

Pendugaan Kerentanan Airtanah Dangkal Terhadap Intrusi Airlaut Menggunakan Metode GALDIT di Kecamatan Sukolilo Kota Surabaya

Ferryati Masitoh* dan Basofi Andri Saifanto

Program Studi Geografi, Departemen Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Malang
Jl. Semarang No.5 Kota Malang Jawa Timur 65145 Indonesia
Email: ferryati.masitoh.fis@um.ac.id

Abstrak

Airtanah dangkal memiliki kerentanan yang tinggi terhadap intrusi air laut. Kecamatan Sukolilo Kota Surabaya berada di pesisir Selat Madura, sehingga menjadikan pentingnya pendugaan kerentanan airtanah terhadap intrusi air laut. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode GALDIT dengan variabel: Keterdapatannya airtanah (G), Konduktivitas hidrolis akuifer (A), Tinggi muka airtanah terhadap air laut (L), Jarak tegak lurus muka air tanah dari garis pantai (D), Intrusi air laut (I) dan Ketebalan Akuifer (T). Pada variabel G, daerah penelitian didominasi akuifer dangkal. Variabel A menunjukkan bahwa sebagian besar daerah penelitian memiliki konduktivitas hidrolis sebesar 22 m/hari yang cukup rentan terhadap intrusi air laut. Variabel L menunjukkan bahwa elevasi muka airtanah cukup kecil sebesar 1,5 m. Variabel D menunjukkan kerentanan airtanah cukup tinggi di sepanjang garis pantai. Variabel I merupakan variabel yang berkaitan dengan kualitas airtanah. Daerah yang dekat dengan pantai memiliki Daya Hantar Listrik dan Cl⁻ yang lebih tinggi. Variabel T merupakan ketebalan akuifer dangkal kurang dari 10 m. Hasil penelitian berdasarkan metode GALDIT menunjukkan bahwa 30,30% daerah penelitian berkategori Kerentanan Airtanah yang tinggi terhadap Intrusi Air laut. Kerentanan Airtanah tinggi tersebar di sepanjang garis pantai, atau sebagian besar kelurahan Keputih.

Kata kunci: airtanah, intrusi airlaut, GALDIT

Abstract

Estimation of Shallow Groundwater Vulnerability to Seawater Intrusion Using the GALDIT Method in Sukolilo District, Surabaya City

Shallow groundwater is highly vulnerable to seawater intrusion. Sukolilo District, Surabaya City, is on the coast of the Madura Strait, making it important to estimate groundwater vulnerability to seawater intrusion. The method used in this research is the GALDIT method with variables: Groundwater availability (G), Hydraulic conductivity of the aquifer (A), Groundwater level relative to seawater (L), Perpendicular distance of the groundwater level from the coastline (D), Water intrusion sea (I) and Aquifer Thickness (T). In variable of G, the research area is dominated by shallow aquifers. The variable of A shows that most of the study area has a hydraulic conductivity of 22 m/day, which is quite vulnerable to seawater intrusion. The variable of L shows that the groundwater level is relatively small at 1.5 m. The variable of D shows that groundwater vulnerability is relatively high along the coastline. Variable I is a variable related to groundwater quality. Areas close to the coast have higher electrical conductivity and Cl⁻. The variable of T is the thickness of a shallow aquifer of less than 10 m. The research results based on the GALDIT method show that 30.30% of the research areas are in the category of high groundwater vulnerability to seawater intrusion, while the others are in the medium to low category. There is high groundwater vulnerability along the coastline and most of the Keputih sub-district.

Keywords: GALDIT, groundwater, seawater intrusion

PENDAHULUAN

Kerentanan air tanah berkaitan dengan kemampuan air tanah untuk bertahan terhadap polusi atau kontaminasi pada permukaan tanah sampai lapisan akuifer (Kasperczyk *et al.*, 2016). Kerentanan airtanah dapat dipengaruhi oleh faktor hidrogeologi antara lain ketinggian muka airtanah, penyerapan cadangan permukaan, kontak antara tanah dan air permukaan serta kecepatan rata – rata aliran airtanah (Tasnim & Tahsin, 2016). Airtanah di daerah pesisir sangat sensitif terhadap ancaman kontaminasi akibat dari aktivitas sosio-enviromental maupun perubahan iklim secara global (Bertrand *et al.*, 2022; Wardhana *et al.*, 2017). Ancaman perubahan iklim, pemanasan global serta kenaikan muka air laut menjadikan pengelolaan airtanah di wilayah pesisir di masa mendatang menjadi semakin penting dilakukan (Bouderbala, 2020).

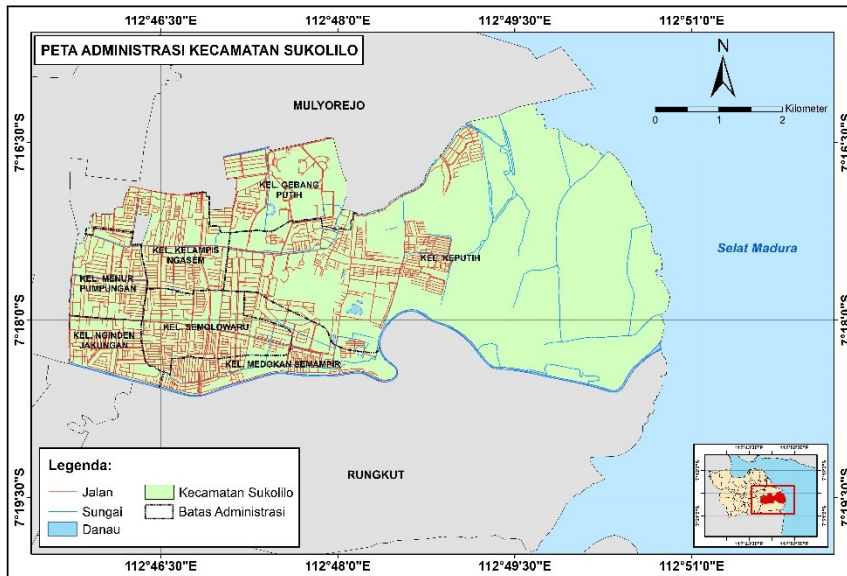
Perkembangan wilayah di pesisir timur Surabaya sangat pesat (Gambar 1) terutama pembangunan kawasan permukiman dan industri yang mengakibatkan penggunaan airtanah dan buangan limbah ke dalam akuifer juga mengalami peningkatan. Kondisi tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan kualitas airtanah di seluruh bagian pesisir di Kota Surabaya (Indriastoni & Kustini, 2014). Penelitian juga menunjukkan adanya kerentanan terhadap intrusi yang berupa nilai Daya Hantar Listrik airtanah yang mendekati ambang batas yang ditentukan untuk airtanah akuifer dangkal. Aktivitas masyarakat yang berupa perikanan tambak di pesisir juga berpotensi menurunkan kualitas airtanah (Jang *et al.*, 2010). Polutan akan semakin mudah terinfiltrasi ke dalam airtanah dan dengan cepat menyebar luas karena karakteristik Geologis di Kecamatan Sukolilo Kota Surabaya berupa endapan alluvium (Qa) yang memiliki karakteristik sifat porous cepat (BLH, 2013).

