan karakteristik nilai rata-rata TDS, EC, pH, dan salinitas antara kelompok sumur galian (akuifer dangkal/bebas) dengan sumur bor (akuifer dalam/tertekan). Langkah ini bertujuan membuktikan hipotesis mengenai perbedaan

respons sensitivitas tipe kedalaman sumur terhadap intrusi di sistem karst.

#### 4. Analisis Tren Jarak Spasial

Data jarak sumur dibandingkan terhadap fluktuasi nilai salinitas dan TDS kemudian dianalisis untuk menyimpulkan seberapa jauh jangkauan pelebaran batas hidrostatik air asin (*saltwater wedge*) merembes dari bibir pantai Sundak Sadranan menuju daratan pemukiman.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Data Lapangan dan Spasial

Lokasi penelitian berada di dusun Pule Gundes II, desa Sidoharjo, kec. Tepus, Gunungkidul, Yogyakarta. Daerah ini berada di titik koordinat  $-8 \text{ LS}$  dan  $110,6 \text{ BT}$ . Wilayah ini berada pada kawasan karst berbukit kapur yang tidak memiliki sungai permanen, sehingga ketersediaan air bersih sangat bergantung pada air hujan dan sering mengalami kekurangan air pada musim kemarau. Kondisi tersebut menyebabkan wilayah ini rentan terhadap kekeringan musiman yang berdampak pada kebutuhan domestik dan pertanian masyarakat.

Karakteristik lereng kapur yang relatif curam dan minim penutup vegetasi meningkatkan potensi bahaya geologi, terutama longsor, sehingga memerlukan perhatian dalam aspek mitigasi bencana. Di sisi lain, kedekatan dengan kawasan pesisir dan berkembangnya aktivitas wisata memberikan potensi ekonomi sekaligus tantangan baru dalam pengelolaan sumber daya air dan limbah, sehingga diperlukan strategi pengelolaan lingkungan yang terintegrasi dan berkelanjutan.

### 1. Deskripsi Sebaran Kadar Garam (Salinitas)

Sampel diambil dari 14 sumur-sumur gali atau sumur bor warga dusun Pule Gundes II. Sampel diambil menggunakan botol yang sudah diberi label identitas sumur dan dikumpulkan untuk kemudian diukur setiap parameternya (TDS, EC, pH, dan Salt) menggunakan *water quality meter* dan *salinity refractometer*. Kedua alat dikalibrasi sesuai petunjuk untuk memastikan hasil pengukuran konsisten, akurat, dan memenuhi standar nasional maupun internasional.. Cara kerja *water quality meter* diawali dengan mencelupkan sensor ke dalam sensor air, kemudian sensor akan mendeteksi karakteristik listrik dan kimia air tersebut.

Pengukuran pH dilakukan dengan elektroda pH yang mendeteksi aktivitas ion hidrogen dalam air untuk menentukan tingkat keasaman atau kebasaaan suatu sampel. Sementara itu, pengukuran TDS dan EC bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas listrik dimana semakin banyak zat terlarut dalam air maka semakin tinggi daya hantar listriknya. Sensor EC mengirimkan arus listrik AC frekuensi rendah diantara dua elektroda dalam cairan. Nilai EC yang terukur kemudian dikonversi menjadi nilai TDS menggunakan faktor konversi tertentu. Hasil pengukuran digital memudahkan pemantauan kondisi air secara cepat dan akurat.

*Salinity refractometer* merupakan alat untuk mengukur tingkat salinitas air berdasarkan pinsip pembiasan cahaya.. Perbedaan konsentrasi garam terlarut dalam air menyebabkan perubahan indeks bias cahaya dimana semakin tinggi kadar salinitas, semakin besar nilai indeks bias yang dihasilkan. Perubahan indeks bias ini

selanjutnya dikonversikan secara langsung menjadi nilai salinitas melalui skala atau sistem optik yang telah dikalibrasi. Hasil pengukuran dapat dibaca secara visual melalui okuler, sehingga memungkinkan penentuan air secara efisien untuk keperluan penelitian ilmiah.

Nilai salinitas yang diukur menggunakan refraktometer memiliki hubungan pendekatan dengan TDS, yaitu 1 ppt setara dengan 1000 ppm. Dalam penelitian ini, TDS digunakan sebagai parameter pendukung untuk memperkirakan salinitas. Namun, konversi ini bersifat tidak mutlak karena TDS mencerminkan total zat terlarut, bukan hanya garam, sehingga dipengaruhi oleh komposisi kimia air. Hasil pengukuran lapangan menunjukkan variasi salinitas pada tiap sumur warga pesisir Gunungkidul, dengan beberapa lokasi memiliki nilai yang menyimpang signifikan dari kondisi normal air tawar ( $\approx 0$  ppt). Data hasil pengukuran tersebut disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Data Hasil Pengukuran Salt, dan pH.

| Sampel ke-    | Salt         | pH          |
|---------------|--------------|-------------|
| S1            | 0,336        | 7,06        |
| S2            | 0,319        | 6,87        |
| S3            | 0,296        | 6,98        |
| S4            | 0,351        | 6,93        |
| S5            | 0,351        | 7,33        |
| S6            | 0,285        | 7,98        |
| S7            | 0,573        | 7,34        |
| S8            | 1,304        | 7,24        |
| S9            | 0,338        | 6,96        |
| S10           | 5,324        | 6,93        |
| S11           | 0,352        | 7,21        |
| S12           | 0,769        | 7,16        |
| S13           | 0,256        | 7,44        |
| S14           | 0,310        | 7,59        |
| <b>Rerata</b> | <b>0,797</b> | <b>7,22</b> |

Data pada tabel menunjukkan bahwa nilai kadar garam (*salt*) dari 14 sampel yang diteliti mempunyai nilai yang bervariasi.

