

Kajian Spasial Multi Kriteria DRASTIC Kerentanan Air Tanah Pesisir Akuifer Batugamping di Tanjungbumi Madura

Erik Febriarta¹, Muh Aris Marfai², Dyah Rahmawati Hizbaron², dan Ajeng Larasati³

¹Magister Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Daerah Istimewa Yogyakarta; e-mail: e.febriarta@gmail.com

²Program Studi Geografi dan Ilmu Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Bulaksumur, Daerah Istimewa Yogyakarta

³Palawa Karya, www.palawakarya.co.id, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

ABSTRAK

Air tanah pesisir memiliki potensi kerentanan air tanah terhadap pencemaran tinggi, hal tersebut dipengaruhi oleh penyusun batuan bersifat porus. Selain faktor porusnya sifat batuan melolosakan air tanah, batugamping juga memiliki potensi kerentanan tinggi dengan media celah atau rekah dalam menyimpan dan melolosakan air tanah dengan percepatan pergerakan air tanah yang tinggi. Semakin cepat batuan mengalirkan air di dalam tanah, maka berpotensi tinggi dalam menyebarkan sumber pencemar di dalam sistem akuifer. Kecamatan Tanjungbumi berada di pesisir dengan batuan penyusun didominasi oleh pasir dan batugamping (Formasi Madura). Secara litologi akuifer, terdiri atas 70,3 % akuifer batugamping dan 29,7 % akuifer pasir. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan zona kerentanan air tanah terhadap pencemaran pada akuifer pesisir dengan penyusun batuan dominan batugamping. Untuk mencapai tujuan tersebut, maka dilakukan analisis spasial multi kriteria dengan pendekatan DRASTIC. Metode DRASTIC dapat merepresentasikan kerentanan air tanah dengan pendekatan hidrogeologi. Paramater yang digunakan antara lain depth to water / kedalaman muka air tanah (D), recharge / imbuhan air (R), aquifer / jenis akuifer (A), soil media / tekstur tanah (S), topography / kemiringan lereng (T), impact of vadose zone media / jenis zona tak jenuh (I), dan conductivity hydraulic / konduktivitas hidraulis akuifer (C). Parameter yang digunakan mempunyai pengaruh dalam menentukan kerentanan yang dibedakan dengan nilai dan nilai bobot. Pendekatan parameter bobot tinggi memberikan informasi faktor yang paling berpengaruh mempengaruhi kerentanan air tanah. Perhitungan hasil skor total diperoleh dari perhitungan linier seluruh parameter, kemudian klasifikasikan kelas kerentanan air tanah terhadap pencemaran. Hasil penelitian menunjukkan kerentanan air tanah multikriteria menghasilkan lima tingkat kerentanan air tanah terhadap pencemaran. Kerentanan sangat rendah 2,18 km² (3,20 %), kerentanan rendah seluas 10,01 km² (14,69 %), kerentanan sedang seluas 45,74 km² (67,11 %), kerentanan tinggi seluas 7,22 km² (10,59 %), dan kerentanan sangat tinggi dengan luas 3 km² (4,40%) dari luas kecamatan Tanjungbumi.