Penelitian terkait dengan karakteristik akuifer di wilayah pesisir penting dilakukan untuk mengetahui kerentanan airtanah terhadap air laut atau faktor lainnya. (Gemilang *et al.*, 2017; Gemilang & Bakti, 2019; Kazakis *et al.*, 2018; Purnama, 2019). Metode GALDIT dapat diterapkan pada wilayah pesisir untuk mengukur atau menilai kerentanan airtanah terhadap intrusi air laut (Chachadi *et al.*, 2005; Kazakis *et al.*, 2018; Lubis *et al.*, 2018; Tasnim & Tahsin, 2016). (Ferreira *et al.*, 2005). Gemilang meneliti airtanah di Pulau Madura menggunakan metode GALDIT di Pulau Madura. Penelitian ini menghasilkan

bahwa kawasan pertanian garam di Pademawu Madura memiliki salinitas yang tinggi sehingga kerentanan airtanahnya berkategori tinggi (Gemilang *et al.*, 2017). Gemilang juga melakukan penelitian hidrokimia di Pesisir Simeulue Timur Aceh sebagai bentuk mitigasi intrusi airlaut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa airtanah belum tercemar airlaut, dan masih didominasi oleh proses interaksi antara batuan dan airtanah (Gemilang & Rahmawan, 2018). Kazakis meneliti kerentanan airtanah di kawasan wisata yang menunjukkan bahwa pada saat musim panas, kerentanan airtanah terhadap intrusi meningkat akibat tingginya aktivitas wisata (Kazakis *et al.*, 2018). Purnama juga melakukan penelitian di pesisir Cilacap yang menunjukkan bahwa sumur-sumur penduduk yang memiliki kedalaman kurang dari 25 meter memiliki kerentanan tertinggi terhadap intrusi airlaut (Purnama, 2019). Penelitian di pesisir Sunda menggunakan Metode GALDIT juga menunjukkan bahwa di Kecamatan Panimbang memiliki kerentanan airtanah lebih tinggi dibandingkan kawasan pesisir Sunda lainnya (Lubis *et al.*, 2018).

Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa Metode GALDIT merupakan metode yang paling baik digunakan untuk menilai kerentanan airtanah, terutama di kawasan pesisir, jika dibandingkan metode lainnya. Metode lainnya pada umumnya hanya mempertimbangkan kualitas airtanahnya saja, belum mempertimbangkan kondisi geologinya (Chachadi *et al.*, 2005; Tasnim & Tahsin, 2016). Metode GALDIT juga hanya menggunakan indeks untuk menilai kondisi daerah yang diteliti, sehingga memudahkan penggunaan metodenya (Lubis *et al.*, 2018). Metode GALDIT memiliki kesesuaian yang tinggi untuk mengidentifikasi kerentanan airtanah pesisir sebab mempertimbangkan kondisi hidrogeologi secara lengkap (Moghaddam *et al.*, 2017; Tasnim & Tahsin, 2016). Variabel yang digunakan antara lain Keterdapatn air tanah (*Groundwater occurrence aquifer type*), Konduktivitas hidrolik akuifer (*Aquifer hydraulic conductivity*), Tinggi muka airtanah terhadap air laut (*Height to groundwater level above sea*), Jarak tegak lurus muka air tanah dari garis pantai (*Distance from the shore*), Intrusi air laut (*Impact of existing status of seawater intrusion*) dan Ketebalan Akuifer (*Thickness of the aquifer*). (Chachadi *et al.*, 2005; Ferreira *et al.*, 2005; Moghaddam *et al.*, 2017).

Tujuan melakukan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi zona kerentanan airtanah



Gambar 1. Lokasi penelitian

menggunakan metode GALDIT di Kecamatan Sukolilo, Kota Surabaya. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi mengenai kerentanan airtanah terhadap intrusi airlaut, sebagai upaya untuk memitigasi pengaruh intrusi airlaut terhadap airtanah dan aktivitas masyarakat.

MATERI DAN METODE

Penilaian kerentanan airtanah dilakukan untuk mengetahui potensi terjadinya intrusi air laut terhadap airtanah. Metode GALDIT merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menilai kerentanan airtanah. Kerentanan airtanah diketahui dengan menerapkan metode pembobotan terhadap kondisi hidrogeologi akuifer pesisir. Metode pembobotan yang dimaksud merupakan pembobotan numerik untuk menilai potensi intrusi airtanah di wilayah pesisir (Chachadi & Ferreira, 2005).

Variabel yang digunakan GALDIT, antara lain: tipe akuifer/*groundwater presence* (G), konduktifitas hidraulik akuifer/*aquifer hydraulic conductivity* (A), ketinggian muka airtanah di atas permukaan air laut/*groundwater heads above sea level* (L), jarak tegak lurus terhadap garis pantai pada daerah yang ditinjau/*distance from the sea shore* (D), parameter hidrokimia sebagai kunci adanya intrusi air laut pada air tanah/*impact of the present position of seawater Intrusion* (I), dan ketebalan akuifer/*thickness of the aquifer* (T) (Chachadi & Ferreira, 2005; Ferreira *et al.*, 2005). Data yang digunakan dalam penelitian yaitu data

primer dan sekunder. Data primer yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: konduktivitas hidrolik akuifer dangkal, ketinggian muka airtanah di atas permukaan air laut, dan kondisi hidrokimia airtanah. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini antara lain tipe akuifer, jarak tegak lurus terhadap garis pantai pada daerah yang ditinjau, dan ketebalan akuifer.

Data konduktivitas hidrolik (K) pada akuifer dangkal dilakukan dengan menggunakan metode invers auger hole. Metode tersebut sesuai untuk mendapatkan nilai K pada kondisi tak jenuh terutama pada akuifer dangkal/bebas (*unconfined aquifer*) (Ojha *et al.*, 2017). Persamaan 1 dan 2 digunakan untuk mendapatkan nilai K pada akuifer pesisir di daerah penelitian.

$$K = 1,15 \cdot r \cdot \tan \alpha \tag{1}$$

$$\tan \alpha = \frac{\log_{10}(h_0+r) - \log_{10}(h_t+r)}{t-t_0} \tag{2}$$

Persamaan 1 memiliki nilai K dengan konduktivitas hidrolik (m/hari). Nilai r adalah jari-jari lubang invers auger hole, dan $\tan \alpha$ adalah kemiringan plot data. Pada persamaan 2, nilai h_0 dan h_t adalah penurunan muka air dalam lubang invers auger hole berdasarkan setiap satuan waktu t dan t_0 .

Data primer lainnya adalah data ketinggian muka airtanah dan kondisi hidrokimia airtanah. Kedua data tersebut didapatkan dari survey di beberapa sumur dangkal yang ada di daerah

penelitian. Hasil observasi pendahuluan menghasilkan bahwa hampir sebagian besar penduduk menggunakan air dari saluran perpipaan untuk memenuhi kebutuhan hidup. Hanya sedikit penduduk yang masih memiliki sumur airtanah, sehingga jumlah sumur yang digunakan dalam penelitian hanya sebanyak 3 sumur aktif. Kondisi hidrokimia diketahui dengan cara mengambil sampel airtanah pada sumur observasi. Sampel airtanah diuji di laboratorium untuk mendapatkan kadar HCO_3^{2-} , Cl^- dan Daya Hantar Listrik (DHL).