Terdapat fluktuasi nilai kadar garam dengan rentan nilai antara 0,256‰ hingga 5,324‰, serta nilai rata-rata (*rerata*) sebesar 0,797‰. Keadaan tersebut mengindikasikan bahwa air sumur belum mengalami intrusi yang signifikan. Jika ditinjau dari nilai derajat keasaman, air sumur cenderung memiliki nilai pH yang relatif stabil pada rentan nilai 6,87 hingga 7,98 dan nilai rata-rata sebesar 7,22. Data tersebut menunjukkan air sumur di daerah pesisir pantai berada pada kategori netral hingga agak basa. Secara keseluruhan nilai pH air memenuhi baku mutu air bersih.

**Tabel 3.** Data Hasil Pengukuran *Total Dissolved Solids, Electrical conductivity, Salt*, dan pH.

| Sampel (S)    | Jarak dari Pantai (m) | TDS (ppm)     | EC (ppt)     |
|---------------|-----------------------|---------------|--------------|
| S1            | 650                   | 336           | 675          |
| S2            | 602                   | 319           | 638          |
| S3            | 564,5                 | 296           | 603          |
| S4            | 527                   | 351           | 703          |
| S5            | 467                   | 351           | 703          |
| S6            | 440                   | 285           | 570          |
| S7            | 110                   | 573           | 1.147        |
| S8            | 127                   | 1.304         | 2.609        |
| S9            | 85                    | 338           | 676          |
| S10           | 109                   | 5.324         | >9.999       |
| S11           | 109                   | 352           | 704          |
| S12           | 345                   | 769           | 1.562        |
| S13           | 764                   | 256           | 512          |
| S14           | 845                   | 310           | 620          |
| <b>Rerata</b> | <b>410,321</b>        | <b>797,43</b> | <b>849,5</b> |

Berdasarkan data pada tabel, ditemukan bahwa nilai TDS tertinggi terdapat pada sumur 10 dengan nilai 5.324 mg/L, nilai TDS terendah pada sumur 13 dengan nilai 256 mg/L. Nilai rata-rata TDS di seluruh sumur sampel menyentuh 797,43 mg/L. sampel diambil dengan berbagai macam karakter sumur, mulai dari sumur untuk konsumsi pribadi sehari-hari, kebutuhan pariwisata hingga sumur khusus untuk pertanian. Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kenaikan kadar garam

mengindikasikan pergerakan air laut ke dalam akuifer air tanah. Parameter salinitas merefleksikan peningkatan ion terlarut, terutama klorida dan natrium, yang umum terjadi saat intrusi air laut. Temuan ini diperkuat oleh perbandingan dengan ambang batas air tawar (<500 mg/L TDS), sehingga salinitas dapat digunakan sebagai proksi awal degradasi kualitas air tanah.

Meskipun jarak sumur terhadap garis pantai relatif berdekatan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar garam air tanah pada beberapa titik berbeda cukup jauh. Sumur-sumur pada kisaran jarak sekitar 85–127 meter dari pantai memiliki nilai salinitas yang bervariasi, mulai dari rendah hingga sangat tinggi. Perbedaan kadar garam tersebut diduga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan setempat, seperti perbedaan kedalaman sumur, jenis batuan penyusun, serta adanya rekahan atau saluran air alami pada batuan karst yang memungkinkan air laut masuk secara tidak merata. Selain itu, aktivitas pengambilan air tanah secara intensif juga dapat memengaruhi pergerakan air asin ke dalam akuifer. Dengan demikian, intrusi air laut pada daerah penelitian tidak selalu terjadi secara seragam, tetapi dapat berbeda pada setiap titik pengamatan akibat karakteristik akuifer.