Kata kunci: Air tanah, Pesisir, Batugamping, Kerentanan, Pencemaran

ABSTRACT

Coastal groundwater has the potential for groundwater vulnerability to high pollution, this is influenced by porous rock constituents. In addition to the porous factor of groundwater, limestone also has a high potential for vulnerability to the medium of gaps or fractures in storing and releasing groundwater with a high acceleration of groundwater movement. The faster the rock drains water in the soil, the higher the potential for spreading pollutants in the aquifer system. Tanjungbumi Subdistrict is located on the coast with the rock formation dominated by sand and limestone (Madura Formation). In terms of aquifer lithology, it consists of 70,3 % limestone aquifer and 29.7% sandwater aquifer. Purpose of this study was to determine the zone of groundwater vulnerability to pollution in coastal aquifers with limestone dominant rock constituents. To achieve this goal, a multi-criteria spatial analysis using the DRASTIC approach was carried out. The DRASTIC method can represent groundwater vulnerability with a hydrogeological approach. The parameters used include depth to water (D), recharge (R), aquifer (A), soil media (S), topography (T), impact of vadose zone media (I), and hydraulic conductivity (C). The parameters used have an influence in determining the vulnerability which is differentiated by the value and weight value. The high weight parameter approach provides information on the factors that most influence the vulnerability of groundwater. The calculation of the total score is obtained from a linear calculation of all parameters, then classify the groundwater vulnerability class to pollution. The results showed that multi-criteria groundwater vulnerability resulted in five levels of groundwater vulnerability to pollution. Very low vulnerability is 2,18 km² (3,20 %), low vulnerability is 10,01 km² (14,69 %), medium vulnerability is 45,74 km² (67,11 %), high vulnerability is 7,22 km² (10,59 %), and very high vulnerability with an area of 3 km² (4,40 %) of the area of Tanjungbumi district.

Keywords: Groundwater, Coast, Limestone, Vulnerability, Pollution

Citation: Febriarta, E., S., Marfai, M. A., Hizbaron, D. R., dan Larasati A. (2020). Kajian Spasial Multi Kriteria DRASTIC Kerentanan Air tanah Pesisir Akuifer Batugamping di Tanjungbumi Madura. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 476-487, doi:10.14710/jil.18.3.476-487

1. Pendahuluan

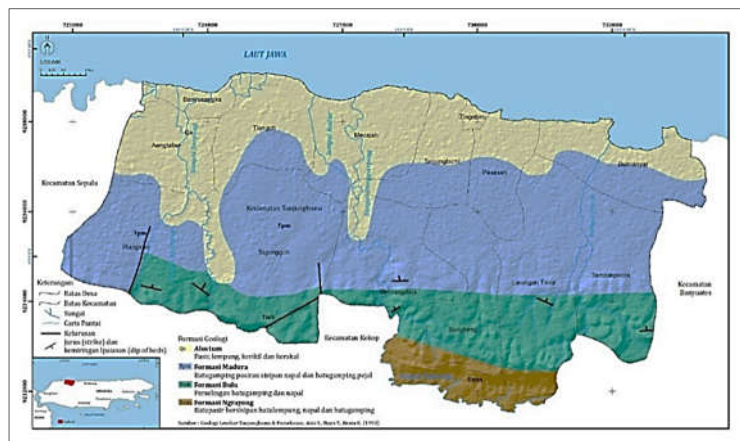
Air tanah merupakan kebutuhan dasar dalam kehidupan manusia dan makhluk hidup disekitarnya. Ketersediaan air tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi alam yaitu secara meteorologis (imbun curah hujan) dan kondisi geologi dimana kemampuan batuan menyimpan dan meloloskan air tanah (Fetter, 2014). Air tanah merupakan kebutuhan dasar makhluk hidup untuk beraktivitas. Semakin besar pengguna air tanah, dapat berdampak pada simpanan atau cadangan akuifer. Keterbatasan produktivitas potensi air tanah dalam mendukung aktivitas manusia, secara geologi dipengaruhi oleh media aliran akuifer atau kondisi pergerakan air tanah (hidrogeologi regional) mempunyai potensi kerentanan terhadap pencemaran, terlebih dengan formasi batuan penyusun batugamping dengan sifat menyimpan air tanah berupa celah (Abdeslam *et al*, 2017; Abuduwaili *et al*, 2019). Dampak dari berkurangnya sumber air dalam pemenuhan kebutuhan dasar mempunyai korelasi dengan kekeringan, dapat mengakibatkan penurunan kualitas air tanah hingga rentan terhadap pencemaran (Abuduwaili *et al*, 2019; Abdullah *et al*, 2020; Bakr, 2020).