Data sekunder yang berupa tipe akuifer dan kedalaman akuifer didapatkan berdasarkan hasil

penelitian terdahulu di daerah penelitian (Harnandi & Rengganis, 2010). Data jarak tegak lurus terhadap garis pantai pada daerah yang ditinjau menggunakan Peta Rupa Bumi Indonesia (Peta RBI) Digital skala 1:25.000 yang dapat diakses melalui laman <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web>. Peta tersebut kemudian diolah menggunakan Sistem Informasi Geografi (SIG) dengan cara mengukur jarak secara tegak lurus dari pantai di daerah penelitian.

$$\text{GALDIT index} = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (3)$$

Tabel 1. Pembobotan pada Setiap Variabel GALDIT

Variabel	Bobot (Weights)	Sangat Rendah/ <i>Very Low</i> (2.5)	Rendah/Low (5)	Sedang/ <i>Moderate</i> (7.5)	Tinggi/ <i>High</i> (10)
Tipe Akuifer <i>Groundwater Presence</i> (G)	1	Akuifer terbatas (<i>Limited/Bounded</i>)	<i>Akuifer Semi Tertekan</i> (<i>Leaky Confined</i>)	Akuifer Bebas (<i>Unconfined</i>)	Akuifer Tertekan (<i>Confined</i>)
Konduktifitas Hidraulik Akuifer <i>Aquifer Hydraulic Conductivity</i> (A)	3	< 5	5 – 10	10 – 40	> 40
Ketinggian Muka Airtanah di Atas Permukaan Air Laut <i>Groundwater Heads Above Sea Level</i> (L)	4	> 2	1.5 – 2	1 – 1.5	< 1
Jarak Tegak Lurus Terhadap Garis Pantai Pada Daerah yang Ditinjau <i>Distance From The Sea Shore</i> (D)	4	< 1000	750 – 1000	500 – 750	< 500
Parameter Hidrokimia Sebagai Penanda Adanya Intrusi Air Laut pada Airtanah <i>Impact Of The Present Position Of Seawater Intrusion</i> (I)	1	< 1	1 – 1.5	1.5 – 2	> 2
Ketebalan Akuifer <i>Thickness Of The Aquifer</i> (T)	2	< 5	5 – 7.5	7.5 – 10	> 10

Sumber: (Chachadi *et al.*, 2005)

Tabel 2. Klasifikasi Indeks Kerentanan GALDIT

Indeks GALDIT	Indeks kerentanan
Rendah (<i>Low</i>)	< 5
Sedang (<i>Moderate</i>)	5 – 7,5
Tinggi (<i>High</i>)	> 7,5

Sumber: (Chachadi *et al.*, 2005; Kazakis *et al.*, 2018)

Indeks GALDIT digunakan untuk mengidentifikasi kerentanan airtanah terhadap air laut (kawasan pesisir). Tabel 1 menunjukkan pembobotan pada setiap variabel GALDIT. Setiap variabel dalam metode GALDIT dipetakan menggunakan SIG. Peningkatan nilai indeks GALDIT mengartikan bahwa potensi pencemaran air tanah meningkat dan secara bersamaan kerentanan akuifer terhadap intrusi air laut juga meningkat (Kazakis *et al.*, 2018). Variabel yang memiliki bobot paling tinggi adalah Ketinggian Muka Airtanah di Atas Permukaan Air Laut (L) dan Jarak Tegak Lurus Terhadap Garis Pantai Pada Daerah yang Ditinjau (D). Kedua variabel ini memiliki bobot paling tinggi sebab memiliki pengaruh yang paling besar terhadap pencemaran air laut dibandingkan variabel lainnya. Variabel yang memiliki bobot paling rendah yaitu Parameter Hidrokimia Sebagai Penanda Adanya Intrusi Air Laut pada Airtanah (I). Variabel ini rendah sebab bersifat penanda telah terjadi intrusi air laut di daerah penelitian.

$$W = \frac{P_r + P_w}{V} 100 \quad (4)$$

Penentuan bobot dan kelas pada tiap parameter GALDIT tergantung pada kondisi daerah dan keadaan di lapangan. Faktor penting untuk mengetahui atau menentukan tingkat kerentanan akuifer terhadap intrusi air laut yaitu jarak terhadap air laut, pengaruh intrusi air laut dan ketebalan akuifer. Faktor tersebut memiliki bobot yang tinggi, sehingga akan menentukan zona kerentanan airtanah terhadap intrusi air laut. Perhitungan nilai bobot setiap parameter perlu dilakukan untuk memperkirakan nilai indeks GALDIT pada persamaan 3. Pada persamaan 3 nilai W adalah bobot, sedangkan R adalah rating pada setiap variabel.

Analisis efektivitas bobot digunakan setelah mengetahui nilai bobot dan kelas pada tiap parameter. Analisis data hasil survei juga

digunakan untuk mengetahui nilai kerentanan sesuai dengan parameter GALDIT. Parameter yang digunakan sebanyak 6 indikator memiliki bobot tetap. Bobot tersebut telah ditentukan sebelumnya sehingga dapat mencerminkan relativitas setiap indikator terhadap intrusi air laut. Penentuan efektivitas bobot menggunakan persamaan 3. Pada persamaan 3, W adalah bobot efektif, V adalah indeks kerentanan keseluruhan, serta Pr dan Pw adalah nilai rating dan bobot (Babiker *et al.*, 2005).

Tabel 2 adalah klasifikasi indeks kerentanan GALDIT yang terbagi menjadi 3 kelas rendah, sedang, dan tinggi. Semakin tinggi nilai indeks mengartikan bahwa airtanah semakin rentan terhadap pencemaran airlaut. Hal ini menjadi penanda bahwa perlunya upaya di daerah tersebut untuk mengurangi dampak intrusi airlaut (Purnama, 2019; Purnama & Sulaswono, 2006).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tipe akuifer (*Groundwater occurrence aquifer type/G*)

Tipe akuifer di daerah penelitian merupakan akuifer dangkal (*unconfined aquifer*) (Purnama & Sulaswono, 2006). Akuifer dangkal mudah dieksploitasi tetapi memiliki kerentanan tinggi terhadap pencemaran, aktivitas antropogenik, dan interaksi alamiah antara batuan dan air (Li *et al.*, 2015). Akuifer dangkal dapat diakses dengan mudah untuk kebutuhan rumah tangga pertanian, perikanan, dan ekosistem (Zhi *et al.*, 2021).

Tipe akuifer di daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 2a. Sebagian besar daerah penelitian merupakan akuifer dangkal (Purnama & Sulaswono, 2006) yang didominasi oleh Endapan Aluvium (Geological Agency of Indonesia, 2010). Endapan alluvium Surabaya (Qa Formation) berasal dari proses sedimentasi sungai. Endapan tersebut berupa kerakal, kerikil, pasir, dan lempung. Hanya sebagian kecil di daerah penelitian yang termasuk dalam Formasi Lidah

(QTI Formation). Formasi Lidah berupa endapan klastik, batu lempung dan batulempung berpasir (Geological Agency of Indonesia, 2010; Purnama & Sulaswono, 2006). Pada pembobotan metode GALDIT, akuifer dangkal (*unconfined aquifer*) memiliki bobot 7,5 (Kazakis *et al.*, 2018) di seluruh area penelitian. Akuifer dangkal memiliki kerentanan pencemaran airtanah lebih tinggi terhadap intrusi sebab sangat dipengaruhi oleh dinamika air laut (Purnama, 2019). Hal ini sesuai dengan pembobotan GALDIT pada variabel G yang memberikan nilai tinggi pada akuifer dangkalnya (Ferreira *et al.*, 2005). Jenis endapan pada material geologi akan menentukan besaran konduktivitas hidroliknya. Material aluvium dan pasir akan meningkatkan konduktivitas hidrolik akuifer (Jesiya & Gopinath, 2019).

