



Analisis Potensi Pencemaran Air Tanah Bebas di Lereng Kaki Koluvial dan Dataran Aluvial Daerah Aliran Sungai Pesing Menggunakan Integrasi Metode GOD dan SIG Berbasis Web

Analysis of Potential Groundwater Pollution in Unconfined Aquifer in Colluvial Footslopes and Alluvial Plains of the Pesing Watershed Using Integration of GOD and GIS Web Based Methods

SADEWA PURBA SEJATI^{1*}, ADITYA SAPUTRA²

¹Program Studi Geografi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Amikom Yogyakarta
Jalan Ring Road Utara, Condong Catur, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55281.

²Program Studi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jalan Ahmad Yani, Pabelan, Kartasura, Surakarta, Jawa Tengah, 57162

*sadewa@amikom.ac.id

ARTICLE INFO

Article history

Received 03 August 2021

Accepted 15 November 2021

Published 23 January 2022

Keywords

Groundwater

Unconfined aquifer

GOD

GIS

Web

ABSTRACT

Agricultural, livestock, and domestic activities in the alluvial plains and the colluvial footslopes of the Pesing watershed have the potential to reduce groundwater quality in an unconfined aquifer. Environmental characteristics need to be identified spatially to determine the potential for groundwater contamination. The latest mapping technology also needs to be identified to determine its ability to disseminate information on potential groundwater pollution. The research was conducted to determine the potential for groundwater pollution and to identify the capability of a web-based GIS as a medium for disseminating geospatial information. Potential groundwater contamination was identified using the GOD method. The variables used include the type of aquifer, aquifer lithology, and groundwater depth. Variables of aquifer type and aquifer lithology are known through secondary data, namely drilling data, geological data, and literature studies. Variable groundwater depth is known through field surveys. Sampling method used is systematic random sampling. Each variable is classified and visualized in the form of a thematic map. Three variables were analyzed by the overlay method. Based on the results of the analysis, it is known that in the rainy season, the research area is classified into three classes of potential for groundwater pollution, namely extreme potential with a percentage of 27% area, high potential with a rate of 71%, and medium potential with a percentage of 2%. The potential for groundwater contamination during the dry season is classified into two classes: high potential with an area of 43% and medium potential with a percentage of 57%. Temporal dynamics of the potential for groundwater pollution are caused by a variable sensitive to seasonal changes, namely the depth of groundwater. The land uses that have the most influence on the potential for groundwater contamination are rice fields and livestock manure disposal. Web-based GIS can be used as a medium for disseminating information on potential groundwater pollution. The program can be appropriately operated on a variety of electronic devices. Web-based GIS is equipped with a variety of features that can be used interactively for fundamental to applied analysis.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 03 Agustus 2021

Disetujui 15 November 2021

Diterbitkan 23 Januari 2022

Kata kunci:

Air tanah

Akuifer bebas

GOD

SIG

Web

ABSTRAK

Aktivitas pertanian, peternakan, dan domestik di dataran aluvial dan dataran kaki koluvial DAS Pesing berpotensi menurunkan kualitas air tanah bebas. Karakteristik lingkungan perlu diidentifikasi secara spasial untuk mengetahui potensi pencemaran air tanah. Teknologi pemetaan terkini juga perlu diidentifikasi untuk mengetahui kemampuannya dalam mendiseminasi informasi potensi pencemaran air tanah. Penelitian dilakukan untuk mengetahui potensi pencemaran air tanah dan mengidentifikasi kemampuan sistem informasi geografis berbasis (SIG) web sebagai media diseminasi informasi geospasial. Potensi pencemaran air tanah diidentifikasi menggunakan metode GOD (*groundwater occurrence, overall lithology of aquifer, depth to water table*). Variabel yang digunakan meliputi jenis akuifer, litologi akuifer, dan kedalaman air tanah. Variabel jenis akuifer dan litologi akuifer diketahui melalui data sekunder, yaitu data pengeboran, data geologi, dan studi literatur. Variabel kedalaman air tanah diketahui melalui survei lapangan. Metode sampling yang digunakan adalah acak bersistem. Setiap variabel diklasifikasi dan divisualkan dalam bentuk peta tematik. Ketiga variabel dianalisis dengan metode *overlay*. Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa pada musim hujan daerah penelitian terklasifikasi menjadi tiga kelas potensi pencemaran air tanah bebas, yaitu potensi ekstrim dengan persentase luas 27%, potensi tinggi dengan persentase 71%, dan potensi sedang dengan persentase 2%. Potensi pencemaran air tanah pada musim kemarau terklasifikasi menjadi dua kelas, yaitu potensi tinggi dengan persentase luas 43% dan potensi sedang dengan persentase 57%. Dinamika temporal potensi pencemaran air tanah bebas disebabkan karena terdapat variabel yang sensitif terhadap perubahan musim, yaitu kedalaman air tanah. Penggunaan lahan yang paling berpengaruh terhadap potensi pencemaran air tanah adalah sawah dan lokasi pembuangan kotoran ternak. SIG berbasis web mampu digunakan sebagai media diseminasi informasi potensi pencemaran air tanah bebas. Program dapat dioperasikan dengan baik pada beragam perangkat elektronik. Program dilengkapi dengan beragam fitur yang dapat digunakan secara interaktif untuk analisis dasar hingga terapan.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air tanah merupakan sumber daya alam yang berperan penting dalam kehidupan dan penghidupan. Air tanah digunakan manusia di berbagai sektor, seperti sektor domestik atau rumah tangga, sektor pertanian, perindustrian, hingga sektor pariwisata (Al-haidarey *et al.*, 2014; Al *et al.*, 2020; Olusheyi *et al.*, 2020; Riasasi & Sejati, 2019; Sejati, 2021; dan Shahab *et al.*, 2018). Kuantitas dan kualitas air menjadi variabel penentu kemampuan air tanah untuk memenuhi kebutuhan manusia (Adji & Sejati, 2014; Purnama, 2019; Sutardi *et al.*, 2017). Air tanah disebut sumber daya alam yang bernilai jika kuantitasnya mencukupi dan kualitasnya sesuai tujuan penggunaannya. Air tanah yang melimpah belum tentu memiliki kualitas layak. Salah satu penyebab penurunan kualitas air tanah adalah aktivitas manusia. Kajian pencemaran air tanah akibat aktivitas manusia telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Limbah-limbah dari aktivitas rumah tangga, peternakan, pertanian, perindustrian, dan aktivitas lainnya berpotensi terlindi (*leached*) hingga akhirnya menjadi polutan air tanah (Baba *et al.* 2020; Boumans *et al.*, 2017; Subagiyo *et al.*, 2017; Torfs, 2015).

Karakteristik lingkungan perlu diidentifikasi untuk menentukan potensi pencemaran air tanah. Sistem Informasi Geografis (SIG) dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi pencemaran air tanah. Para peneliti terdahulu telah mengintegrasikan SIG dengan metode GOD untuk menentukan pola spasial potensi pencemaran air tanah (Kaddour *et al.*, 2018a; Mahrez *et al.*, 2018; Oroji, 2019a; Oroji, 2019b). Metode GOD merupakan perangkat kajian potensi pencemaran air tanah. Karakteristik lingkungan yang berpengaruh terhadap jangkauan polutan mencapai zona jenuh air tanah merupakan dasar kajian yang digunakan metode GOD. Jangkauan polutan mencapai zona jenuh air tanah ditentukan dengan teknik pengharkatan atau skoring. Skor tinggi mengindikasikan polutan leluasa menjangkau zona jenuh air tanah, sedangkan skor rendah menjadi indikasi polutan sulit menjangkau zona jenuh air tanah. Variabel potensi pencemaran air tanah yang digunakan dalam metode GOD yaitu *groundwater occurrence* (G) atau jenis akuifer, *overall lithology* (O) atau litologi akuifer, dan *depth to water table* (D) atau kedalaman air tanah. Hasil yang telah dicapai oleh para peneliti terdahulu adalah informasi geospasial atau peta tematik yang bersifat statis. Luaran yang bersifat statis pada umumnya terdokumentasi dalam artikel publikasi. Dokumentasi yang bersifat statis tersebut menyebabkan pengakses informasi tidak dapat berinteraksi secara langsung. Integrasi informasi potensi pencemaran air tanah dengan beragam data digital lingkungan menjadi sulit dilakukan, terlebih jika informasi tersebut dijadikan sebagai dasar untuk menentukan zonasi perlindungan air tanah yang memerlukan integrasi data dari dinas atau instansi terkait.