## 2. Identifikasi Status Intrusi

Klasifikasi tingkat intrusi air laut merujuk pada konsentrasi salinitas dan *Electrical Conductivity* (EC) sampel air. Nilai EC menunjukkan jumlah ion terlarut yang meningkat seiring bertambahnya kandungan garam. Sumur dengan kadar klorida di atas 250 mg/L dikategorikan terintrusi karena klorida adalah komponen air laut yang stabil dan sulit bereaksi. Penentuan status ini krusial untuk memantau

pencemaran serta dasar perlindungan sumber daya air pesisir. Data tingkat intrusi menurut PAHIAA (1986) dalam Putra et al. (2023) disajikan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Baku Mutu Air Tanah

| Kualitas    | TDS (mg/L)    | EC ( $\mu$ S/cm) | Salt (ppt)  |
|-------------|---------------|------------------|-------------|
| Tawar       | <1.000        | <1.500           | <1,00       |
| Agak payau  | 1000-3.000    | 1.500-5.000      | 1,00-3,00   |
| Payau       | 3.000-10.000  | 5.000-15.000     | 3,00-10,00  |
| Asin        | 10.000-35.000 | 15.000-50.000    | 10,00-35,00 |
| Sangat asin | >35.000       | >50.000          | >35,00      |

*Total dissolved solids (TDS)* menggambarkan semua zat padat terlarut dalam air, seperti mineral, logam, kation, dan klorida dengan satuan mg/L atau *part per million* (ppm). Sedangkan, *salt/salinitas* khusus menggambarkan konsentrasi garam terlarut dalam satuan g/L atau *part per thousand* (ppt). Sumber material dalam TDS dan EC dapat berasal dari alam yaitu kondisi geologi dan air laut dan dari aktivitas manusia, yaitu limbah domestik dan industri serta pertanian (Rusydi A, 2018). Ketika garam terlarut dalam air, mereka terurai menjadi ion-ion bermuatan (kation dan anion). Semakin banyak garam (TDS/salt) yang terlarut, semakin banyak ion yang tersedia untuk menghantarkan arus listrik, sehingga nilai konduktivitas listrik (EC) naik. Hubungan ini menunjukkan bahwa parameter TDS, salinitas, dan EC saling berkaitan erat dalam menggambarkan kualitas dan tingkat keasinan air tanah.

**Tabel 5.** Data Tingkat Intrusi pada Sampel

| Sampel ke- | Salt  | Keterangan       |
|------------|-------|------------------|
| S1         | 0,336 | Tidak terintrusi |
| S2         | 0,319 | Tidak terintrusi |
| S3         | 0,296 | Tidak terintrusi |
| S4         | 0,351 | Tidak terintrusi |

|        |       |                  |
|--------|-------|------------------|
| S5     | 0,351 | Tidak terintrusi |
| S6     | 0,285 | Tidak terintrusi |
| S7     | 0,573 | Tidak terintrusi |
| S8     | 1,304 | Intrusi ringan   |
| S9     | 0,338 | Tidak terintrusi |
| S10    | 5,324 | Intrusi sedang   |
| S11    | 0,352 | Tidak terintrusi |
| S12    | 0,769 | Tidak terintrusi |
| S13    | 0,256 | Tidak terintrusi |
| S14    | 0,310 | Tidak terintrusi |
| Rerata | 0,797 | Tidak terintrusi |

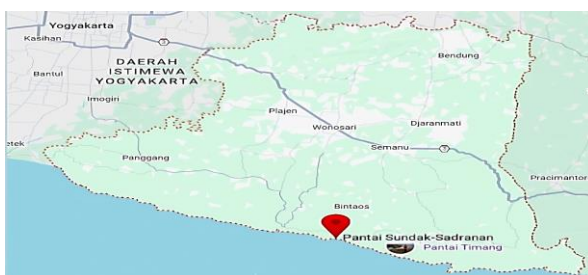
Berdasarkan data hasil analisis, terdapat titik-titik sumur yang menunjukkan status intrusi ringan hingga menengah dengan nilai salinitas mencapai 0,4–0,5 ppt. Sebaliknya, wilayah yang memiliki tekanan hidrostatik air tawar lebih besar cenderung masih berada dalam kategori tidak terintrusi. Hasil penelitian menunjukkan sebanyak 7% dari total sumur terindikasi mengalami intrusi sedang, 7% intrusi ringan, dan 86% tidak terintrusi. Identifikasi ini memberikan gambaran nyata mengenai sebaran polusi air asin di pesisir karst Gunungkidul. Persentase tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar sumur di wilayah penelitian masih berada dalam kondisi aman dari intrusi air laut, sementara hanya sebagian kecil yang telah mengalami intrusi ringan hingga sedang.

Data tersebut mengindikasikan bahwa penyebaran polusi air asin di pesisir karst Gunungkidul masih bersifat terbatas dan belum merata, tetapi keberadaan sumur yang terintrusi tetap menjadi peringatan dini terhadap potensi peningkatan intrusi air laut di masa mendatang. Kendala yang dihadapi selama pengambilan data atau pengukuran yaitu, waktu yang terbatas dan lokasi penelitian yang tidak memungkinkan untuk dilakukan pengukuran sampel secara *in situ*, sehingga sampel diukur secara *ex situ* di madrasah. Selain itu, pengambilan sampel hanya dapat dilakukan pada hari libur kerja,

sehingga waktu pengumpulan data menjadi relatif terbatas dan memerlukan pengaturan jadwal yang lebih ketat.

Analisis visualisasi spasial di Dusun Pule Gundes II, Desa Sidoharjo, Kecamatan Tepus dilakukan untuk memetakan sebaran 14 titik sumur terhadap garis pantai dan morfologi kawasan Pantai Sundak–Sadranan. Penentuan posisi sampel dari zona pesisir hingga ke arah daratan bertujuan untuk merepresentasikan gradien pengaruh air laut terhadap kualitas air bawah tanah secara akurat. Melalui pendekatan geospasial, kecenderungan perubahan parameter salinitas dapat dianalisis berdasarkan jarak horizontal maupun vertikal terhadap sumber air laut.