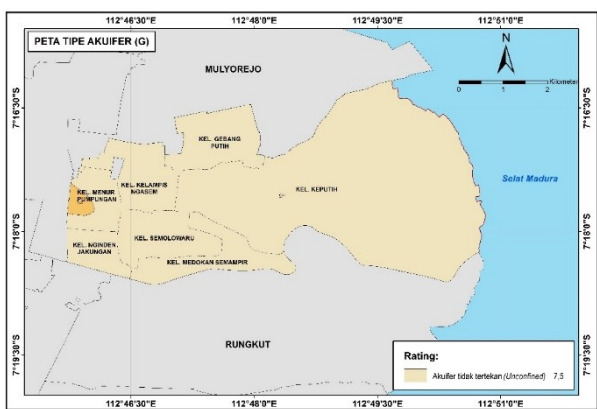
Konduktifitas hidrolik akuifer/ *Aquifer hydraulic conductivity (A)*

Konduktivitas hidrolik merupakan kemampuan material akuifer untuk mentransmisikan air dan dikendalikan oleh jumlah dan interkoneksi ruang kosong di dalam akuifer yang mungkin terjadi sebagai akibat dari porositas antar butiran, rekahan dan/atau bidang perlapisan (Elangovan *et al.*, 2013). Konduktivitas hidrolik merupakan salah satu parameter hidrogeofisika akuifer yang menunjukkan kemampuan airtanah mengalir pada suatu kondisi geologi (Oyeyemi *et al.*, 2018).

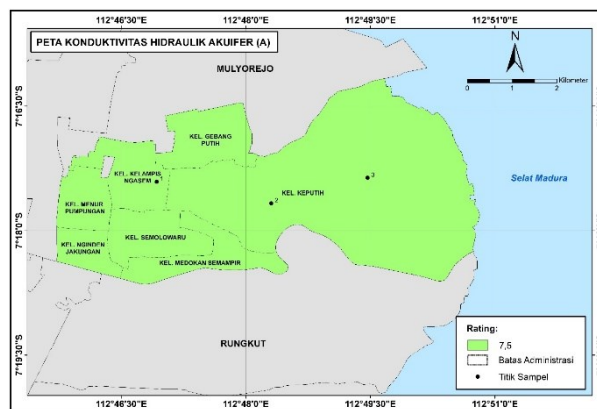
Pengukuran konduktivitas hidrolik di lapangan menggunakan metode Invers Auger Hole. Pada umumnya, penentuan konduktivitas hidrolik menggunakan uji pemompaan pada sumur airtanah. Akan tetapi, penelitian ini tidak menggunakan metode tersebut karena faktor

perijinan uji pemompaan. Metode invers auger hole dapat digunakan untuk mendapatkan nilai konduktivitas hidrolik di lapangan, dengan ketentuan muka airtanah lebih dalam daripada lubang auger hole (Ojha *et al.*, 2017).

Gambar 2b menunjukkan peta konduktivitas hidraulik akuifer atas sebesar 22,5 m/hari yang memiliki nilai sama di semua lokasi. Nilai konduktivitas hidrolik tersebut memiliki skor 7,5 dengan kelas Medium (Kazakis *et al.*, 2018). Pada penelitian ini, konduktivitas hidrolik telah dihitung dari pengujian invers auger hole. Konduktivitas hidrolik di daerah penelitian dipengaruhi oleh material akuifer yang berupa kerakal, kerikil, pasir, dan lempung (Geological Agency of Indonesia, 2010). Material tersebut memudahkan air untuk mengalir melalui pori-pori batuanannya (Elangovan *et al.*, 2013; Todd, 1980). Konduktivitas hidrolik akuifer berkaitan dengan jenis akuifernya, sehingga variabel G dan A pada metode GALDIT memiliki keterkaitan yang tinggi. Variabel A juga menunjukkan keterkaitan atau interaksi antara airtanah dengan air permukaan dan airlaut. Jika nilai A kecil, maka interaksi keduanya juga akan mengecil, sehingga kerentanan pencemaran menjadi kecil (Busico *et al.*, 2021; Kurwadkar, 2017). Kondisi litologi daerah penelitian yang berupa aluvium, dan pasir, serta konduktivitas hidrolik akuifer yang tinggi akan semakin meningkatkan tingkat kerentanan airtanah terhadap intrusi airlaut. Sebaliknya jika didominasi oleh material lempung, maka konduktivitas hidrolik akan kecil. Akibatnya tranport polutan ke dalam airtanah akan melambat, sehingga kerentanan airtanah terhadap akan berkurang (Fannakh & Farsang, 2022).



2a



2b

Gambar 2. 2a. Tipe akuifer (G) dan 2b. Konduktivitas Hidraulik Akuifer (A) (Sumber: Data Primer dan (Harnandi & Rengganis, 2010))

Ketinggian muka airtanah di atas muka air laut/ Height to groundwater level above sea (L)

Ketinggian muka airtanah dapat diketahui dengan mengukur ketinggian muka airtanah pada sumur warga di sepanjang pesisir. Pengukuran dilakukan pada 18 sampel sumur gali milik warga dan diketahui ketinggian ke muka airtanah kurang dari 1 meter dihitung dari permukaan air laut. Bobot pada variabel ini sebesar 4, sebagai salah satu variabel yang memiliki bobot yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa variabel ini sangat berpengaruh dan penting dalam Metode GALDIT. Ketinggian muka airtanah dari muka air laut rata-rata ditentukan oleh parameter-parameter yaitu debit spesifik airtanah, jarak dari garis pantai, massa jenis air tawar dan air asin, serta konduktivitas hidrolis akuifer (Purnama, 2019).

Ketinggian muka airtanah dilakukan didapatkan dengan melakukan pengukuran pada beberapa sumur pengambilan airtanah yang dimiliki oleh penduduk di daerah penelitian. Data yang didapatkan adalah data kedalaman Muka Airtanah dari elevasi sebagai . Ketinggian tmuka airtanah kemudian dihitung dengan mencari selisih antara elevasi dengan kedalaman muka airtanah. Data yang didapatkan, diinterpolasi menggunakan SIG.

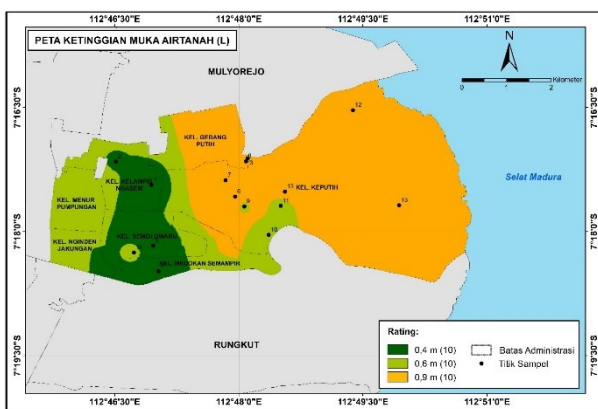
Pada sebagian besar wilayah barat di Kecamatan Sukolilo yang ditandai dengan warna hijau di peta memiliki ketinggian tidak lebih dari 1 m (Gambar 3a). Hasil pengukuran kedalaman muka airtanah terhadap muka air laut maka sumur gali warga termasuk kedalam kategori berisiko tinggi dengan skor 10 (Kazakis *et al.*, 2018; Moghaddam *et al.*, 2017). Nilai skor yang telah

diketahui dapat menunjukkan kondisi bahwa semakin kecil elevasi muka airtanah maka semakin kecil pula tekanan hidraulik airtanah yang dihasilkan. Pola aliran airtanah yang mengalir ke arah air laut akan melambat sehingga rentan terjadi intrusi air laut (peluang air laut masuk kedalam tanah kearah daratan kian besar) (Damayanti & Notodarmodjo, 2021).