1.2 Tujuan Penelitian

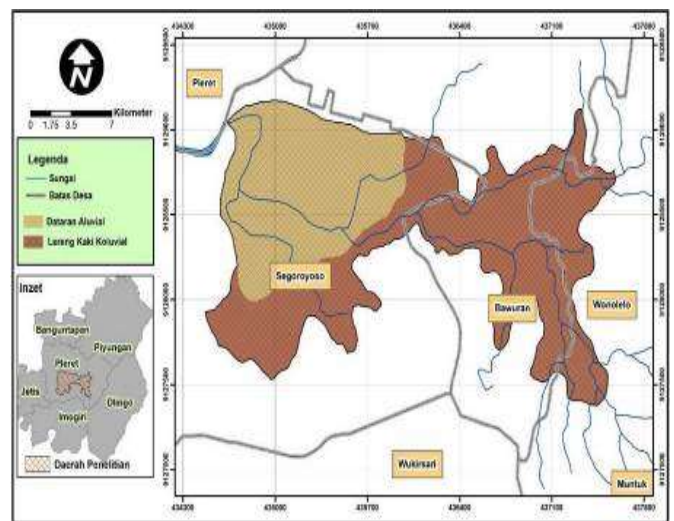
Perkembangan teknologi SIG telah sampai pada tahap SIG berbasis web (Lan & Longley, 2019; Longley *et al.*, 2019). SIG berbasis web dapat digunakan untuk mengelola data spasial menjadi informasi yang bersifat interaktif, menarik, dan mempermudah integrasi data. Diseminasi informasi

menjadi lebih cepat dan mudah. Diseminasi informasi spasial potensi pencemaran air tanah menggunakan teknologi SIG berbasis web belum dikaji para peneliti terdahulu. Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan maka penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi potensi pencemaran air tanah bebas dengan metode GOD dan mengetahui kemampuan SIG berbasis web sebagai media diseminasi potensi pencemaran air tanah.

2. METODE

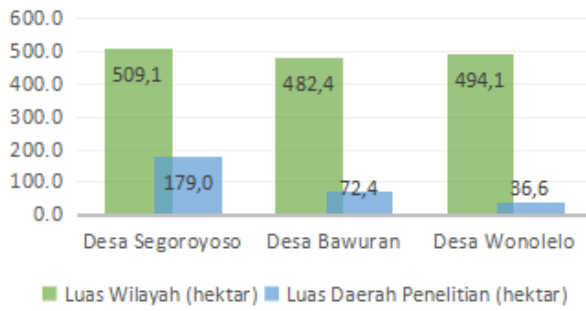
2.1 Alat dan Bahan

Penelitian dilakukan di sebagian daerah aliran sungai (DAS) Pesing, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Berdasarkan sistem koordinat UTM (*Universal Transverse Mercator*), daerah penelitian berada pada koordinat 435000-437100 E dan 9127500-9129500 N. Daerah penelitian dibatasi menggunakan pendekatan bentuk lahan, yaitu bentuk lahan lereng kaki koluviyal dan dataran aluvial. Kedua unit bentuk lahan tersebut dipilih dengan beberapa pertimbangan. Pertimbangan pertama yaitu daerah tersebut merupakan bagian DAS Pesing yang paling padat penduduknya. Pertimbangan kedua adalah daerah tersebut didominasi oleh aktivitas domestik, pertanian, dan peternakan. Sektor domestik, peternakan, dan pertanian berpotensi menimbulkan polutan yang mungkin mencemari air tanah bebas melalui *leaching* atau pelindian. Peta daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta daerah penelitian

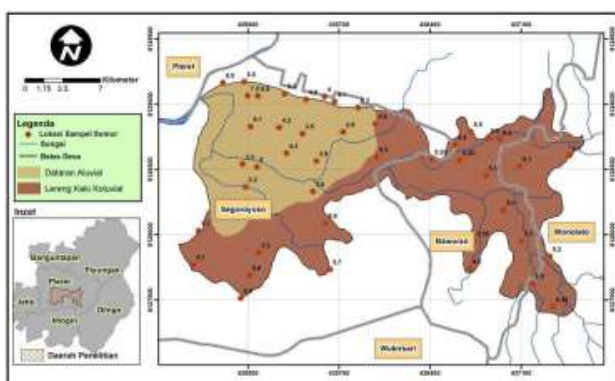
Secara administratif, daerah penelitian meliputi tiga desa, yaitu Desa Segoroyoso, Desa Bawuran, dan Desa Wonolelo. Tiga desa tersebut berada di Kecamatan Pleret. Pendekatan bentuk lahan menyebabkan tidak seluruh wilayah desa digunakan sebagai daerah penelitian. Luas wilayah setiap desa yang masuk sebagai daerah penelitian dijelaskan melalui Gambar 2.



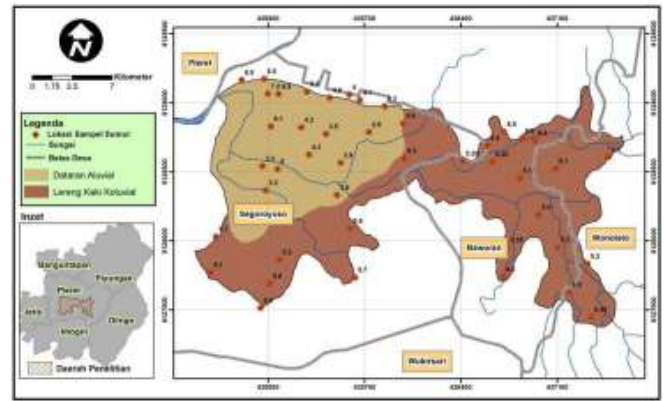
Gambar 2. Luas setiap desa yang masuk daerah penelitian

Karakteristik fisik alami daerah penelitian kemudian diidentifikasi melalui variabel yang digunakan dalam metode GOD, yaitu jenis akuifer, litologi akuifer, dan kedalaman air tanah (Kaddour *et al.*, 2018a; Mahrez, *et al.*, 2018; Oroji, 2019a; Oroji, 2019b; Sartika *et al.*, 2020; Sejati 2020, Tyas *et al.*, 2020; Vrba & Zoporozec, 1994). Pengaruh aktivitas penduduk terhadap potensi pencemaran air tanah diprediksi dengan pendekatan penggunaan lahan.