Secara spasial, kerentanan intrusi air laut dipengaruhi oleh kondisi geomorfologi. Sumur di dataran pantai yang berelevasi rendah dan berlitologi karst berporositas tinggi lebih rentan terhadap masuknya air asin melalui rekahan batuan. Sebaliknya, wilayah yang lebih jauh ke daratan dengan elevasi lebih tinggi dan tekanan hidrolik air tawar yang besar cenderung lebih terlindungi dari intrusi air laut.



sumber: [visitingjogja.jogjaprov.go.id](http://visitingjogja.jogjaprov.go.id)

**Gambar 1.** Peta Gunungkidul



sumber: [visitingjogja.jogjaprov.go.id](http://visitingjogja.jogjaprov.go.id)

**Gambar 2.** Pantai Sadranan



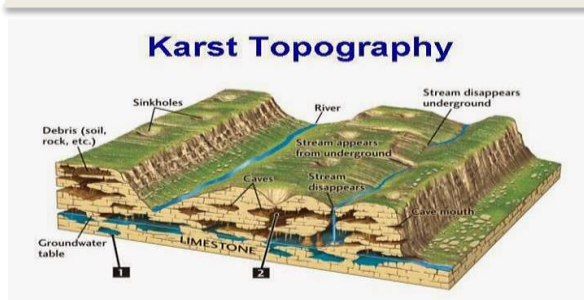
sumber: [visitingjogja.jogjaprov.go.id](http://visitingjogja.jogjaprov.go.id)

**Gambar 3.** Pantai Sundak

Meskipun secara umum peningkatan kadar garam mengikuti gradien jarak dari bibir pantai, visualisasi spasial ini juga menangkap adanya anomali lokal akibat heterogenitas akuifer karst. Perbedaan lintasan aliran bawah tanah menyebabkan sebaran salinitas tidak sepenuhnya seragam, di mana beberapa titik dekat pantai tetap tawar sementara titik lainnya telah teraliri air asin. Oleh karena itu, peta risiko (*Gambar 1, 2, dan 3*) yang dihasilkan dari integrasi data jarak dan ketinggian lahan ini menjadi instrumen penting untuk mengidentifikasi zona-zona kritis yang mengalami salinisasi paling parah. Keberadaan peta ini berhasil mengisi kekosongan data spasial kualitas air tanah di Gunungkidul sekaligus menjadi dasar bagi pemerintah daerah dalam menetapkan strategi mitigasi lingkungan yang bersifat lokasi-spesifik. Mitigasi berbasis lokasi spesifik penting dilakukan agar penanganan sumber masalah lebih akurat, efektivitas dan efisiensi alokasi anggaran, dan meminimalkan dampak sosial dan ekonomi yang mungkin muncul.

### **Pengaruh Karakteristik Karst**

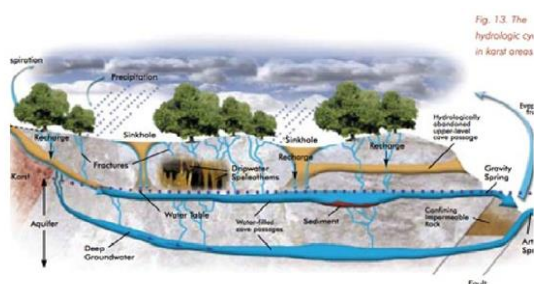
Sistem akuifer di pesisir Gunungkidul memiliki karakteristik unik berupa jaringan lorong pelarut atau konduit (*Gambar 4*). Kondisi geologi karst ini memungkinkan infiltrasi langsung air permukaan maupun air laut melalui rekahan sekunder yang besar dan terbuka. Berbeda dengan akuifer berpori antarbutir biasa, saluran konduit memfasilitasi pergerakan massa air yang sangat cepat tanpa proses filtrasi alami yang memadai. Porositas sekunder yang tinggi dari batuan kapur ini menjadi faktor alami utama yang mempercepat penyebaran intrusi air laut, bahkan dalam kondisi laju pemompaan yang relatif rendah.



sumber: klikgeografi.blogspot.com

**Gambar 2.** Jaringan Lorong Pelarut/Konduit

Sifat akuifer karst yang sangat permeabel menciptakan konektivitas hidrolis instan antara air tanah dengan lingkungan laut [Wu et al., 2023]. Akibatnya, kualitas air tanah menjadi sangat sensitif terhadap fluktuasi gradien hidrolis dan tekanan hidrostatis air laut. Saat pasang, peningkatan tekanan air asin mendorong pergeseran antarmuka air laut lebih jauh ke arah daratan, yang secara langsung mengontrol sebaran klorida dan nilai konduktivitas listrik (*Electrical Conductivity*) air tanah zona pesisir. Sebaliknya, saat terjadi hujan, sistem karst yang terbuka membuat air tanah merespons secara cepat melalui aliran conduit. Fleksibilitas pergerakan massa air ini menyebabkan keseimbangan hidrostatis di pesisir Gunungkidul bersifat sangat dinamis dan fluktuatif terhadap curah hujan (Gambar 5).