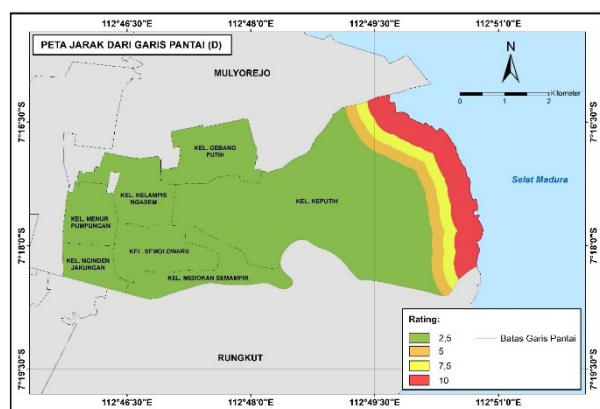
Gambar 4 menunjukkan sumur airtanah dangkal di daerah penelitian. Sumur-sumur yang digunakan penduduk pada umumnya sumur gali. Penduduk tidak menggunakan sumur gali sebagai sumber air minum sebab sebageian besar sumur berwarna keruh. Air sumur yang kondisinya lebih jernih digunakan untuk keperluan domestik kecuali untuk air minum. Jarak yang kecil antara muka airtanah dengan muka air laut menunjukkan bahwa waktu tempuh polutan akan semakin memendek, sehingga kerentanan terhadap pencemaran dan intrusi akan semakin tinggi. (Fannakh & Farsang, 2022). Variabel L ini memiliki keterkaitan dengan variabel D, jarak tegak lurus terhadap garis pantai.

Jarak tegak lurus terhadap garis pantai/ Distance from the shore (D)

Jarak tegak lurus terhadap garis pantai yang digunakan adalah jarak lurus absolut dari lokasi terhadap bibir pantai (*shore*) (Tasnim & Tahsin, 2016). Pengambilan atau pengukuran dilakukan saat kondisi pasang naik tertinggi. Jarak tegak lurus terhadap garis pantai memiliki konsep yang sama dengan variabel L. Variabel L dan D berhubungan dengan waktu tempuh polutan dari sumber polutan, misalnya intrusi airlaut, ke dalam muka airtanah.



3a



3b

Gambar 3a.Peta Ketinggian Muka Airtanah (L) dan 3b. Peta Jarak Tegak Lurus terhadap Garis Pantai (D) (Sumber: Data Primer)



Gambar 4. Sumur pengambilan airtanah di daerah penelitian (Sumber: Data Primer)

Jika waktu tempuh atau jaraknya panjang, maka kerentanan airtanah akan berkurang. Pada Metode GALDIT, kedua variabel ini memiliki bobot yang sama yaitu 4.

Hasil pengukuran dan penentuan jarak terhadap garis pantai hampir semua sumur atau sebanyak 18 titik sampel yang di ambil berada lebih 1 km dari garis pantai. Gambar 4b menunjukkan peta zona jarak dari garis pantai. Zona hijau terletak >1000-meter dari garis pantai, dengan skor 2,5 (kelas sangat rendah). Zona jingga berada pada jarak 750 – 1000-meter dari garis pantai dengan skor 5 (kelas rendah). Zona kuning berada pada jarak 500 – 750-meter dari garis pantai dengan skor 7,5 (kelas medium). Zona merah adalah zona terdekat garis pantai yaitu pada jarak < 500 meter, dengan skor 10 (kelas tinggi). Hal ini menunjukkan bahwa semakin dekat dengan garis pantai, maka kerentanan airtanah terhadap intrusi air laut semakin tinggi.

Variabel jarak terhadap garis pantai merupakan variabel yang paling berpengaruh dalam keseluruhan variabel yang digunakan dalam metode GALDIT (Gemilang *et al.*, 2017). Akuifer yang dekat dengan laut memiliki kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan yang jauh. (Moghaddam *et al.*, 2017). Jika intrusi terjadi, maka daerah yang dekat dengan laut akan mengalami dampak yang lebih serius atau dampak maksimum (Tasnim & Tahsin, 2016). Identifikasi variabel L dan D dapat digunakan sebagai mitigasi awal untuk mengetahui risiko pencemaran airtanah terhadap intrusi air laut.

Dampak Intrusi Air Laut/ *Impact of existing status of seawater intrusion (I)*

Intrusi air laut terhadap air tanah menimbulkan pengaruh terhadap debit air tanah termasuk mempengaruhi kandungan mineral didalamnya. Daya Hantar Listrik atau DHL dalam air tanah dapat digunakan untuk mempresentasikan tingkat kemungkinan adanya salinitas air laut (air asin). Penelitian sebelumnya menggunakan DHL pada metode GALDIT yang menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang positif antara tingkat kerentanan airtanah terhadap intrusi air laut dengan DHL pada airtanah (Gemilang *et al.*, 2017).

Sampel airtanah berasal dari sumur gali yang dimiliki oleh warga di daerah penelitian. Sampel airtanah diuji di laboratorium untuk mendapatkan kadar Cl⁻. Klorida adalah ion dominan pada air laut, tetapi memiliki jumlah yang kecil pada airtanah. Adanya kadar klorida yang tinggi dalam airtanah merupakan penciri terjadinya intrusi air laut terhadap airtanah, sebagaimana tingginya DHL pada airtanah (Gemilang *et al.*, 2017; Tasnim & Tahsin, 2016).

DHL dalam airtanah tertinggi di daerah pesisir sebesar 10300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pada metode GALDIT, nilai ini memiliki skor 10 (Gambar 7) yang menandakan tingginya risiko airtanah terhadap intrusi air laut (Kazakis *et al.*, 2018). Tingginya nilai daya hantar listrik dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui bahwa kondisi airtanah di pesisir Kecamatan Sukolilo yang cenderung payau. Keadaan tersebut berbanding

lurus dengan jarak lokasi pengambilan titik sampel airtanah atau air sumur milik warga terhadap pesisir muka air laut. Semakin ke timur daerah penelitian, atau mendekati garis pantai, airtanah bersifat payau hingga asin, dengan skor yang meningkat hingga 10. Airtanah yang tawar ditemukan di wilayah barat daerah penelitian. Hal ini ditunjukkan dengan skor 2,5 pada Gambar 6a. Pada daerah tersebut, dampak airtanah airtanah terhadap intrusi airlaut bernilai kecil.