Data yang digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik alami meliputi data primer dan data sekunder. Data primer meliputi kedalaman air tanah dan koordinat lokasi pengukuran kedalaman air tanah. Metode sampling yang digunakan dalam pengumpulan data kedalaman air tanah adalah acak tersistem (*systematic random sampling*). Lokasi yang diukur kedalaman air tanahnya ditentukan menggunakan grid-grid semu yang dibuat di dalam peta daerah penelitian. Penggunaan metode acak tersistem bertujuan untuk mengetahui kondisi kedalaman air tanah secara komprehensif di daerah penelitian (Sejati, 2021, 2020, 2019). Kedalaman air tanah diukur dengan memasukkan pita ukur pada sumur gali. Koordinat lokasi pengukuran diketahui menggunakan *GPS receiver* tipe Garmin 64S berketelitian 2 meter. Kedalaman air tanah merupakan variabel alami yang dipengaruhi oleh musim (Sejati 2021), sehingga pengumpulannya dilakukan sebanyak dua kali, yaitu pada akhir bulan Januari 2020 (musim hujan) dan pada bulan Juni 2020 (musim kemarau). Persebaran data kedalaman air tanah dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Data primer kedalaman air tanah pada musim hujan bulan Januari 2020



Gambar 4. Data primer kedalaman air tanah pada musim kemarau bulan Juni 2020

Data sekunder dalam penelitian ini meliputi data pengeboran. Data pengeboran dikumpulkan melalui dinas atau instansi penyedia air baku Kabupaten Bantul. Data pengeboran diintegrasikan dengan referensi buku teks dan artikel publikasi peneliti terdahulu untuk mengidentifikasi kondisi litologi dan jenis akuifer di daerah penelitian. Citra Landsat 8 juga digunakan dalam penelitian untuk mengidentifikasi penggunaan lahan. Rincian data yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rincian data penelitian

Nama data	Jenis	Teknik pengumpulan
Kedalaman air tanah	Data primer	Survei lapangan
Data stratigrafi atau data pengeboran	Data sekunder	Institusional
Data geologi yogyakarta	Data sekunder	Institusional dan studi literatur
Citra Landsat 8	Data sekunder	Mengunduh di laman https://earthexplorer.usgs.gov/

2.2 Prosedur Penelitian

Data yang telah terkumpul dianalisis menggunakan SIG. Perangkat lunak yang digunakan adalah Arc GIS Pro versi 2.5. Data diolah menjadi informasi tematik sesuai variabel metode GOD. Informasi tematik kedalaman air tanah diperoleh dengan cara menginterpolasi data kedalaman air tanah menggunakan metode *inverse distance weighting* (IDW), variabel *power* (p) yang digunakan adalah 2. Metode IDW dipilih karena menghasilkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) model yang paling kecil terhadap data geospasial yang persebarannya tidak teratur (Sejati, 2019). Informasi tematik kedalaman air tanah kemudian dikelaskan. Hasil klasifikasi kemudian diberi skor sesuai kriteria skoring metode GOD. Informasi tematik berikutnya adalah kondisi litologi akuifer dan jenis akuifer. Kondisi litologi akuifer diketahui berdasarkan deskripsi yang tertera pada data pengeboran. Sebanyak tiga data pengeboran digunakan untuk mengidentifikasi kondisi litologi akuifer. Hasil

indetifikasi kemudian dikelaskan dan diberi skor sesuai kriteria metode GOD. Informasi tematik berikutnya adalah jenis akuifer. Identifikasi jenis akuifer dilakukan dengan mengintegrasikan data pengeboran dengan studi literatur. Hasil identifikasi mengungkapkan bahwa air tanah di daerah penelitian berada pada lapisan akuifer bebas karena hanya dibatasi oleh satu lapisan kedap air dan muka air tanah (*water table*) dapat diamati dengan jelas (Sejati, 2021; Purnama, 2019; Sejati, 2019; Adnan *et al.*, 2013; Santosa & Adi, 2014). Jenis akuifer yang telah teridentifikasi kemudian diberi skor sesuai ketentuan metode GOD.

Variabel yang telah tersusun menjadi informasi tematik kemudian diolah menggunakan metode *overlay* (tumpang susun) untuk menentukan potensi pencemaran air tanah. Pengolahan data pada tahap ini juga dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS Pro versi 2.5. Skor yang melekat pada setiap informasi tematik kemudian dianalisis menggunakan operasi matematika yang berupa perkalian dengan persamaan sebagai berikut (Kaddour *et al.*, 2018a; Oroji, 2019a; Oroji, 2019b; Sartika *et al.*, 2020; Sejati, 2020; Maria, 2017; Tyas *et al.*, 2020; Vrba & Zoporozec, 1994).

$$\text{Potensi pencemaran air tanah} = \text{skor jenis akuifer} \times \text{skor litologi akuifer} \times \text{skor kedalaman air tanah} \dots\dots\dots(1)$$

Hasil akhir perkalian skor kemudian diklasifikasi untuk menentukan tingkat potensi pencemaran air tanah di daerah penelitian. Rincian skor dan klasifikasi potensi pencemaran air tanah (Vrba & Zoporozec, 1994) dapat dilihat pada Tabel 2.

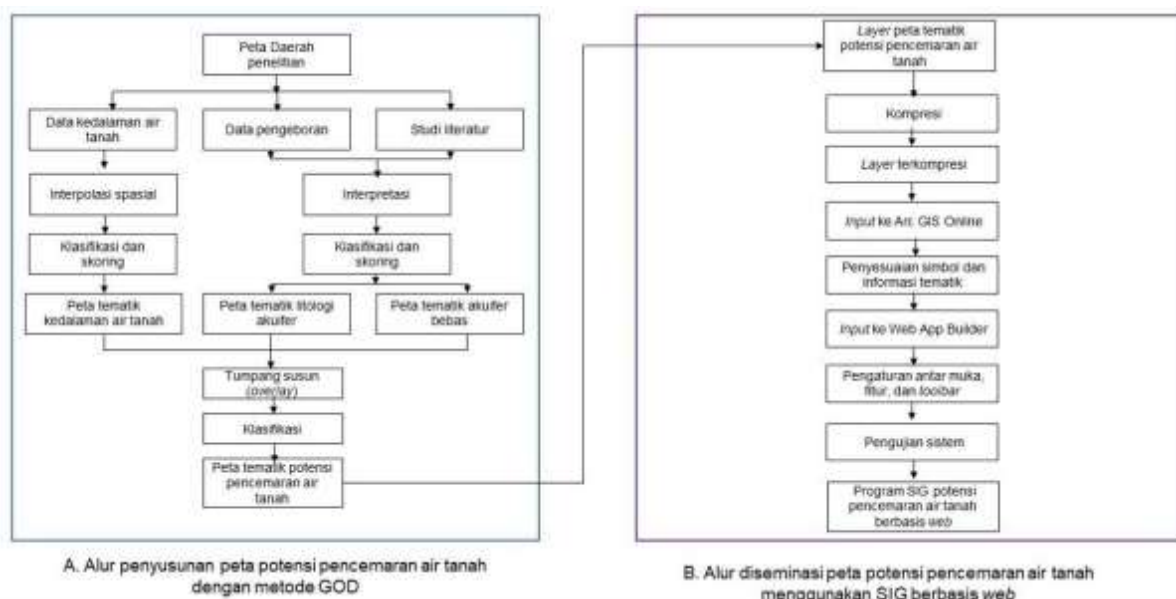
Prediksi pengaruh aktivitas penduduk terhadap potensi pencemaran air tanah bebas ditentukan dengan pendekatan penggunaan lahan. Asumsi yang digunakan adalah perbedaan penggunaan lahan memberikan pengaruh yang beragam terhadap potensi pencemaran air tanah. Penggunaan lahan terkini di daerah penelitian diidentifikasi dengan data penginderaan jauh, yaitu Citra Landsat 8. Penggunaan lahan diklasifikasi menjadi pemukiman, sawah, ladang, kebun,

belukar, dan lokasi pembuangan kotoran ternak. Penggunaan lahan yang telah diidentifikasi kemudian dianalisis secara kualitatif dengan studi literatur untuk memprediksi pengaruhnya terhadap potensi pencemaran air tanah bebas di daerah penelitian.