sumber: mongabay.co.id

**Gambar 3.** Sistem hidrologi karst di Gunung Kidul

Tingginya heterogenitas pada hidrogeologi karst tersebut menjelaskan mengapa sebaran salinitas di lapangan tidak menunjukkan pola yang seragam. Lintasan

aliran bawah tanah yang berbeda menyebabkan anomali lokal, di mana sebuah sumur dapat memiliki nilai salinitas sangat tinggi sementara sumur di sebelahnya tetap tawar. Fenomena ini berkaitan erat dengan keterbatasan zona penyimpanan air tanah (*storage*) dan ketergantungannya pada jaringan conduit alami. Karakter akuifer yang nonlinier ini membuat prediksi arah dan sebaran intrusi menjadi lebih kompleks dibandingkan sistem non-karst. Oleh karena itu, pemantauan intensif di banyak titik sumur menjadi krusial untuk menangkap dinamika lokal tanpa mengandalkan generalisasi yang berlebihan.

### Faktor Pendorong dan Tekanan Lingkungan

Aktivitas antropogenik berupa pemompaan air tanah secara intensif dan berkelanjutan merupakan faktor dominan yang memicu terjadinya intrusi di wilayah penelitian. Pengambilan air tanah yang berlebih menurunkan muka air tanah tawar, sehingga mengurangi tekanan hidrostatis yang menahan penetrasi air laut. Kondisi ini mengganggu keseimbangan dinamis yang diatur oleh prinsip Ghyben-Herzberg dalam menentukan posisi antarmuka air tawar dan air asin (Verruijt, 1982). Tingginya sensitivitas sistem karst terhadap variasi skenario pemompaan menunjukkan bahwa penurunan muka air dalam skala kecil sekalipun dapat memperluas zona salinisasi. Selain itu, perkembangan sektor pariwisata turut meningkatkan tekanan terhadap kebutuhan air bersih di pesisir Gunungkidul. Konsekuensinya, eksploitasi yang tidak terkontrol dalam jangka panjang mempercepat degradasi kualitas akuifer secara permanen.

Fluktuasi musiman berpengaruh terhadap laju pengisian ulang air tawar ke dalam sistem akuifer karst (Wang & Lee, 2024). Pada periode kemarau, penurunan curah hujan menurunkan volume *recharge* sehingga cadangan air tawar menipis. Kondisi ini menyebabkan muka air tanah menjadi lebih fluktuatif dan mempermudah penetrasi air asin lebih jauh ke arah daratan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa respon akuifer karst terhadap perubahan musim bersifat cepat, tetapi rentan terhadap ketidakseimbangan hidrologi. Minimnya sumber air permukaan yang stabil membuat ketergantungan masyarakat pada sumur bor meningkat selama periode kering. Tekanan ganda dari rendahnya *recharge* dan tingginya pengambilan air memperparah risiko intrusi. Oleh karena itu, ketahanan air di wilayah ini sangat dipengaruhi oleh dinamika hidrologi musiman yang terjadi secara fluktuatif.

Perubahan iklim global mendorong kenaikan muka air laut yang menimbulkan ancaman signifikan bagi wilayah pesisir dengan secara fisik mendorong pergeseran antarmuka air asin lebih jauh ke dalam akuifer daratan (Rasmussen et al, 2013). Fenomena ini diperparah dengan potensi peristiwa badai ekstrem yang dapat menyebabkan infiltrasi langsung air laut melalui permukaan. Kondisi geografis pesisir Gunungkidul yang relatif terbuka menjadikannya rentan terhadap perubahan dinamika laut. Jika tren kenaikan muka air laut terus berlanjut, volume cadangan air tawar di akuifer pesisir akan terus menyusut. Hal ini menunjukkan bahwa perencanaan tata ruang wilayah tidak hanya harus komprehensif, tetapi juga perlu menyertakan proyeksi bahaya lingkungan berbasis data spasial. Hal tersebut krusial agar kebijakan

pembangunan dapat mengantisipasi dampak kerusakan lingkungan di masa mendatang.

### **Analisis Kritis Dinamika Hidrogeokimia dan Mekanisme Intrusi Karst**

Tingginya kadar salinitas, *Electrical Conductivity* (EC), dan *Total Dissolved Solids* (TDS) yang terdeteksi pada sampel air tanah menunjukkan bahwa pesisir Gunungkidul sedang mengalami degradasi kualitas air akibat infiltrasi massa air laut. Namun secara kritis, mekanisme penyebaran kontaminasi ini tidak mengikuti pola baji air asin (*saltwater wedge*) linear seperti yang umum dijumpai pada akuifer pesisir berpori seragam (intergranular). Kondisi litologi karbonat Gunungkidul yang dicirikan oleh porositas sekunder berupa rekahan (*fracture*) dan lorong gua bawah tanah (*conduit*) menciptakan jalur bypass hidrolis yang bersifat anisotropik.