Kerentanan menurut Fereire (2005) dan Putranto *et al* (2019) didefinisikan dengan kondisi air tanah bertahan terhadap suatu kontaminasi (pencemaran) dari permukaan tanah hingga akuifer. Pencemaran air tanah dalam suatu akuifer dapat dipengaruhi oleh sistem aliran air tanah (Vrba and Zaporozec, 1994). Pencemaran air tanah dapat menurunkan kualitas air tanah, sehingga menimbulkan masalah kesehatan. Penggunaan air dengan memperhatikan keseimbangan lingkungan merupakan kondisi ideal dalam pemenuhan air bersih. Penggunaan air yang berlebih pada daerah yang memiliki produktivitas air tanah yang rendah dapat menimbulkan kelangkaan air tanah dan dapat memicu pencemaran (Marfai *et al*, 2019).

Keterdapatan air tanah di pesisir Utara pulau Madura berada di daerah Cekungan Air Tanah Ketapang, dengan karakteristik air tanah berada di antar celah batuan dimana produktivitas air tanahnya terbatas (ESDM, 2017b). Penyusunan batuan atau litologi akuifer didominasi oleh batugamping yang merupakan bagian dari Formasi Bulu, Madura dan Ngrayong (Sukardi, 1992). Berdasarkan penyusun litologi akuifer, daerah Kecamatan Tanjungbumi Madura tersusun atas 70,3% batugamping dan 29,7% akuifer pasir (Formasi Alluvium) (Gambar 1). Daerah Tanjungbumi dengan formasi penyusun batugamping juga termasuk bagian di dalam Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK) Maduran yang dicirikan dengan bentang alam yang terbentuk akibat pelarutan air pada batu gamping dan atau dolomit yang menunjukkan bentuk eksokarst dan endokarst (Permen ESDM, 2012).

Karakteristik batugamping dengan sifat produktivitas air tanah terbatas hingga setempat (regional) dengan media aliran air berupa, celah, rekahan, hingga saluran memiliki masalah potensi pencemaran yang tinggi, dikarenakan sifat aliran rongga yang mengalirkan air dengan cepat masuk kedalam sistem akuifer (Singhal and Gupta, 2010; Fetter, 2014; Muhammad *et al*, 2015). Potensi kerentanan pencemaran air tanah tinggi di akuifer ber celah, faktor tersebut dikarenakan akuifer terhubung langsung atau tertransport dengan akuifer disekitarnya tanpa tersimpan dirongga antar butir seperti pada akuifer primer (pasiran) (Fetter, 2014).

Abuduwaili *et al* (2019) menyebutkan bahwa akuifer dengan batuan atau litologi penyusun batugamping dengan media aliran berupa celah mempunyai percepatan pergerakan air tanah yang tinggi. Karakteristik media celah hingga saluran, kedalaman akuifer yang dangkal, mempunyai faktor yang tinggi untuk masuk dan menyebarkan sumber pencemar (polutan) (Abuduwaili *et al*, 2019).



Gambar 1. Geologi Regional di Kecamatan Tanjungbumi

Pengelolaan air tanah dengan wawasan lingkungan akan memberikan keuntungan dalam pengelolaan jangka panjang, salah satunya adalah dengan mengetahui zona potensi kerentanan air

tanah (Abuduwaili *et al*, 2019; Aller *et al*, 1987; Arshad *et al*, 2020; Gaikwad *et al*, 2020; Marfai *et al*, 2019; Putranto *et al*, 2019; Hailin *et al*, 2011). Zona kerentanan air tanah dapat diketahui dengan

pendekatan DRASTIC, dengan parameter yang digunakan didasarkan karakteristik hidrogeologi (Aller *et al*, 1987; Devianto *et al*, 2019; Gaikwad *et al*, 2020; Jena *et al*, 2020; Lathamani *et al*, 2015. Sugianti *et al*, 2016; Putranto *et al*, 2019). Pendekatan indek DRASTIC didasarkan atas penilaian dari parameter statis fisik, antara lain (D) *depth to water* / kedalaman muka air tanah, (R) *recharge* / imbuhan air tanah, (A) *aquifer* / jenis akuifer, (S) *soil media* / tekstur tanah, (T) *topography* / kemiringan lereng, (I) *impact of vadose zone media* / jenis zona tak jenuh, (C) *conductivity hydraulic* / konduktivitas hidraulis akuifer (Aller *et al*, 1987; Abdeslam, 2017; Devianto *et al*, 2019; Gaikwad *et al*, 2020; Hailin *et al*, 2011; Putranto *et al*, 2019; Sugianti *et al*, 2016).