Tabel 2. Klasifikasi potensi pencemaran air tanah berdasarkan skor (Vrba & Zoporozec, 1994)

Skor	Klasifikasi
0,0 - 0,1	Tidak berpotensi tercemar
0,1- 0,3	Potensi pencemaran rendah
0,3- 0,5	Potensi pencemaran sedang
0,5- 0,7	Potensi pencemaran tinggi
0,7- 1,0	Potensi pencemaran ekstrim

Informasi tematik potensi pencemaran air tanah yang telah dihasilkan kemudian digunakan untuk menyusun SIG berbasis web. Perangkat lunak yang dipakai adalah Arc GIS online. Penyusunan SIG berbasis web diawali dengan mengkonversi informasi spasial digital potensi pencemaran air tanah yang telah dihasilkan sebelumnya. Layer geospasial digital yang pada awalnya memiliki format *shapefile* (*shp*) dikonfigurasi menjadi file yang terkompresi. File yang telah dikompres kemudian dimasukkan pada ekosistem SIG berbasis web. Visualisasi program disesuaikan dengan kaidah peta tematik berbasis web, sehingga program dilengkapi dengan fitur dasar penyaji layer, simbol, legenda, skala peta, orientasi, inset, dan peta dasar (Longley *et al.*, 2015, Kraak & Ormelling, 2010). Program juga dilengkapi dengan fitur terapan, meliputi pengukur objek, pengunggah data, dan analisis data. Fitur dasar dan fitur terapan diletakkan dalam *toolbar* agar pengguna dapat berinteraksi secara langsung. Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kompatibilitas program terhadap beragam perangkat elektronik. Pengujian dilakukan menggunakan media *smartphone* dan laptop dengan beragam spesifikasi prosesor. Alur metode penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.

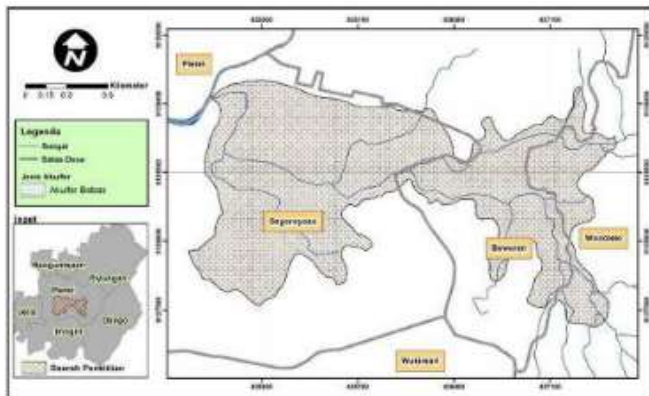


Gambar 5. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Akuifer Bebas

Jenis akuifer merupakan variabel pertama metode GOD. Berdasarkan interpretasi data pengeboran dinas penyediaan air baku Kabupaten Bantul yang diperkuat dengan fakta dan temuan di lapangan, jenis akuifer penyedia air tanah yang digunakan penduduk adalah akuifer bebas. Lapisan akuifer bebas merupakan lapisan penampung air tanah yang hanya dibatasi oleh satu lapisan kedap air (Santosa & Adji, 2014; Todd, 2005). Lapisan kedap air tersebut berfungsi sebagai alas atau landasan akuifer. Lapisan akuifer bebas pada bagian atas ditandai dengan kenampakan muka air tanah (*water table*) (Santosa&Adji, 2014; Todd, 2005; Asdak, 2014).



Gambar 6. Peta tematik jenis akuifer bebas di daerah penelitian

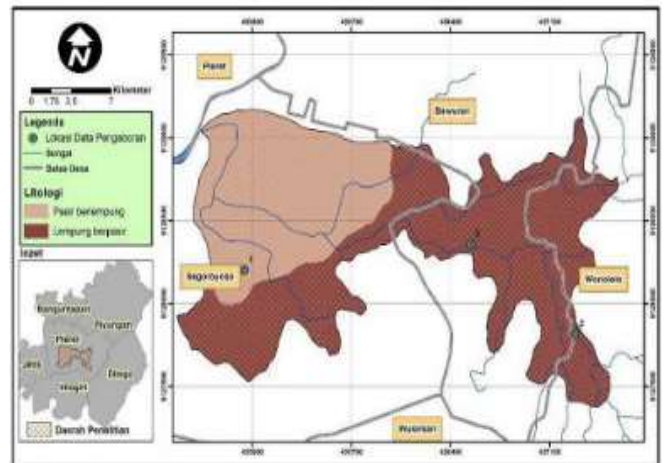
Muka air tanah atau *water table* dapat diamati pada sumur gali yang tersebar di daerah penelitian. Lapisan akuifer bebas di daerah penelitian terbentuk akibat endapan material aluvial dan koluvial yang bersifat lepas atau tidak tekonsolidasi. Endapan material tersebut membentuk lapisan yang porus atau kaya akan ruang antar butir, sehingga memiliki kemampuan yang baik dalam mengalirkan air secara horizontal maupun vertikal. Peta tematik akuifer bebas di daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan kriteria metode GOD, skor yang berlaku untuk akuifer bebas adalah 1.

3.2 Karakteristik Litologi Akuifer Bebas

Litologi akuifer merupakan variabel kedua dalam metode GOD. Akuifer bebas di daerah penelitian memiliki litologi yang bervariasi. Berdasarkan pendekatan bentuk lahan, daerah penelitian berbentuk lahan dataran aluvial memiliki karakteristik litologi akuifer yang terbentuk oleh pasir berlempung. Data pengeboran menunjukkan bahwa ketebalan lapisan tersebut mencapai 20 meter. Fakta tersebut diperkuat dengan hasil pemodelan stratigrafi yang pernah dilakukan oleh Santosa & Adji (2014). Eksistensi litologi yang terbentuk oleh pasir berlempung di dataran aluvial disebabkan oleh endapan material Sungai Opak (Purnama *et al.*, 2007). Material yang terendap di dataran aluvial tersebut tergolong dalam klasifikasi endapan vulkanik Gunung Merapi Muda (Rahardjo *et al.*, 1977). Berdasarkan kriteria

GOD, skor litologi yang terbentuk oleh pasir berlempung adalah 0,7.

Litologi akuifer pada wilayah berbentuk lahan lereng kaki koluvial memiliki struktur yang lebih halus jika dibandingkan dengan dataran aluvial. Berdasarkan data pengeboran, lereng kaki koluvial memiliki litologi yang terbentuk oleh lempung berpasir dengan ketebalan mencapai lebih dari 30 meter. Keberadaan material lempung berpasir merupakan indikasi terjadinya pencampuran atau *mixing* antara endapan material Sungai Opak dengan endapan erosi Perbukitan Baturagung. Material di daerah berbentuk lahan lereng kaki koluvial tergolong dalam klasifikasi aluvium dan formasi semilir (Rbahardjo, 1977). Skor litologi yang terbentuk oleh lempung berpasir adalah 0,6. Skor tersebut memiliki indeks yang lebih rendah jika dibandingkan dengan pasir berlempung pada bentuk lahan dataran aluvial. Justifikasi tersebut didasarkan pada teori bahwa semakin halus material atau litologi penyusun akuifer maka permeabilitasnya semakin rendah (Todd, 2005; Asdak, 2014). Peta tematik litologi akuifer dapat dilihat pada Gambar 7.



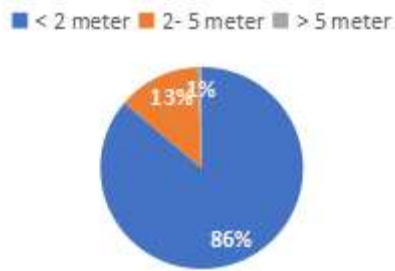
Gambar 7. Peta tematik litologi akuifer di daerah penelitian (Rahardjo *et al.*, 1977)

3.3 Karakteristik Kedalaman Air Tanah Bebas

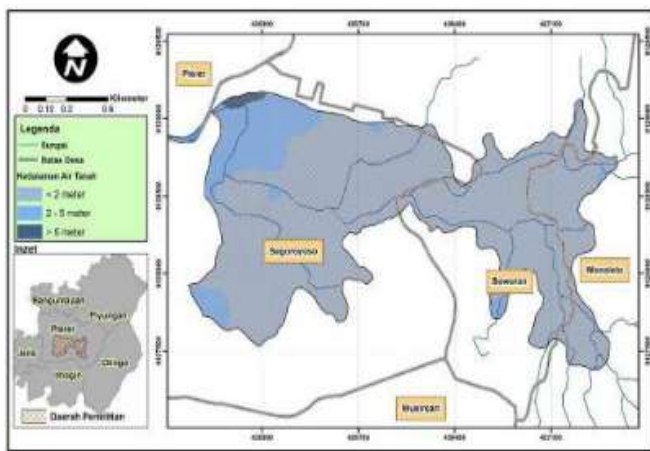
Variabel ketiga yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi pencemaran air tanah adalah kedalaman air tanah. Kedalaman air tanah merupakan variabel yang bersifat dinamis jika dibandingkan dengan dua variabel lainnya, yaitu jenis akuifer dan litologi akuifer. Salah satu penyebab dinamika air tanah adalah peralihan musim (Sejati, 2021; Asdak, 2014; Akhter & Hossain, 2017; Ha *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2020). Kedalaman air tanah pada musim hujan pada umumnya lebih dangkal dibandingkan musim kemarau. Daerah penelitian memiliki karakteristik kedalaman air tanah yang beragam. Berdasarkan analisis data primer yang dikumpulkan pada musim hujan (Gambar 3), kedalaman minimum dan maksimum pada musim hujan adalah 0,1 dan 5,9 meter.