Ketebalan akuifer/ *Thickness of the aquifer (T)*

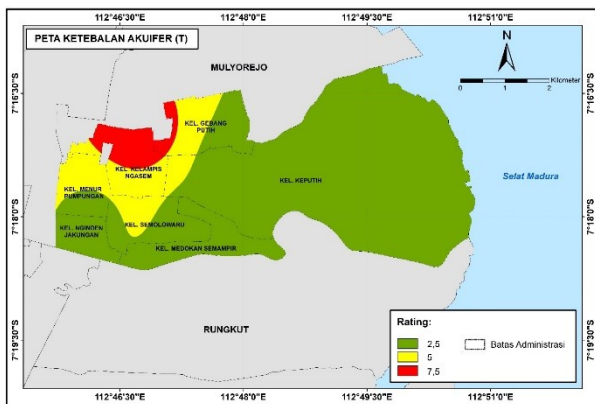
Ketebalan akuifer didapatkan berdasarkan data dari penelitian sebelumnya (Harnandi & Rengganis, 2010). Ketebalan akuifer memiliki bobot 2 pada metode GALDIT (Tabel 1). Bobot ini termasuk kecil jika dibandingkan dengan konduktivitas hidrolis akuifer, jarak tegak lurus dari garis pantai, serta kedalaman muka airtanah terhadap ketinggian muka air laut (Chachadi *et al.*, 2005; Kazakis *et al.*, 2018). Akuifer yang semakin tebal memiliki kerentanan airtanah yang lebih tinggi (Purnama & Sulaswono, 2006). Akuifer yang memiliki tebal tersebar di Kelurahan Keputih (Gambar 6b). Akan tetapi secara keseluruhan, semua daerah penelitian masuk dalam kelompok rating yang sama yaitu 10.

Ketebalan akuifer di bagian barat daerah penelitian adalah sebesar 0,9 - 9,2 m dengan nilai tahanan jenis 0,9 Ωm. Lapisan di bawahnya terdapat lapisan batu pasir dan konglomerat dari Formasi Kabuh dengan nilai tahanan jenis 318 Ωm. Berdasarkan hasil tersebut ketebalan akuifer termasuk tebal dan termasuk kedalam rating 10. Rating 10 merupakan kategori tebal ditandai

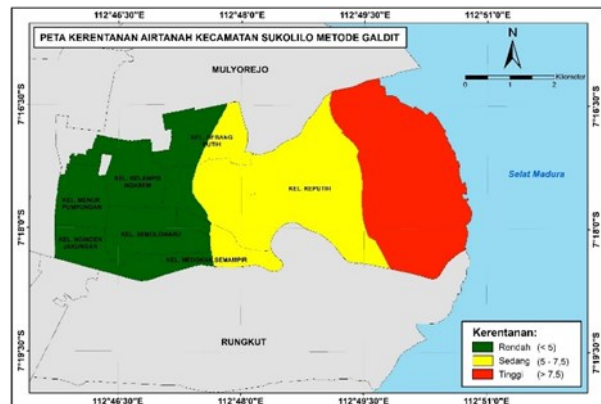
dengan warna merah, sedangkan skor 5 termasuk kategori tipis ditandai dengan sampai hijau dan rating 7,5 merupakan agak tebal ditandai dengan warna kuning (Gambar 7). Kondisi geologi di daerah pesisir pada jarak 3,2 km dari garis pantai merupakan daerah Tempat Pembuangan Sampah Akhir (TPA) Keputih. Lapisan airtanah di daerah tersebut berada pada kedalaman 0,9 m hingga 5 m dari permukaan tanah. Jenis geologi di daerah tersebut merupakan Formasi Kabuh dengan susunan materi lapisan batupasir, konglomerat dengan nilai tahanan jenis 245 Ωm (Purnama & Sulaswono, 2006). Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kedalaman 0,9–5 m merupakan lapisan akuifer bebas bercampur dengan material pasir. Pada kedalaman 3 – 9,5 m memiliki ketebalan lebih dari 5 m merupakan lapisan yang tersusun atas lempung (Gambar 8). Hal ini dapat ditunjukkan di peta dengan penanda warna merah yang berada di sisi barat laut Kecamatan Sukolilo (Purnama & Sulaswono, 2006).

Kerentanan Airtanah Terhadap Intrusi Air Laut

Intrusi air laut terjadi di daerah pesisir yang berbatasan langsung dengan muka air laut (*Shore*) merupakan daerah dengan kondisi airtanah sangat rentan terhadap dampak intrusi air laut. Hal ini terjadi karena daerah tersebut termasuk kedalam *zone of diffusion (interface)* airtanah (Gangadharan & Rekha, 2015). Penilaian multikriteria menjadi hal yang sangat penting untuk menilai kerentanan airtanah terhadap intrusi, sehingga dapat menjadi informasi awal dalam pengelolaan sumber daya airtanah pesisir (Bouderbala, 2020; Gangadharan & Rekha, 2015; Purnama, 2019).

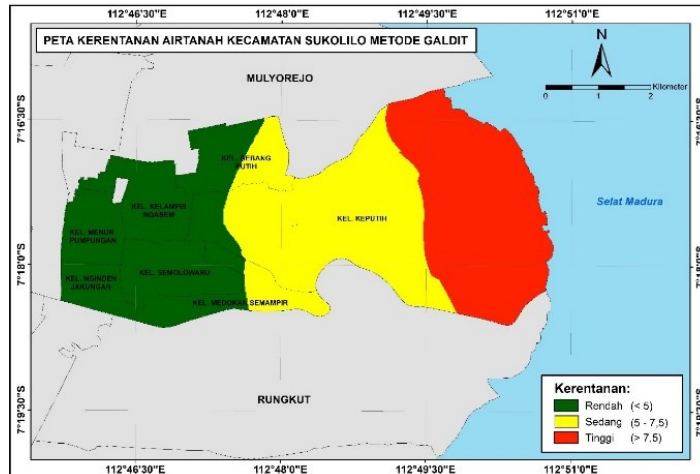


6a



6b

Gambar 6a. Peta Pengaruh Intrusi terhadap Airtanah (I) (Sumber: Data Primer) dan 6b. Peta Ketebalan Akuifer (T) (Harnandi & Rengganis, 2010)



Gambar 7. Peta Kerentanan Airtanah Terhadap Intrusi Air Laut

Penerapan metode GALDIT dalam penelitian ini menghasilkan 3 (tiga) zona kerentanan airtanah terhadap intrusi (Gambar 7), yaitu Zona rendah (<5), sedang (5 – 7,5) dan tinggi (>7,5). Luas daerah dengan tingkat kerentanan rendah mencapai 34,88% dari luas Kecamatan Sukolilo. Kerentanan rendah terdapat di Kelurahan Menur Pumpungan, Kelampis Ngasem, Nginden Jangkungan, Semolowaru dan sebagian Medokan Semampir. Rendahnya kerentanan airtanah di daerah tersebut terjadi akibat jarak lokasi yang jauh dari garis pantai, serta mendapat dampak yang rendah terhadap intrusi air laut.

Zona dengan tingkat kerentanan sedang (Gambar 8) memiliki luas 11,041 km² atau 30,30% dari luas total Kecamatan Sukolilo. Zona sedang berada di sebagian administrasi Kelurahan Keputih, Medokan Semampir dan Gebang Putih. Daerah tersebut berada pada zona sedang diakibatkan oleh jarak yang lebih dekat dengan garis pantai, serta terdampak intrusi pada airtanahnya. Dampak intrusi diperoleh berdasarkan rating I yang bervariasi antara 2,5 – 10.

Zona kerentanan tinggi memiliki luasan 8,690 km² atau 30,30% dari luas Kecamatan Sukolilo. Zona dengan tingkat kerentanan tinggi berada pada pesisir pantai yang berbatasan langsung dengan air laut. Daerah dengan kerentanan tinggi tersebar di wilayah Kelurahan Keputih. Kerentanan akuifer tergolong tinggi karena kondisi akuifer di daerah tersebut termasuk dalam akuifer dangkal/bebas (*Unconfined aquifer*). Jarak yang dekat dengan garis pantai (*Shore*) merupakan salah satu faktor dengan bobot tinggi, sehingga mempengaruhi kerentanan airtanah

terhadap air laut. Akuifer di daerah pesisir memiliki kerentanan airtanah yang tinggi terhadap intrusi air laut (Gangadharan & Rekha, 2015; Purnama, 2019).