Karakteristik ini menjelaskan mengapa anomali salinitas tinggi dapat melonjak drastis pada titik tertentu seperti pada Sumur 10 di Pantai Sadranan (Dusun Pule Gundes II) sementara sumur di sekitarnya dengan jarak absolut yang sama dari garis pantai masih menunjukkan status air tawar. Temuan lapangan ini mengonfirmasi model hidrogeologi dari Ahmad Cahyadi et al. (2021) di Gua Mangsri yang menegaskan dominasi aliran conduit di kawasan karst Gunungsewu, di mana transportasi air bawah tanah berlangsung sangat cepat melalui lorong gua tanpa proses filtrasi alami. Karakteristik rona karst lokal yang heterogen ini juga sejalan dengan pembuktian Wu et al. (2023) bahwa keberadaan saluran konduktif mempercepat dispersi salinitas secara non-linear bahkan pada laju pemompaan yang rendah.

Secara hidrolik, terdapat perbedaan sensitivitas yang kontras antara sumur gali (akuifer bebas/dangkal) dan sumur bor (akuifer tertekan/dalam) terhadap penetrasi air laut. Sumur gali sangat dipengaruhi oleh fluktuasi musiman. Karena data ini diambil pada musim penghujan (Desember 2025–Januari 2026), pasokan recharge air hujan melimpah dan membentuk efek pengenceran (dilution effect) temporer pada lapisan atas air tanah bebas. Fenomena respons kilat akuifer terhadap curah hujan ini memperkuat validitas dinamika hidrogeologi karst yang dipetakan oleh Ahmad Cahyadi et al. (2021). Meskipun sumur bor letaknya lebih dalam, sumur bor di wilayah ini justru rentan mengalami salinisasi kronis akibat efek upconing (kenaikan antarmuka air asin) dari jaringan conduit terdalam yang bocor dan terhubung ke laut. Fenomena fluktuasi tahunan dan kerentanan akibat eksploitasi dalam skala ruang-waktu ini memperkuat analisis hidrologi yang dipaparkan oleh Herlina & Diyono (2020) serta Widura & Mardiatno (2022).

Komparasikan secara spasial dengan wilayah pesisir non-karst, intensitas intrusi di Gunungkidul menunjukkan anomali yang unik. Pada akuifer pantai pasir lepas seperti di Pangandaran oleh Wijaya et al. (2024), indikasi awal intrusi menunjukkan sebaran nilai salinitas yang relatif homogen dan gradual (0,4–0,5 ppt) pada sumur-sumur warga. Karakteristik linear pantai berpasir tersebut juga diperjelas oleh studi eksperimental Pratama et al. (2025) di pesisir Yogyakarta, yang membuktikan bahwa peningkatan kadar air laut di media pori pasir akan menurunkan nilai resistivitas batuan secara konsisten dan teratur (korelasi negatif kuat). Sebaliknya, pada akuifer karst

Gunungkidul yang diteliti saat ini, polanya melompat (*erratic*) akibat kontrol struktural patahan batu gamping. Kondisi ketidakteraturan spasial ini justru lebih menyerupai pesisir Latuhalat di Ambon oleh Latumeten et al. (2023), di mana sebaran nilai klorida dan konduktivitas air sumur (mencapai rentang ekstrem 446 hingga 3236  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) sangat dikontrol oleh struktur lokal dan rezim hidro-oseanografi (pasang-surut).

### **Dampak dan Konsekuensi**

Salinisasi akuifer menyebabkan air tawar bertransformasi menjadi air payau sehingga kualitasnya tidak lagi memenuhi syarat kesehatan untuk dikonsumsi. Peningkatan kadar klorida dan *Total Dissolved Solids* (TDS) membuat air sumur tidak layak diminum sesuai standar kualitas air bersih. Masyarakat yang bergantung pada air tanah pun mengalami keterbatasan akses terhadap air bersih yang aman. Selain rasa air menjadi asin, tingginya ion terlarut mengganggu penggunaan air untuk mandi dan mencuci serta mempercepat korosi pada peralatan rumah tangga. Selain itu, penggunaan air payau juga berpotensi menimbulkan iritasi kulit bagi pengguna sumur, terutama pada individu yang memiliki sensitivitas tertentu. Jika kondisi ini terus dibiarkan, krisis air bersih bisa berdampak langsung pada kesehatan, sanitasi, dan tingkat kesejahteraan seluruh masyarakat.

Air yang terintrusi menimbulkan dampak merugikan terhadap masyarakat. Kandungan garam yang tinggi mempercepat terjadinya proses korosi pada benda-benda logam yang bersentuhan langsung dengan air, seperti pompa, pipa, dan peralatan dapur (Sinaga et al, 2025). Kerusakan peralatan tersebut mencerminkan kerugian ekonomi langsung yang dirasakan sebagai akibat dari

penurunan kualitas lingkungan. Intrusi air laut menimbulkan dampak sosial-ekonomi yang merugikan, terutama bagi sektor pertanian di wilayah pesisir. Peningkatan konsentrasi ion garam pada zona perakaran menyebabkan stres fisiologis pada tanaman yang menghambat pertumbuhan dan penyerapan unsur hara (Birati et al, 2025). Degradasi kesuburan dan produktivitas akibat kondisi tersebut membuat lahan tidak lagi bernilai ekonomis maupun layak untuk kegiatan budidaya.