Hasil analisis interpolasi spasial menunjukkan bahwa daerah penelitian didominasi oleh air tanah bebas dengan kedalaman kurang dari 2 meter. Air tanah dengan kedalaman kurang dari 2 meter memiliki pola sebaran mayor, sedangkan air tanah berkedalaman 2 sampai 5 meter dan lebih dari 5 meter memiliki pola sebaran minor. Persentase luas wilayah

berdasarkan kedalaman air tanah pada musim hujan dapat dilihat pada Gambar 8, sedangkan pola spasial kedalaman air tanah pada musim hujan dapat dilihat pada Gambar 9.

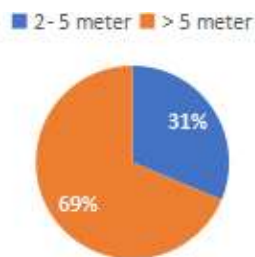


Gambar 8. Persentase luas wilayah berdasarkan kedalaman air tanah musim hujan bulan Januari 2020

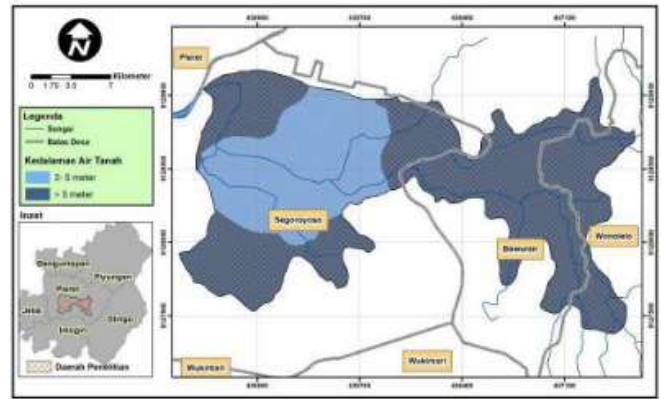


Gambar 9. Peta tematik kedalaman air tanah musim hujan bulan Januari 2020

Kondisi berbeda dijumpai saat musim kemarau. Air tanah pada musim kemarau berkedudukan lebih dalam jika dibandingkan pada musim hujan. Berdasarkan analisis data primer yang dihimpun pada musim kemarau (Gambar 4), kedalaman minimum dan maksimum air tanah adalah 2,3 dan 8,5 meter. Daerah penelitian didominasi oleh air tanah berkedalaman lebih dari 5 meter. Kondisi tersebut dijumpai di seluruh daerah penelitian yang berbentuk lahan dataran kaki koluviyal dan sebagian besar dataran aluivial. Kondisi kedalaman air tanah antara 2 hingga 5 meter pada musim kemarau dijumpai di sebagian kecil wilayah bentuk lahan dataran aluivial.



Gambar 10. Persentase luas wilayah berdasarkan kedalaman air tanah musim kemarau bulan Juni 2020



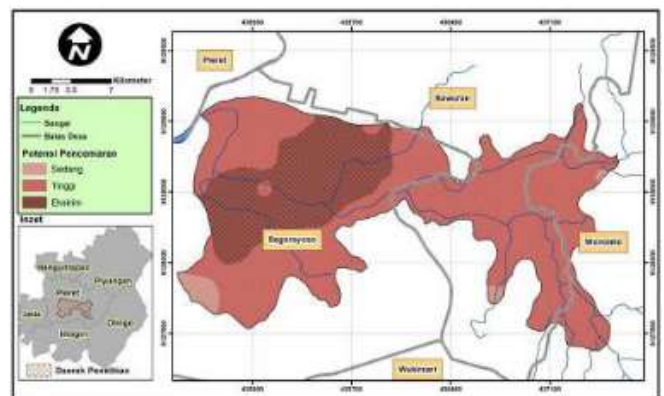
Gambar 11. Peta tematik kedalaman air tanah musim kemarau bulan Juni 2020

Persentase luas wilayah berdasarkan kedalaman air tanah pada musim kemarau dapat dilihat pada Gambar 10, sedangkan Gambar 11 menjabarkan pola spasialnya. Variasi kedalaman air tanah mengakibatkan variasi skoring. Berdasarkan kriteria yang ditetapkan dalam metode GOD, skor 1 untuk kedalaman air tanah kurang dari 2 meter, skor 0,9 untuk kedalaman 2 hingga 5 meter, dan skor 0,8 untuk kedalaman lebih dari 5 meter.

3.4 Potensi Pencemaran Air Tanah Bebas

Potensi pencemaran air tanah dijabarkan secara temporal, yaitu pada musim hujan dan musim kemarau. Penjabaran tersebut dilakukan karena variabel kedalaman air tanah bersifat dinamis terhadap perubahan musim. Penjabaran potensi air pencemaran secara temporal sekaligus menjadi unsur *novelty* atau kebaruan karena penelitian terdahulu tidak memasukkan elemen dinamika perubahan kedalaman air tanah.

Visualisasi pola spasial potensi pencemaran air tanah pada musim hujan dapat dilihat pada Gambar 12. Potensi pencemaran air tanah di daerah penelitian diklasifikasi menjadi tiga, yaitu sedang, tinggi, dan ekstrim.



Gambar 12. Peta tematik potensi pencemaran air tanah musim hujan bulan Januari 2020

Berdasarkan Gambar 12 terlihat bahwa klasifikasi ekstrim mendominasi daerah penelitian yang berbentuk lahan dataran aluivial. Potensi pencemaran air tanah ekstrim terjadi karena akuifer bebas di bentuk lahan dataran aluivial memiliki litologi yang terbentuk oleh pasir berlempung, dan