Pengelolaan sumberdaya air dengan memperhatikan keberlangsungan air tanah dimasa yang akan datang, dapat dilakukan dengan pemantauan kuantitas dan kualitas air secara berkala (Ciemens *et al*, 2020; Marfai *et al*, 2019; Smith *et al*, 2020). Salah satu pengelolaan berbasis lingkungan dengan mempertimbangkan masalah kerentanan pencemaran air tanah, merupakan salah satu solusi dari pengelolaan sumberdaya berkelanjutan dengan wawasan lingkungan (Abuduwaili *et al*, 2019; Cahyadi, 2019; Febriarta *et al*, 2018; Orimoloye *et al*, 2020). Smith *et al* (2020) menyebutkan, dengan mengetahui informasi zona kerentanan air tanah dapat memberikan solusi dalam pengelolaan air tanah, terlebih zona rentan terhadap pencemaran air tanah. Penentuan wilayah atau zona terhadap suatu kerentanan secara keruangan (spasial) atau peta tematik memiliki beberapa kelebihan, yaitu lebih

mudah dikenali wilayahnya dan keterkaitan antar lokasi (Arshad *et al*, 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kerentanan pencemaran pada jenis batuan atau litologi akuifer batugamping terhadap potensi sumber pencemar dengan pendekatan kondisi lingkungan fisik, yaitu DRASTIC di kecamatan Tanjungbumi, Kabupaten Bangkalan yang berada di pesisir utara dari Pulau Madura.

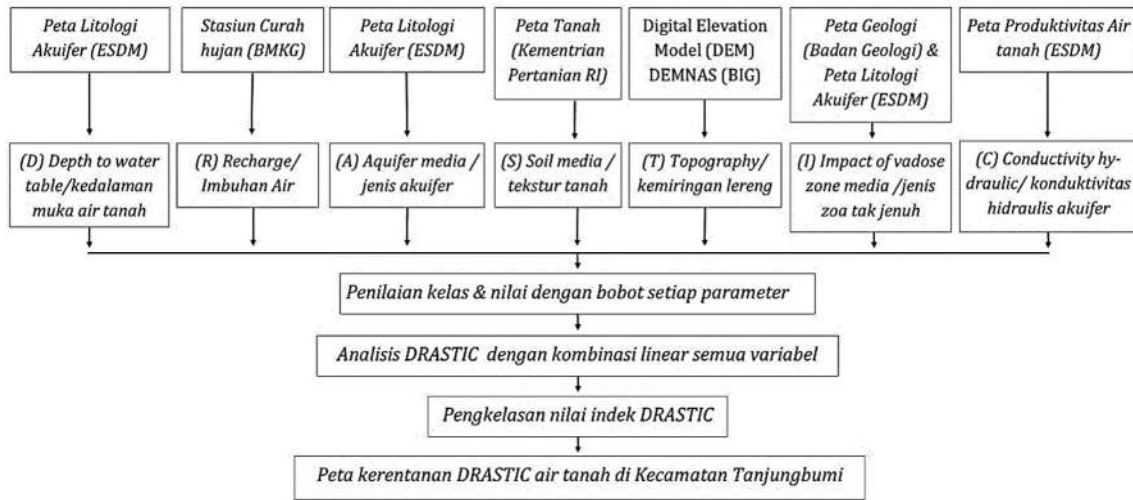
2. Metode

Pendekatan yang digunakan untuk mengetahui indek kerentanan air tanah di akuifer batugamping adalah metode DRASTIC. Analisis DRASTIC didasarkan atas pembobotan nilai setiap parameter lingkungan fisik. Nilai dari setiap karakteristik parameter disajikan pada Table 1. Nilai dari setiap parameter dikalikan dengan nilai bobot (Tabel 2.) untuk memberikan faktor dominan atau berdasarkan besarnya pengaruh terhadap kerentanan atau pencemaran air tanah. Nilai skala atau angka pembobotan memiliki rentang 1-5. Angka pembobotan dengan nilai 5 menunjukkan faktor yang penting atau berpengaruh tinggi terhadap pencemaran, sedangkan nilai semakin kecil 1, menunjukkan faktor yang tidak penting. Berdasarkan faktor yang paling dominan mempengaruhi kerentanan adalah nilai dari kedalaman air tanah. Secara umum nilai kedalaman air tanah semakin dangkal akan mempengaruhi potensi kerentanan air tanah terhadap pencemaran.