Upaya teknis berupa pendalaman sumur, instalasi perangkat filtrasi (seperti reverse osmosis), hingga pencarian sumber air alternatif di area daratan membutuhkan investasi dana yang besar dan sering kali berada di luar jangkauan kemampuan finansial rumah tangga (Arifandi et al., 2024). Jika penurunan tekanan hidrostatik ini dibiarkan tanpa intervensi sistematis, ketahanan ekonomi petani dan pelaku usaha pariwisata lokal akan terus tergerus oleh degradasi lingkungan yang berkelanjutan. Oleh karena itu, ketersediaan data pemetaan spasial kadar garam menjadi instrumen krusial dalam merancang mitigasi yang presisi demi mendukung pembangunan pesisir yang berkelanjutan.

### **Sintesis Strategi Mitigasi dan Tata Ruang Berbasis Parameter Fisika-Kimia**

Menghadapi karakteristik akuifer karst yang kompleks dan dinamis, diperlukan strategi mitigasi yang adaptif dan komprehensif untuk mengatasi ancaman intrusi air laut.

#### **3. Pengendalian Struktural Spesifik Karst:**

Pembuatan sumur resapan tidak boleh dilakukan sembarangan untuk menghindari kolapsnya struktur batuan kapur (*sinkhole*). Sumur resapan harus ditempatkan pada zona

tangkapan air alami (*ponor*) untuk memaksimalkan injeksi air tawar yang dapat menekan batas air asin kembali ke laut. Pemantauan parameter TDS dan EC harus dijadikan indikator baku (baseline) dalam mengukur keberhasilan pengisian ulang ini.

#### **4. Regulasi Zonasi Berdasarkan Risiko Spasial**

Pemerintah Daerah Kabupaten Gunungkidul perlu menggunakan peta sebaran salinitas hasil penelitian ini untuk merevisi regulasi perizinan sumur bor komersial. Area sekitar Sumur 10 di Pantai Sadranan harus dideklarasikan sebagai Zona Merah Konservasi. Pada zona ini, moratorium pembuatan sumur bor baru harus diberlakukan, dan pengguna sumur aktif yang telah tercemar harus difasilitasi untuk melakukan relokasi horizontal titik pengambilan air ke arah daratan (*up-gradient*) yang relatif aman.

#### **5. Penguatan Kapasitas Sosial dan Edukasi:**

Data visualisasi spasial dari penelitian ini harus didekonstruksi menjadi materi edukasi bagi masyarakat, khususnya masyarakat di wilayah pesisir karst. Masyarakat dan pelaku usaha pariwisata harus dipahami bahwa akuifer karst merespons eksploitasi secara non-linear (Wu et al., 2023). Pengenalan teknik pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*) skala rumah tangga dan hotel perlu diwajibkan melalui kebijakan insentif untuk mengurangi tekanan ekstraksi langsung pada sumur warga selama periode kritis.

### **KESIMPULAN**

Analisis hidrogeokimia pada 14 sumur warga di pesisir karst Gunungkidul menunjukkan bahwa 86% sampel air tanah masih diklasifikasikan sebagai air tawar

(tidak terintrusi) dengan rata-rata salinitas aman untuk kebutuhan domestik sebesar 0,797 ppt. Namun, terdapat anomali sebaran spasial berupa indikasi intrusi ringan (7%) dan intrusi sedang (7%) yang terkonsentrasi pada sumur di rentang jarak 100–130 meter dari garis pantai. Temuan kritis penelitian ini membuktikan bahwa jarak absolut dari bibir pantai tidak berkorelasi linear dengan tingkat salinisasi. Pola intrusi yang tidak merata (erratic) ini dikontrol kuat oleh karakteristik porositas sekunder batuan karbonat, di mana keberadaan rekahan (fracture) dan lorong pelarutan (conduit) bertindak sebagai jalur bypass hidrolik yang mempercepat penetrasi air asin secara non-linear ke titik akuifer tertentu.

Hasil penelitian ini menyajikan data spasial aktual yang berfungsi sebagai landasan strategis bagi para pemangku kepentingan. Bagi Pemerintah Daerah, khususnya DPUPESDM Kabupaten Gunungkidul, peta sebaran salinitas ini dapat menjadi instrumen legalitas untuk merevisi regulasi zonasi air tanah dan memperketat kuota sumur bor komersial di kawasan rawan intrusi. Sementara itu, bagi masyarakat dan sektor pariwisata di sekitar Pantai Sundak-Sadranan, data ini menjadi panduan praktis untuk menentukan titik pengeboran sumur yang aman sekaligus mendorong adopsi sistem pemanenan air hujan guna menekan biaya akibat korosi.