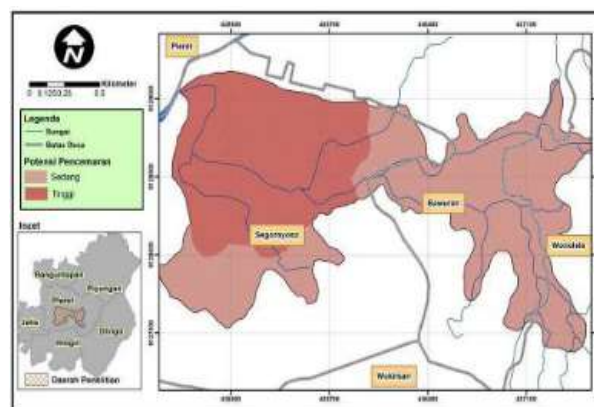
sebagian besar berkedalaman air tanah kurang dari 2 meter. Eksistensi litologi akuifer bebas yang terbentuk oleh pasir berlempung berpotensi mempermudah transmisi polutan cair secara vertikal maupun horizontal. Polutan cair dapat leluasa bergerak dan menyebar melalui ruang antar butir atau pori-pori mikro yang terbentuk pada litologi akuifer pasir berlempung. Muka air tanah dengan kedalaman kurang dari 2 meter juga memperpendek jarak infiltrasi dan perkolasi polutan cair menuju zona jenuh air tanah (Sejati, 2020), sehingga sumber polutan cair yang terdapat pada permukaan tanah dapat mencapai zona jenuh air tanah dengan cepat. Klasifikasi selanjutnya adalah potensi pencemaran air tanah tinggi. Klasifikasi tersebut memiliki indeks atau skor total yang lebih rendah jika dibandingkan dengan klasifikasi ekstrim. Distribusi potensi pencemaran air tanah pada kelas tinggi meliputi sebagian besar daerah penelitian yang berbentuk lahan dataran kaki koluvial. Meskipun sebagian besar dataran kaki koluvial berkedalaman air tanah kurang dari dua meter, namun eksistensi lempung berpasir sebagai pembentuk litologi akuifer bebas menyebabkan indeks skor total di kelas tinggi tidak sama dengan kelas ekstrim. Litologi akuifer yang terbentuk oleh lempung berpasir memiliki karakteristik material yang lebih halus dengan permeabilitas yang lebih lambat jika dibandingkan dengan pasir berlempung. Kondisi tersebut juga menyebabkan penyebaran polutan cair lebih terhambat. Klasifikasi yang ketiga adalah potensi pencemaran air tanah tingkat sedang. Klasifikasi ini hanya terdapat secara minor, yaitu di sebagian kecil dataran kaki koluvial. Potensi pencemaran air tanah pada tingkat sedang terdapat pada dataran kaki koluvial berkarakteristik lapisan akuifer bebas, litologi terbentuk oleh lempung berpasir, dan kedalaman air tanah lebih dari 2 meter. Rincian klasifikasi potensi pencemaran air tanah musim hujan berdasarkan wilayah administrasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rincian klasifikasi potensi pencemaran air tanah musim hujan berdasarkan bentuklahan dan wilayah administrasi

Klasifikasi potensi pencemaran	Luas (hektar)	Persebaran berdasarkan bentuklahan	Persebaran berdasarkan desa
Sedang	6,7	Sebagian dataran kaki koluvial	Sebagian Desa Segoroyoso, sebagian Desa Bawuran, sebagian Desa Wonolelo
Tinggi	203,9	Sebagian dataran kaki koluvial	Sebagian Desa Segoroyoso, sebagian Desa Bawuran, sebagian Desa Wonolelo
Ekstrim	77,3	Dataran aluvial	Sebagian Desa Segoroyoso

Pola spasial dan klasifikasi potensi pencemaran air tanah musim kemarau berbeda dengan musim hujan. Berdasarkan hasil analisis yang divisualkan pada Gambar 13, terlihat bahwa daerah penelitian diklasifikasi menjadi dua,

yaitu potensi pencemaran air tanah sedang dan tinggi. Kondisi tersebut disebabkan karena perubahan kedalaman air tanah. Air tanah berkedalaman kurang dari 2 meter tidak dijumpai lagi saat musim kemarau. Musim kemarau menyebabkan perubahan muka air tanah karena berkurangnya imbuhan air tanah dan penggunaan secara intensif oleh penduduk setempat. Air tanah yang bertambah dalam memang menyebabkan aksesibilitasnya semakin sulit, namun berdasarkan konteks metode GOD bertambah dalamnya air tanah menyebabkan indeks atau skor yang diberikan semakin rendah (Vrba & Zoporec, 1994). Jarak vertikal yang dijangkau polutan cair untuk mencapai zona jenuh air tanah semakin jauh.



Gambar 13. Peta tematik potensi pencemaran air tanah musim kemarau bulan Juni 2020

Potensi pencemaran air tanah tinggi terdistribusi di sebagian besar dataran aluvial dan sebagian kecil dataran kaki koluvial. Pola distribusi tersebut juga mengindikasikan bahwa seluruh wilayah dataran aluvial dan sebagian kecil dataran kaki koluvial memiliki fluktuasi kedalaman air tanah cukup tinggi. Sebagai contoh, dataran aluvial dan dataran kaki koluvial yang pada musim hujan berkedalaman air tanah kurang dari 2 meter mengalami perubahan kedalaman menjadi lebih dari 3 meter. Potensi pencemaran air tanah sedang terdapat pada sebagian besar dataran kaki koluvial dan sebagian kecil dataran aluvial. Rincian klasifikasi potensi pencemaran air tanah musim kemarau berdasarkan wilayah administrasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rincian klasifikasi potensi pencemaran air tanah musim kemarau berdasarkan bentuk lahan dan wilayah administrasi

Klasifikasi potensi pencemaran	Luas (hektar)	Persebaran berdasarkan bentuklahan	Persebaran berdasarkan desa
Sedang	164,5	Sebagian dataran kaki koluvial	Sebagian Desa Segoroyoso, sebagian Desa Bawuran, sebagian Desa Wonolelo
Tinggi	123,4	Sebagian dataran kaki koluvial, sebagian dataran aluvial	Sebagian Desa Segoroyoso

Aktivitas penduduk yang berpengaruh terhadap pencemaran air tanah perlu diidentifikasi untuk mengetahui

sumber pencemar air tanah bebas di daerah penelitian. Penggunaan lahan digunakan sebagai variabel pendugaan. Berdasarkan analisis citra satelit Landsat 8 dan survei lapangan, penggunaan lahan di daerah penelitian diklasifikasi menjadi pemukiman, sawah, ladang, kebun, belukar, dan lokasi pembuangan kotoran ternak. Berdasarkan studi literatur, pengaruh penggunaan lahan terhadap pencemaran air tanah diwujudkan dalam bentuk angka yang dikenal dengan istilah skor spesifik (Ribeiro & Dill, 2006).

Semakin tinggi skor spesifik, semakin tinggi pula pengaruhnya terhadap pencemaran air tanah (Ahadiyah & Widyastuti, 2020; Widyastuti *et al.*, 2021). Skor spesifik penggunaan lahan pemukiman, sawah, ladang, kebun, belukar, dan lokasi pembuangan kotoran ternak berturut-turut adalah 75, 90, 90, 90, 0, dan 100 (Ribeiro & Dill, 2006). Jika hanya berdasarkan skor spesifiknya, semua penggunaan lahan berpengaruh signifikan terhadap pencemaran air tanah, kecuali belukar. Untuk mendapatkan pendugaan yang lebih komprehensif, persebaran penggunaan lahan dianalisis berdasarkan informasi geospasial potensi pencemaran air tanah yang telah dihasilkan. Penggunaan lahan yang berpengaruh terhadap pencemaran air tanah ditentukan berdasarkan skor spesifik, luasan, atau jumlah lokasi, dan keberadaannya terhadap klasifikasi potensi pencemaran air tanah. Berdasarkan hasil analisis, penggunaan lahan yang paling berpengaruh terhadap potensi pencemaran air tanah adalah sawah dan lokasi pembuangan kotoran ternak. Sawah menjadi penggunaan lahan berbentuk area yang paling berpengaruh terhadap pencemaran air tanah dibandingkan area lainnya karena keberadaannya pada wilayah potensi pencemaran air tanah berkategori ekstrim hingga tinggi dan luasannya paling besar. Selain sawah, penggunaan lahan yang paling berpengaruh terhadap pencemaran air tanah adalah lokasi pembuangan kotoran ternak karena berada dalam kategori zonasi potensi pencemaran ekstrim hingga tinggi. Untuk meminimalkan pencemaran air tanah, beragam upaya perlu dilakukan di setiap penggunaan lahan yang berpengaruh terhadap pencemaran air tanah. Peminimalan pencemaran air tanah di wilayah pemukiman dapat dilakukan dengan membuat penampungan air limbah domestik yang kedap air. Tampungan air limbah domestik, termasuk *septic tank* perlu dipastikan kedap air agar polutan tidak mencapai zona jenuh air tanah. Tampungan limbah domestik hendaknya dikuras secara berkala. Pengecekan kualitas air tanah juga perlu dilakukan secara berkala untuk mengetahui kelayakan air tanah sebagai sumber pemenuhan kebutuhan domestik. Minimalisasi sumber pencemar di area sawah, kebun, dan ladang dapat dilakukan dengan sosialisasi dan pelatihan mengenai takaran penggunaan pupuk. Penggunaan pupuk sesuai takaran dilakukan untuk meminimalisir terjadinya pencemaran air tanah akibat nitrat (Rosell, 2021). Limbah hasil peternakan juga perlu dikelola untuk meminimalkan pencemaran air tanah. Kotoran ternak yang menumpuk menjadi sumber potensial bagi produksi biogas, sehingga sosialisasi dan pelatihan pembuatan biogas perlu diberikan kepada peternak.