Formasi aluvium merupakan endapan aluvium pantai, sungai dan danau. Litologi endapan yang ada di pantai materialnya terdiri dari kerakal, kerikil, lempung, lanau, lumpur, pasir dan campuran. Sebagian besar wilayah Kecamatan Sukolilo tersusun atas endapan Aluvium (Qa) dan sebagian kecil di sisi barat tersusun atas endapan Lidah (Tpl) (Geological Agency of Indonesia, 2010). Endapan alluvium memiliki sifat yang porus yang tinggi sehingga dapat mempengaruhi kondisi akuifer. (Rushton, 2005; Todd, 1980). Keseluruhan tipe akuifer di daerah penelitian memiliki tipe *unconfined aquifer*, dengan konduktivitas hidrolik yang sama yaitu 22,5 m/hari.

Tipe akuifer dapat menentukan kondisi airtanah di suatu daerah pesisir terkait terjadinya intrusi air laut. Kondisi suatu daerah dengan tipe akuifer bebas dan ketinggian muka airtanah (MAT) yang dangkal maka resiko terjadinya intrusi air laut pada airtanah semakin besar. Akuifer bebas (*Unconfined*) atau airtanah dangkal memiliki sifat yang rentan terhadap intrusi air laut. Permukaan tanah pada akuifer bebas disebut dengan (*water table*) freatik level, mempunyai tekanan hidrostatik yang sama dengan tekanan atmosfer (Kodoatie, 1996). Airtanah dangkal akan rentan terhadap aktivitas antropogenetik seperti kegiatan pengambilan air baik melalui kegiatan pemompaan air sumur gali maupun sumur produksi yang masif maka akan terjadi penyusutan penurunan permukaan airtanah. Elevasi muka airtanah

merupakan salah satu faktor utama jika ketinggian muka airtanah di suatu daerah sangat dalam maka potensi terjadinya intrusi air laut semakin kecil dan sebaliknya. Menurut Chachadi dan Lobo (2005), Hatori (2008), tinggi muka airtanah menjadi salah factor jika tinggi muka airtanah dangkal dapat meningkatkan terjadinya resiko kerentanan muka airtanah terhadap air laut.

Berdasarkan hasil pengukuran di lapangan terjadi perbedaan hasil uji invers auger hole. Nilai tertinggi konduktivitas hidraulik akuifer yaitu 22,5 m/hari. Menurut Damayanti (2021) tingginya konduktivitas hidraulik airtanah akan mempengaruhi pergerakan air laut untuk masuk kearah daratan yang akan meningkatkan kerentanan airtanah dangkal (intrusi air laut). Kondisi konduktivitas hidraulik di suatu wilayah memiliki material penyusun yang berbeda-beda sehingga terdapat perbedaan kemampuan suatu batuan untuk mengalirkan airtanah pada kecepatan tertentu. Kondisi konduktivitas hidraulik sangat ditentukan dari material penyusun dan jumlah resapan untuk mengetahui jumlah air yang meresap masuk ke dalam tanah hingga sampai ke akuifer dangkal (muka airtanah). Air yang meresap masuk tentu membawa berbagai mineral yang terlarut dalam air seperti yang terjadi di daerah pesisir (polutan air laut).

Hasil peta kerentanan airtanah di Kecamatan Sukolilo dapat diklasifikasi menjadi 3 tingkat kerentanan airtanah yaitu kerentanan tinggi, sedang dan rendah. Zona kerentanan tinggi diketahui memiliki luasan 8,690 km² atau 30,30% dari luas Kecamatan Sukolilo. Zona dengan tingkat kerentanan tinggi berada pada pesisir pantai yang berbatasan langsung dengan muka air laut. Daerah dengan kerentanan tinggi tersebar di wilayah Kelurahan Keputih. Keadaan airtanah bawah yang merupakan (*zona interface*) yang memiliki kerentanan tinggi. Zona dengan tingkat kerentanan sedang (Gambar 8) memiliki luas 11,041 km² atau 34,88% dari luas total Kecamatan Sukolilo. Kerentanan akuifer yang terjadi di sebagian administrasi Kelurahan Keputih, Medokan Semampir dan Gebang Putih memiliki tingkat kerentanan akuifer yang cukup tinggi atau sedang. Luas daerah dengan tingkat kerentanan rendah sebesar 30,30% dari luas Kecamatan Sukolilo. Kerentanan rendah terjadi di Kelurahan Menur Pumpungan, Kelampis Ngasem, Nginden Jangkungan, Semolowaru dan sebagian Medokan Semampir. Kerentanan akuifer di daerah tersebut (Keputih) tergolong tinggi karena kondisi akuifer

di daerah tersebut termasuk dalam akuifer bebas tidak tertekan (*Unconfined*). Hal tersebut didukung penggunaan lahan atau keadaan morfologi di daerah pesisir yang berupa lahan permukiman, tambak ikan dan hutan bakau. Jarak yang dekat dengan garis pantai (*Shore*) menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi kerentanan airtanah terhadap intrusi airlaut. Menurut Gemilang dan Gunardi (2017) akuifer di daerah pesisir memiliki resiko tinggi terhadap kerentanan airtanah terhadap intrusi airlaut.

KESIMPULAN

Metode GALDIT dapat digunakan untuk menilai kerentanan airtanah terhadap intrusi air laut melalui penilaian multi-kriteria. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerentanan airtanah terhadap air laut di wilayah pesisir Kecamatan Sukolilo diklasifikasikan menjadi 3 kategori. Kerentanan tinggi terhadap intrusi air laut sebagian besar mencakup wilayah pesisir timur yang berbatasan langsung dengan garis pantai (*Shore*) atau sebagian besar Kelurahan Keputih. Luasan daerah dengan tingkat kerentanan tinggi 8,690 km² atau 30,30% dari luas Kecamatan Sukolilo, sehingga seluruh wilayah pesisir Kecamatan Sukolilo merupakan daerah dengan kerentanan airtanah yang tinggi. Wilayah dengan tingkat kerentanan sedang berada di Kelurahan Keputih, Medokan Semampir dan Gebang Putih. Daerah dengan tingkat kerentanan rendah terhadap intrusi air laut berada di bagian barat atau Kelurahan Menur Pumpungan, Kelampis Ngasem, Nginden Jangkungan, Semolowaru dan sebagian Medokan Semampir. Jika dilihat berdasarkan jarak terhadap garis pantai, maka wilayah tersebut jauh dari garis pesisir. Berdasarkan hasil analisis dari berbagai parameter diketahui bahwa jarak terhadap garis pantai, ketinggian permukaan airtanah terhadap air laut dan dampak intrusi air laut pada airtanah merupakan factor yang berpengaruh penting terhadap kerentanan airtanah di Kecamatan Sukolilo.