Tabel 1. Kelas dan Nilai (R) Parameter DRASTIC

(D) Kedalaman Air tanah (m)		(R) Imbuhan Air (mm)		(A) Jenis akuifer		(S) Tekstur Tanah		(T) Kemiringan Lereng (%)		(I) Jenis Zona Tak Jenuh		(C) Konduktivitas Hidraulis (m/hari)	
Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai
0-3	10	200-300	9	serpih masif	2	kerikil	10	0-2	10	lapisan batas	1	0,04-4,1	1
3-4,5	9	150-200	8	metamorf/beku	3	pasir	9	2-6	9	lempung/lanau	3	4,1-12,3	2
4,5-9	7	120-150	6	lapukan metamorf/beku	4	gambut	8	6-12	5	serpih	3	12,3-28,7	4
9-15	5	100-120	5	glacial till	5	agregat lempung	7	12-18	3	batugamping	3	28,8-41	6
15-22	3	80-100	3	Batu pasir, batu gamping, serpih	6	lempung pasiran	6	>18	1	batupasir	6	41-82	8
22-30	2	60-80	2	batupasir masif	6	lempung	5			pasir kerikil dan lanau	6	>82	10
>30	1			batugamping masif, pasir, kerikil	8	lempung lanau	4			psair dan kerikil	8		
				basal	9	lempung liat	3			basal	9		
				batugamping, karst	10	campuran lempung non agregat	2			batugamping, karst	10		
							1						

Sumber: Aller *et al*, 1987; Devianto *et al*, 2019; Putranto *et al*, 2019



Gambar 2. Langkah Kerja Perhitungan Kerentanan Air Tanah

Untuk mengetahui faktor dari parameter yang mempengaruhi kerentanan, maka nilai dari setiap parameter dikalikan dengan faktor pembobot (nilai bobot). Nilai faktor pembobot dengan nilai semakin tinggi (nilai 5) merupakan faktor yang berpengaruh tinggi terhadap kerentanan, sebaliknya jika nilai menunjukkan bobot kecil (nilai 1) mempunyai pengaruh yang kecil dalam distribusi kerentanan air tanah terhadap pencemaran. Langkah atau alur kerja penentuan indek kerentanan air tanah dengan metode DRASTIC disajikan pada Gambar 2.

Tabel 2. Bobot (W) Parameter DRASTIC

Parameter	Bobot
(D) Depth to water / kedalaman muka air tanah	5
(R) Recharge / Imbunan Air	4
(A) Aquifer / jenis akuifer	3
(S) Soil media / tekstur tanah	2
(T) Topography / kemiringan lereng,	1
(I) Impact of vadose zone media / jenis zona tak jenuh,	5
(C) Conductivity hydraulic / konduktivitas hidraulic akuifer	3

Sumber: Aller et al, 1987; Sugianti et al, 2016; Devianto et al, 2019; Putranto et al, 2019

Perhitungan nilai setiap masing-masing parameter dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Sistem Informasi Geografi (SIG) secara spasial (keruangan), sehingga dapat memberikan informasi kerentanan secara spasial (keruangan) dengan informasi batas administrasi atau desa di Kecamatan Tanjungbumi.