Berdasarkan telaah dari penelitian terdahulu, metode GOD memiliki validitas yang baik (Mahrez *et al.*, 2018; Vrba & Zoporozec, 1994), terutama sensitivitasnya terhadap polutan nitrat. Potensi pencemaran air tanah yang telah

dihasilkan penelitian ini dapat dikembangkan sebagai riset lanjutan. Uji validitas terhadap potensi pencemaran air tanah di daerah penelitian dapat dilakukan melalui uji laboratorium sampel air tanah.

3.5 Sistem Informasi Geografis Potensi Pencemaran Air Tanah Bebas Berbasis Web

Visualisasi SIG potensi pencemaran air tanah berbasis web dilengkapi dengan beragam fitur yang memungkinkan penggunaan secara interaktif. Program berbasis web tersebut telah diuji menggunakan perangkat elektronik dengan beragam tipe prosesor. Pengujian dilakukan di lingkungan berkoneksi internet dengan kapasitas unduh (*download*) 19,8 Mbps. Rincian hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian program

Media pengujian	Tipe prosesor	Kecepatan display (dalam detik)	Aksesibilitas fitur
Laptop	Intel core i7-8750	5,4	✓
Laptop	Intel core i5-5350u	7,4	✓
Laptop	Intel core celeron n3050	10,4	✓
Laptop	Intel core 2 duo t5670	24,5	✓
Laptop	Intel core i5-10300h	12,6	✓
Tablet	Apple a10 fusion 14,6	16,6	✓
Smartphone	Snapdragon 835	7,4	✓
Smartphone	Exynos 9820	9,1	✓
Smartphone	Snapdragon 625	5,4	✓

Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa program kompatibel dengan beragam perangkat elektronik. Program dapat diakses dalam waktu singkat, yaitu kurang dari satu menit. Aksesibilitas perangkat elektronik terhadap program dipengaruhi oleh kapasitas koneksi internet dan tipe prosesor yang digunakan. Fitur dasar dan fitur terapan yang terdapat pada aplikasi juga dapat digunakan dengan stabil.

Program dapat diakses melalui link berikut <https://arcg.is/10me4K>. Distribusi spasial dan temporal potensi pencemaran air tanah di daerah penelitian dapat diketahui secara interaktif melalui program tersebut. Program juga dapat difungsikan untuk penggunaan lanjut dengan fitur terapan. Contoh kasus yang dapat dielaborasi menggunakan fitur terapan adalah penentuan distribusi penggunaan lahan di setiap kelas potensi pencemaran air tanah. Pengguna dapat mengunggah (*uploading*) data geospasial penggunaan lahan di daerah penelitian. Format data yang dapat diunggah meliputi *shapefile* (SHP), *comma separated values* (CSV), *keyhole markup language* (KML), *global positioning system exchange* (GPX), dan *geo-JSON*. Program juga dapat diterapkan untuk menyusun kerangka sampling jika diperlukan analisis lebih lanjut mengenai kualitas air tanah pada setiap kelas potensi pencemaran. Kerangka sampling kualitas air tanah dapat ditentukan secara langsung menggunakan teknik *digitizing on screen*. Hasil digitasi dapat digunakan untuk memandu surveyor lapangan untuk mencapai lokasi yang telah ditentukan. Program juga dapat digunakan untuk melakukan

komparasi terhadap berbagai model potensi pencemaran air tanah selain, seperti DRASTIC, SINTAC, dan PCSM.

4. KESIMPULAN

Daerah penelitian memiliki karakteristik potensi pencemaran air tanah bebas yang bervariasi. Variabel yang paling berpengaruh terhadap analisis potensi pencemaran air tanah adalah kedalaman air tanah. Berdasarkan metode GOD, indeks potensi pencemaran air tanah bebas tertinggi, yaitu pada kelas ekstrim, dijumpai di daerah penelitian yang litologinya terbentuk oleh pasir berlempung, dan kedalaman air tanah kurang dari 2 meter. Indeks potensi pencemaran air tanah semakin rendah jika litologi penyusun akuifer semakin halus dan air tanah semakin dalam. Potensi pencemaran air tanah di daerah penelitian bersifat dinamis. Dinamika tersebut disebabkan karena variabel kedalaman air tanah memiliki sensitivitas terhadap perubahan musim, sehingga potensi pencemaran air tanah musim hujan berbeda dengan musim kemarau. Indeks tertinggi potensi pencemaran air tanah musim hujan berada pada kelas ekstrim dengan distribusi luas wilayah sebesar 27%. Indeks tertinggi potensi pencemaran air tanah musim kemarau berada pada kelas tinggi dengan distribusi luas wilayah mencapai 43%. Analisis potensi pencemaran air tanah dalam penelitian ini tidak menggunakan variabel kemiringan lereng karena daerah penelitian berada di dataran aluvial dan dataran kaki koluvial yang relatif datar. Perbedaan kemiringan lereng tidak terlalu signifikan.

Berdasarkan hasil yang telah dicapai diketahui pula bahwa pemukiman, sawah, kebun, ladang, dan lokasi pembuangan kotoran ternak berpengaruh signifikan terhadap pencemaran air tanah. Penggunaan lahan yang diprediksi paling berpengaruh terhadap pencemaran air tanah adalah sawah dan lokasi pembuangan kotoran ternak. Langkah yang dapat dilakukan untuk meminimalisir pengaruh penggunaan lahan terhadap pencemaran air tanah antara lain adalah membuat penampung limbah cair domestik kepal air, pengecekan kualitas air tanah secara berkala, pelatihan, dan sosialisasi penggunaan pupuk sesuai takaran dan pembuatan biogas dari kotoran ternak kepada petani dan peternak. Potensi pencemaran air tanah yang telah dijabarkan perlu divalidasi menggunakan sampel kualitas air tanah. Parameter uji yang digunakan dapat beragam, sehingga tidak hanya berfokus pada parameter nitrat. Keragaman parameter uji sampel kualitas air diharapkan dapat mempertajam analisis untuk mengetahui parameter apa saja yang paling sensitif terhadap model GOD.

Program SIG potensi pencemaran air tanah berbasis web mampu digunakan sebagai media diseminasi. Berdasarkan hasil kajian, program kompatibel dengan beragam perangkat elektronik, seperti laptop, tablet, dan *smartphone* sejauh didukung dengan koneksi internet yang memadai. Program juga mampu diterapkan untuk melakukan kajian lanjut berdasarkan informasi spasial potensi pencemaran air tanah, misalnya mengetahui distribusi penggunaan lahan, menentukan kerangka sampling kualitas air tanah, dan menyusun rancangan zonasi perlindungan air tanah pada akuifer bebas di daerah penelitian.

PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Amikom Yogyakarta atas dukungan pembiayaan penelitian melalui Program Hibah Penelitian Internal Dana Perguruan Tinggi 2020-2. Penghargaan yang tinggi juga penulis sampaikan kepada masyarakat di Desa Segoroyoso, Desa Bawuran, dan Desa Wonolelo, Kecamatan Pleret, Kabupaten Bantul, Yogyakarta yang telah memberikan izin pengumpulan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-haidarey, M. J. S., Hussain, H. M., Al-ansari, N., & Knutsson, S. (2014). Evaluation and mapping groundwater suitability for irrigation using GIS in Najaf governorate, Iraq. *Journal of Environmental Hydrology*, 22(4), 1–16.
- Adji, T. N., & Sejati, S. P. (2014). Identification of groundwater potential zones within an area with various geomorphological units by using several field parameters and a GIS approach in Kulon Progo Regency, Java, Indonesia. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0779-z>
- Adnan, M. S., Hendrayana, H., & Ekaputra, D. P. (2013). Groundwater model as a tool for sustainable groundwater management. *International Journal of Integrated Engineering*, Vol. 5, pp. 46–57. Retrieved from <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/771/502>
- Ahadiah, S. N., & Widyastuti, M. (2020). Study of groundwater vulnerability to contamination using the DRANTHVP method in wates groundwater Basin, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 02022, 1–7.
- Akhter, S., & Hossain, S. (2017). Groundwater modelling of dhaka city and surrounding areas and evaluation of the effect of artificial recharge to aquifers. *World Journal of Research and Review*, 5(3), 54–60.
- Al, A. A., Zainab, M., Hussain, D. A., & Ansari, N. Al. (2020). Assessment of the groundwater suitability for irrigation near Al Kufa City and preparing the final water quality maps using spatial distribution tools. *Environmental Earth Sciences*, 79(13), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09060-w>
- Asdak, C. (2014). Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai. Yogyakarta: UGM Press.
- Baba, M. El, Kayastha, P., Huysmans, M., & Smedt, F. De. (2020). Contamination assessment and mapping using. *Water*, 12, 1–19.
- Boumans, L., Fraters, D., & Drecht, G. Van. (2017). Mapping nitrate leaching to upper groundwater in the sandy regions of the Netherlands, using conceptual knowledge. *Environmental Monitoring Assessment*, 137, 243–249. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9756-5>

- Ha, K., Lee, E., An, H., Kim, S., Park, C., Kim, G., & Ko, K. (2021). Evaluation of seasonal groundwater quality changes associated with groundwater pumping and level fluctuations in an agricultural area, Korea. *Water*, 13(51), 1–21.
- Hendrayana, H., & Vicente, V. A. de S. (2013). Cadangan airtanah berdasarkan geometri dan konfigurasi sistem akuifer cekungan airtanah Yogyakarta-Sleman. *Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-6*, 356–370.
- Kaddour, K., Hacen, B. El, Hlima, D., & Yasmina, D. (2018a). Groundwater vulnerability assessment using god method in boulimat coastal district of Bejaia area north east Algeria. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 13(3), 109–116.
- Kraak, M. J., & Ormelling, F. (2010). *Cartography: visualization of spatial data 3rd edition*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Lan, T., & Longley, P. (2019). Geo referencing and mapping 1901 census addresses for England and Wales. *International Journal of Geo- Information*, 8(320), 2–14.
- Li, H., Lu, Y., Zheng, C., Zhang, X., Zhou, B., & Wu, J. (2020). Seasonal and inter-annual variability of groundwater and their responses to climate change and human activities in arid and desert areas: *Water*, 12(303), 1–23.
- Longley, P. A., Goddchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. New Jersey: John Willey and Son Inc.
- Mahrez, B., Klebingat, S., & Agaguenia, S. (2018). A gis-based god model and hazard index analysis: the quaternary coastal collo aquifer. (June 2019). <https://doi.org/10.1111/gwat.12824>
- Maria, R. (2017). Comparative studies of groundwater vulnerability assessment comparative studies of groundwater vulnerability assessment. *Global Colloquium on Geo Sciences and Engineering*, 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012018>
- Olusheyi, O., Balogun, M., Azeem, A., Adesina, K., Okehi, A., & Matthew, A. (2020). Effects of industrialization on groundwater quality in Shagamu and Ota industrial areas of Ogun State, Nigeria. *Heliyon*, 6, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04353>
- Oroji, B. (2019a). Assessing groundwater vulnerability by pollution mapping in Iran : case study Hamadan – Bahar plain. *Geofisica Internacional*.
- Oroji, B. (2019b). Assessing groundwater vulnerability assessment using gis based drastic and God in the Asadabad plain. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(6), 1809-1816.
- Purnama, I. L. S. (2019). Ketersediaan dan kualitas airtanah pada akuifer tidak tertekan di Kecamatan Jawilan Dan Kopu, Kabupaten Serang. 33(1), 16–25. <https://doi.org/10.22146/mgi.38813>
- Purnama, S., Suyono, & Sulaswono, B. (2007). Sistem akuifer dan potensi air tanah daerah aliran sungai (das) opak. *Forum Geografi*, 21(2).
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, & Rosidi, H. M.. (1977). *Peta geologi lembar Yogyakarta, Jawa*.
- Riasasi, W., & Sejati, S. P. (2019). Potential of groundwater to supply domestic water necessity in evacuation shelters of Merapi volcano eruption. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 271, 1–11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/271/1/012014>
- Ribeiro, T. Y. S. L., & Dill, A. M. M. C. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, 14, 79–99. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>.
- Rosell, P. (2021). A methodology for assessing groundwater pollution hazard by nitrates from agricultural sources: Application to the Gallocanta Groundwater Basin (Spain). *Sustainability*, 13(6321), 1–15.
- Santosa, L. W., & Adji, T. N. (2014). *Karakteristik akuifer dan potensi airtanah Graben Bantul*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Sartika, D., Muhni, A., & Putra, H. S. (2020). Kerentanan airtanah terhadap pencemaran menggunakan metode god di Kota Banda Aceh. *Journal Aceh Physical Society*, 9(3), 84–90. <https://doi.org/10.24815/jacps.v9i3.17332>
- Sejati, S. P. (2021). Tingkat fluktuasi air tanah pada jangka pendek di Kecamatan Ngemplak, Kabupaten Sleman, provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(1), 121–129. <https://doi.org/https://doi.org/10.29122/jtl.v22i1.3985> <https://doi.org/10.29122/jtl.v22i1.3985>
- Sejati, S.P. (2019). Perbandingan akurasi metode idw dan kriging dalam pemetaan muka air tanah. *Majalah Geografi Indonesia*, 33(2), 49–57. <https://doi.org/10.22146/mgi.41473>
- Sejati, S.P. (2020). Potensi pencemaran air tanah bebas pada sebagian kawasan resapan air di lereng selatan gunung api merapi. *Jurnal Pendidikan Geografi: Kajian, Teori, Dan Praktik Dalam Pendidikan Dan Ilmu Geografi*, 25(01), 25–38. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17977/um017v25i12020p025>
- Shahab, A., Qi, S., Rad, S., & Khan, M. (2018). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based drastic method in the irrigated and coastal region of Sindh Province, Pakistan. *Hydrology Research*. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.001>
- Subagiyo, L., Lazar, P. A. D., & Sumaryono. (2017). Sebaran indikasi air tanah terkontaminasi lindi di sekitar tempat pembuangan akhir sampah Bukit Pinang Kota

- Samarinda. *Journal of Physical Science and Engineering*, 2(1), 13–19.
- Sutardi, A., Suprayogi, S., & Adji, N. (2017). Kajian kualitas airtanah bebas antara sungai kuning dan sungai tepus di Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta, Indonesia. *Majalah Geografi I*, 31(1), 31–38.
- Todd, D. K. (2005). *Groundwater Hydrology*. New York: John Willey and Sons.
- Tyas, B., Rukmana, S., & Bargawa, W. S. (2020). Assessment of groundwater vulnerability using assessment of groundwater vulnerability using God method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/477/1/012020>
- Vrba, J., & Zoporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. Hannover: International Association of Hydrogeologists.
- Widyastuti, M., Suprayogi, S., Hadi, M. P., & Christanto, N. (2021). Study of Groundwater Vulnerability to Pollution in The Tambakbayan Watershed in 2006 and 2007. *Jurnal Geografi Gea*, 21(April), 1–15.
- Zhou, Z., Ansems, N., & Torfs, P. (2015). A global assessment of nitrate contamination in groundwater. *International Groundwater Resources Assessment Center; Internship report; Wageningen University: Wageningen, The Netherlands*.