DAFTAR PUSTAKA

- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiyama, T., & Kato, K. 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of The Total Environment*, 345(1–3): 127–140. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.11.005

- Bertrand, G., Petelet-Giraud, E., Cary, L., Hirata, R., Montenegro, S., Paiva, A., Mahlknecht, J., Coelho, V., & Almeida, C. 2022. Delineating groundwater contamination risks in southern coastal metropolises through implementation of geochemical and socio-environmental data in decision-tree and geographical information system. *Water Research*, 209: p.117877. doi: 10.1016/j.watres.2021.117877
- BLH. 2013. Data dan Informasi Cekungan Air Tanah Kota Surabaya. Pemerintah Kota Surabaya
- Bouderbala, A. 2020. Groundwater quality assessment of the coastal alluvial aquifer of Wadi Hachem, Tipaza, Algeria. *Environmental and Socio-Economic Studies*, 8(4): 11–23. doi: 10.2478/enviro-2020-0020
- Busico, G., Alessandrino, L., & Mastrocicco, M. 2021. Denitrification in Intrinsic and Specific Groundwater Vulnerability Assessment: A Review. *Applied Sciences*, 11(22): p.10657. doi: 10.3390/app112210657
- Chachadi, A.G., Paulo, J., & Ferreira, L. 2005. Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2- GALDIT Indicators Description. The Four Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources .
- Damayanti, A.D., & Notodarmodjo, S. 2021. Metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR untuk Evaluasi Kerentanan Air Tanah Dangkal Akibat Pengaruh Intrusi Air Laut (Studi Kasus: Air Tanah Dangkal Kawasan Pesisir Bagian Utara dan Selatan Kota Makassar). *Journal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 12(2): 107–127.
- Elangovan, R., Murali, K., & Elangovan, R. 2013. Assessment of Groundwater Vulnerability in Coimbatore South Taluk, Tamilnadu, India Using Drastic Approach Article. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(6): p.1.
- Fannakh, A., & Farsang, A. 2022. DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. In *Environmental Sciences Europe* (Vol. 34, Issue 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1186/s12302-022-00646-8
- Ferreira, J.P.L., Chachadi, A., Diamantino, C., & Henriques, M. 2005. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1-Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo.
- Gangadharan, R., & Rekha, P.N. 2015. GIS based GALDIT-AHP Method for Assess the Impact of Shrimp Farms in Coastal Watershed of Tamil Nadu, INDIA. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(2): 475-479.
- Gemilang, W.A., & Bakti, H. 2019. Penilaian Hidrokimia dan Kualitas Air tanah Tidak Tertekan di Kawasan Pesisir Simeulue Timur, Provinsi Aceh. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 10(1): 39–50.
- Gemilang, W.A., Kusumah, G., & Wisha, U.J. 2017. Penilaian Kerentanan Airtanah Menggunakan Metode Galdit (Studi Kasus : Kawasan Pertanian Garam Pademawu, Madura-Indonesia). *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(3): 117-125.
- Gemilang, W.A., & Rahmawan, G.A. 2018. Hidrogeokimia Airtanah Tidak Tertekan Kawasan Pesisir Di Pemukiman Nelayan Kecamatan Teupah Selatan, Kab. Simeulue, Provinsi Aceh. *Riset Geologi Dan Pertambangan*, 28(1): 25-35. doi: 10.14203/risetgeotam2018.v28.636
- Geological Agency of Indonesia. 2010. *Geological Map of Indonesia*.
- Harnandi, D., & Rengganis, H. 2010. Sebaran Air Tanah Payau-Asin Di Dataran Pantai Surabaya-Pasuruan Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 1(2):137-150.
- Indriastoni, R.N., & Kustini, I. 2014. Intrusi Air Laut terhadap Kualitas Air Tanah Dangkal di Kota Surabaya. *Rekayasa Teknik Sipil*, 3(3): 228-232.
- Jang, C.S., Liou, Y.T., & Liang, C.P. 2010. Probabilistically determining roles of groundwater use in aquacultural fishponds. *Journal of Hydrology*, 388(3–4): 491–500. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.05.033
- Jesiya, N.P., & Gopinath, G. 2019. A Customized FuzzyAHP - GIS based DRASTIC-L model for intrinsic groundwater vulnerability assessment of urban and peri urban phreatic aquifer clusters. *Groundwater for Sustainable Development*, 8: 654–666. doi: 10.1016/j.gsd.2019.03.005
- Kasperczyk, L., Modelska, M., & Staśko, S. 2016. Pollution indicators in groundwater of two agricultural catchments in Lower Silesia (Poland). *Geoscience Records*, 3(1): 18–29. doi: 10.1515/georec-2016-0007

- Kazakis, N., Busico, G., Colombani, N., Mastrocicco, M., & Voudouris, K. 2018. Limitations of GALDIT to map seawater intrusion vulnerability in a highly touristic coastal area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 191(1): p.012050. doi: 10.1088/1755-1315/191/1/012050
- Kurwadkar, S. 2017. Groundwater Pollution and Vulnerability Assessment. *Water Environment Research*, 89(10): 1561–1577. doi: 10.2175/106143017x15023776270584
- Li, P., Wu, J., & Qian, H. 2015. Hydrogeochemistry and quality assessment of shallow groundwater in the southern part of the yellow river alluvial plain (Zhongwei section), Northwest China. *Earth Sciences Research Journal*, 18(1): 27–38. doi: 10.15446/esrj.v18n1.34048
- Lubis, R.F., Purwoarminta, A., Bakti, H., & Kusumah, G.W. 2018. Penentuan Indeks Kerentanan Airtanah Pesisir Jawa Di Wilayah Selat Sunda Dengan Menggunakan Metode Galdit. *Riset Geologi Dan Pertambangan*, 28(1): 49–59. doi: 10.14203/risetgeotam2018.v28.554
- Moghaddam, H. K., Jafari, F., & Javadi, S. 2017. Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1): 137–146. doi: 10.1080/02626667.2015.1080827
- Ojha, R.P., Verma, C.L., Denis, D.M., Singh, C. S., & Kumar, M. 2017. Modification of inverse auger hole method for saturated hydraulic conductivity measurement. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(1): 47–52. doi: 10.5958/2455-7145.2017.00011.x
- Oyeyemi, K.D., Aizebeokhai, A.P., Ndambuki, J. M., Sanuade, O.A., Olofinnade, O.M., Adagunodo, T.A., Olajojo, A.A., & Adeyemi, G.A. 2018. Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Ota, Southwestern Nigeria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 173(1): p.012028. doi: 10.1088/1755-1315/173/1/012028
- Purnama, S. 2019. Groundwater Vulnerability from Sea Water Intrusion in Coastal Area Cilacap, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 51(2): 199–206. doi: 10.22146/i jg.44914
- Purnama, S., & Sulaswono, B. 2006. Pemanfaatan Teknik Geolistrik untuk Mendeteksi Persebaran Airtanah Asin pada Akuifer Bebas di Kota Surabaya. *Majalah Geografi Indonesia*, 20(1): 52–66.
- Tasnim, Z., & Tahsin, S. 2016. Application of the Method of Galdit for Groundwater Vulnerability Assessment: A Case of. *South Florida Asian Journal of Applied Science and Engineering*, 5(1): 27–40.
- Todd, D.K. 1980. *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons.
- Todd, D.K., & Mays, L.W. 2005. *Groundwater hydrology*. In *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/0470871660
- Wardhana, R.R., Warnana, D.D., & Widodo, A. 2017. Penyelidikan Intrusi Air Laut pada Air Tanah dengan Metode Resistivitas 2D di Daerah Surabaya Timur. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1): C18–C83.
- Zhi, C., Cao, W., Zhang, Z., Li, Z., & Ren, Y. 2021. Hydrogeochemical characteristics and processes of shallow groundwater in the yellow river delta, china. *Water*, 13(4): p.534. doi: 10.3390/w13040534