Metode yang digunakan adalah spasial analisis dengan interpolasi untuk penentuan nilai kedalaman air tanah, pembuatan isohiyet curah hujan, dan fungsi overlay seluruh parameter kerentanan (Tabel 2) dengan fungsi perhitungan linier semua variable. Seluruh nilai parameter di hitung jumlah total nilai yang sudah diberikan nilai pemberat atau bobot. Pendekatan rumus yang digunakan untuk perhitungan adalah perhitungan linier setiap parameter kerentanan (Febriarta dan Oktama, 2020; Thapa et al, 2018). Hasil dari perhitungan linier spasial menghasilkan nilai indek kerentanan. Nilai indek DRASTIC dihitung dengan menggunakan

persamaan rumus sebagai berikut (1) (Aller et al, 1987):

$$\text{Kerentanan} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

(R) : nilai untuk masing-masing parameter

(w) : bobot untuk masing-masing parameter

Nilai kelas kerentanan pencemaran air tanah DRASTIC mengacu klasifikasi dari Pacheco et al (2015) dan Thapa et al (2018) (Tabel 3).

Tabel 3. Kelas Kerentanan DRASTIC

Kelas kerentanan	Nilai indek DRASTIK
Sangat Rendah	86-100
Rendah	101-120
Sedang	121-140
Tinggi	141-148
Sangat Tinggi	>140

Sumber: Pacheco et al, 2015 dan Thapa et al, 2018

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kedalaman Muka Air Tanah

Kedalaman muka air tanah / depth to water (D) diperoleh dari data kedalaman distribusi kedalaman air tanah di kabupaten Bangkalan dari Badan Geologi dengan kedalaman rata-rata 9 m dibawah permukaan tanah (ESDM, 2017a), kemudian diperbaharui dari penelitian Marfai dkk (2019) dan pengukuran lapangan. Kedalaman air tanah tersebut termasuk kedalaman dengan kelas nilai sedang. Pengukuran kedalaman air tanah menggunakan pendekatan formasi penyusun batuan, dimana zona pengendapan memiliki karakteristik dalam rongga antar butir dalam menyimpan dan melolosakan air tanah (Singhal and Gupta, 2010; Fetter, 2014; Febriarta dan Larasati, 2020; Yang et al, 2020).

Pengambilan sampel dilapangan menggunakan pendekatan dengan purposive, yaitu setiap formasi geologi mencerminkan karakteristik batuan yang sama dan kondisi tinggi muka air yang sama dengan asumsi daerah pengendapan yang sama kemudian diambil sampel kedalaman air tanah untuk mendapatkan informasi kondisi terakhir.

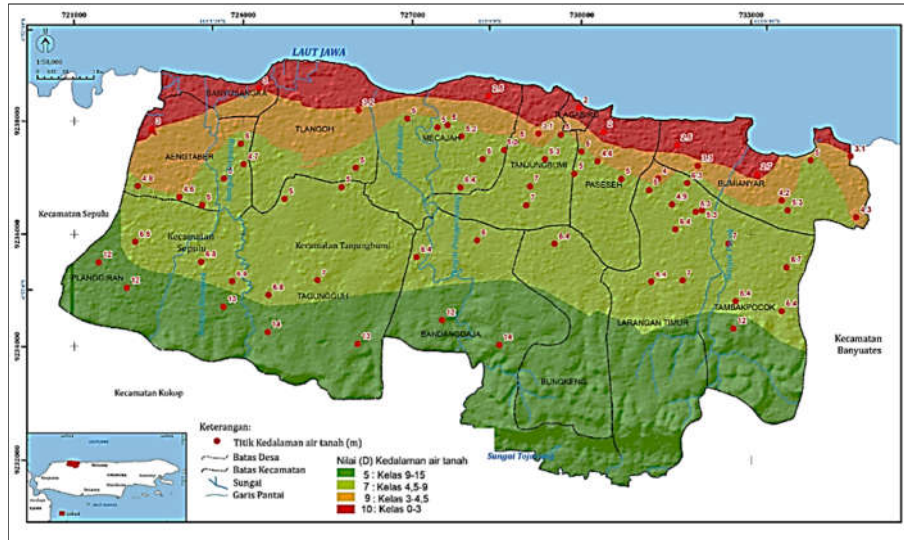
Daerah pesisir mempunyai kedalaman air tanah dengan rata-rata 3 m dibawah permukaan tanah, bagian morfologi datar memiliki kedalaman rata-rata 5 m dibawah permukaan tanah, sedangkan bagian perbukitan batugamping memiliki kedalaman paling dalam dengan rata-rata 13,5 m dibawah permukaan tanah. Secara umum kondisi tinggi muka air tanah dari topografi tertinggi pada morfologi perbukitan melandai menuju Laut Jawa. Nilai kedalaman muka air tanah disajikan pada Tabel 4, sedangkan distribusi

spasial (keruangan) nilai kedalaman air tanah disajikan pada Gambar 3.