Untuk menyempurnakan penelitian ini, riset mendatang disarankan melakukan ekspansi temporal guna membandingkan parameter hidrogeokimia antara musim kemarau dan penghujan untuk menangkap efek pengenceran akuifer. Selain itu, diperlukan integrasi geolistrik dan hidro-oseanografi yang menggabungkan pengujian

kualitas air *ex-situ* dengan data pasang-surut air laut *real-time* untuk memetakan geometri baji air asin. Terakhir, analisis rasio ion utama ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , dan  $\text{Ca}^{2+}$ ) perlu ditambahkan untuk menghitung *Revelle Index* (RI), guna memastikan apakah salinitas berasal dari intrusi air laut modern atau interaksi air-batuan kapur purba.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Arifandi, J. M., & Romadhona, S. (2024). Analisis kesuburan tanah sawah di wilayah geografis pesisir: Studi kasus Kabupaten Situbondo. *Jurnal Geografi: Geografi dan Pengajarannya*, 22(1): 12–25.
- Ariyanto, G., & Mardiyanto, M. A. (2017). Kondisi intrusi air laut terhadap kondisi kualitas air tanah di Kota Surabaya. *Jurnal Purifikasi*, 16(2): 91-101.
- Birati, S., Amanipoor, H., & Battaleb-Looie, S. (2025). Investigation of the impact of seawater intrusion on the agricultural land quality along river margins. *Applied Water Science*, 15(1):65.
- Cahyadi, A., Marfai, M. A., Riyanto, I. A., Wiyono, M. B., Malawani, M. N., Sadali, M. I., & Suadi. (2024). Hydrological and climatological aspect evaluation for salt farm development in the coastal area of Gunungkidul Regency, Yogyakarta, Indonesia. *Philippine Journal of Science*, 153(3).
- Fleury, P., Bakalowicz, M., & de Marsily, G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *Journal of Hydrology*, 339(1–2), 79–92.
- Herlina, & Diyono. (2020). Analisis geostatistik untuk pemetaan perubahan kualitas air tanah Kawasan karst Kabupaten Gunungkidul. *ELIPSOIDA: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 3(1), 1–12.
- Mongabay Indonesia. (2014, Maret 26). Karst Pegunungan Sewu adalah sumber air, harus terlarang untuk

- pertambangan.  
<https://mongabay.co.id/2014/03/26/karst-pegunungan-sewu-adalah-sumber-air-harus-terlarang-untuk-pertambangan/>.
- Paladan, R. B., Nurfaika, Ninasafitri, & Zainuri, A. (2025). Pemetaan pola pencemaran air tanah berdasarkan karakteristik fisik di Desa Olele, Kabupaten Bone Bolango. *Jurnal Riset dan Pengabdian Interdisipliner*, 2(3), 101–111.
- Putra, D. P. E., An Nisaa, F., Susatio, R., & Atmaja, R. R. S. (2023). Identifikasi Intrusi Air Laut pada Akuifer Pantai Menganti, Kecamatan Kesugihan, Cilacap, Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 545-552.
- Qathrunnada, N., Puryanti, D., & Purwanto, E. (2023). Profil kualitas air sumur akibat intrusi air laut di kawasan sekitar Pantai Air Manis Kota Padang. *Jurnal Fisika Unand*, 12(1), 145–151.
- Rachman, M. H., Wilopo, W., & Putra, D. P. E. (2018). Groundwater vulnerability assessment using simple vertical vulnerability method in Wonosari, Gunungkidul, Yogyakarta, Indonesia. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022)*, 632-642.
- Rasmussen, P., Sonnenborg, T. O., Goncear, G., & Hinsby, K. (2013). Assessing impacts of climate change, sea level rise, and drainage canals on saltwater intrusion to coastal aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 421–443.
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1): 012019.
- Sinaga, F. D., Suka, E. G., & Karo Karo, P. (2023). The effect of immersion time on corrosion rate on St37 carbon steel in 3% NaCl corrosive medium using waru leaves extract inhibitor. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology (HEMIT)*, 4(3), 100–112.
- Verruijt, A. (1982). *Theory of groundwater flow* (2nd ed.). Macmillan Press.
- Visiting Jogja. (n.d.). Mendayung kano hingga snorkeling, semuanya bisa di Pantai Sadranan. <https://visitingjogja.jogjaprov.go.id/26448/mendayung-kano-hingga-snorkeling-semuanya-bisa-di-pantai-sadranan/>.
- Visiting Jogja. (n.d.). Pantai Sundak, pantai oase Gunungkidul. <https://visitingjogja.jogjaprov.go.id/8296/pantai-sundak-pantai-oase-gunungkidul/>.
- Wang, A., & Lee, J. J. (2024, December 11). Saltwater will taint 77% of coastal aquifers by century's end, modeling study finds. *Phys.org*. <https://phys.org/news/2024-12-saltwater-taint-coastal-aquifers-century.html>.
- Widura, E., & Mardiatno, D. (2022). Assessment of the Coastal Vulnerability Index (CVI) for disaster mitigation strategies in some coastal tourism areas in Gunungkidul, Yogyakarta, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 989(1), 012014.
- Wu, Y., Zhang, X., Li, J., Chen, Z., & Liu, Y. (2023). Characteristics and influencing factors of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in China. *Frontiers in Marine Science*, 10, Article 1277005.