Tabel 4. Kedalaman Muka Air Tanah

Kedalaman Air Tanah (m)	Nilai	Bobot	Total
0-3	10	5	50
3-4,5	9	5	45
4,5-9	7	5	35
9-15	5	5	25

Sumber: ESDM, 2017a; Marfai dkk, 2019; dan Pengukuran lapangan, 2019



Gambar 3. Nilai Kedalaman Air Tanah/ *Depth to Water (D)*

3.2. Imbuhan Air Tanah

Data imbuhan air tanah yang masuk kedalam tanah/ *recharge (D)* menggunakan perhitungan nilai curah hujan rata-rata tahunan selama 5 tahun di Kabupaten Bangkalan diperoleh dari penelitian Marfai dkk (2019) yang merupakan analisis data dan perhitungan dari curah hujan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Curah hujan wilayah yang digunakan dengan pendekatan curah hujan wilayah dengan isohiyet yang merepresentasikan curah hujan wilayah di daerah pesisir. Berdasarkan data tersebut diketahui kondisi curah hujan rata-rata bulanan sebesar 60,58 mm/bulan (Marfai dkk, 2019).

Untuk mendapatkan nilai imbuhan air tanah yang masuk kedalam tanah (*recharge*) menggunakan metode perhitungan dari Standar Nasional Indonesia (SNI) no.19-6728. tahun 2002 tentang penyusunan neraca sumber daya bagian 1, yaitu sumber daya air spasial, pada sub bab 5. Pendekatan yang digunakan untuk perhitungan cadangan air bawah tanah, menggunakan nilai curah hujan rata-rata dihitung dengan pembuatan garis isohiyet hujan, kemudian dikalikan dengan persentai imbuhan hujan tahunan berdasarkan keadaan formasi geologi berbanding luas area (BSN, 2002). Nilai imbuhan merupakan kondisi air tanah setelah dikurangi nilai runoff (aliran permukaan) dan nilai evapotranspirasi. Nilai imbuhan air tanah yang meresap kedalam tanah

digunakan untuk untuk parameter kerentanan dinyatakan dalam satuan mm/tahun.

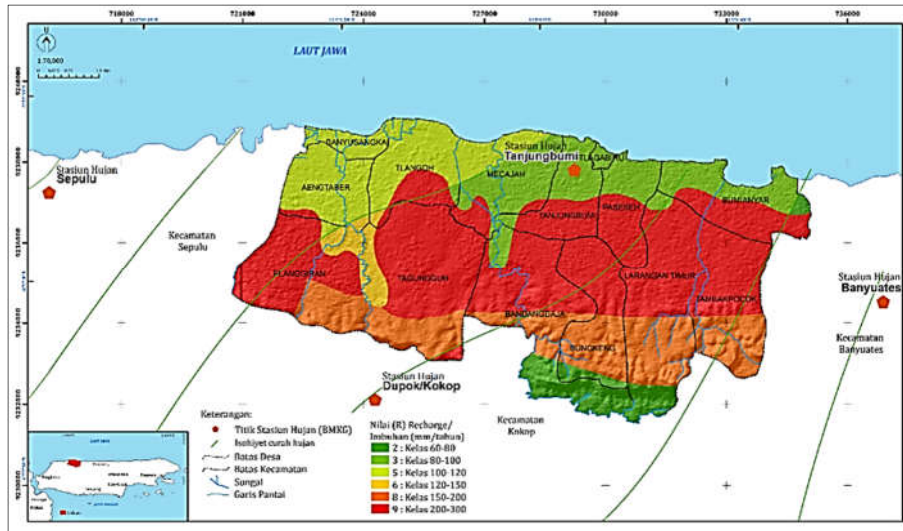
Berdasarkan distribusi curah hujan wilayah rata-rata sebesar 1.031,5 mm/tahun (curah hujan rendah). Berdasarkan perhitungan, diketahui nilai *runoff* (aliran permukaan) sebesar 46,86 mm/tahun, sedangkan evapotranspirasi rata-rata sebesar 140,90 mm/tahun, berdasarkan perhitungan, diketahui bahwa kondisi imbuhan air tanah berkisar 60-204 mm/tahun. Nilai imbuhan air tanah disajikan pada Tabel 5, sedangkan untuk distribusi spasial (keruangan) disajikan pada Gambar 4.

Sebagian besar wilayah penelitian berdasarkan nilai imbuhan air tanah, masuk dalam kelas 9. Nilai tingkat kerentanan dari parameter imbuhan tersebut berada di bagian tengah dari daerah penelitian. Imbuhan air tanah dengan termasuk tinggi dan mempunyai faktor yang dominan dalam pencemaran, sebagai sumber pengencer dari sumber pencemar (polutan).

Tabel 5. Imbuhan Air Tanah

Imbuhan Air Tanah (mm/tahun)	Nilai	Bobot	Total
60 -80	2	4	8
80-100	3	4	12
100-120	5	4	20
120-150	6	4	24
150-200	8	4	32
200-300	9	4	36

Sumber: Marfai dkk, 2019; Analisis, 2020



Gambar 4. Nilai Imbuhan Air Tanah/ Recharge(R)

3.3. Jenis Akuifer

Jenis akuifer /aquifer (A) merupakan parameter kerentanan didasarkan atas litologi (penyusun batuan) penyusun akuifer. Definisi akuifer menurut BSN (2005) adalah daerah dari lapisan batuan yang berada dibawah tanah yang mempunyai potensi menyimpan dan meloloskan air tanah yang dibatasi oleh lapisan kedap air. Data parameter jenis akuifer diperoleh dari analisis spasial (keruangan) tumpang susun (overlay) peta geologi dari Badan Geologi, dengan peta penyusun litologi akuifer dari Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM, 2017a, ESDM, 2017c, Marfai dkk, 2019). Berdasarkan geologi regional (Gambar 1), wilayah Kecamatan Tanjungbumi tersusun oleh batupasir dan batugamping. Nilai penyusun jenis akuifer masuk dalam kelas sedang dengan nilai 6 poin.

Tabel 6. Jenis Akuifer

Jenis Litologi Akuifer	Formasi	Nilai	Bobot	Total
Batugamping	Madura (Tpm)	6	3	18
Pasir	Aluvium (Qa)	6	3	18
Batupasir, lanau, batugamping	Bulu (Tmb)	6	3	18
Batupasir, batugamping dan napal	Ngrayong (Tmnt)	6	3	18
Batugamping	Madura (Tpm)	10	3	30

Sumber Azis dkk, 1991; ESDM, 2017a; ESDM, 2017c; analisis, 2020

Nilai distribusi batuan / litologi jenis akuifer disajikan pada Tabel 6, sedangkan distribusi spasial (keruangan) disajikan pada Gambar 5. Nilai dengan tingkat sedang hingga tinggi pada parameter jenis akuifer secara spasial (keruangan) memiliki pengaruh yang dominan dalam penyebaran sumber pencemar atau polutan. Potensi pencemaran dipengaruhi oleh produktifitas akuifer relatif tinggi karena penyusun dengan ukuran butir pasir dan celah, memiliki kemampuan meloloskan dan mengalirkan air atau bahkan sumber pencemar (polutan) dengan cepat, dan sebaliknya, jika semakin

rapat dan semakin kecil ukuran rongga antar butir memiliki produktivitas air tanah yang kecil (Febriarta dkk, 2019; Fetter, 2014). Seperti pada penyusun di daerah penelitian berupa sisipan pasir sisipan batugamping dan lanau memiliki nilai parameter yang rendah, hal tersebut dikarenakan nilai kelolosan air tanah yang kecil.

3.4. Tekstur Tanah

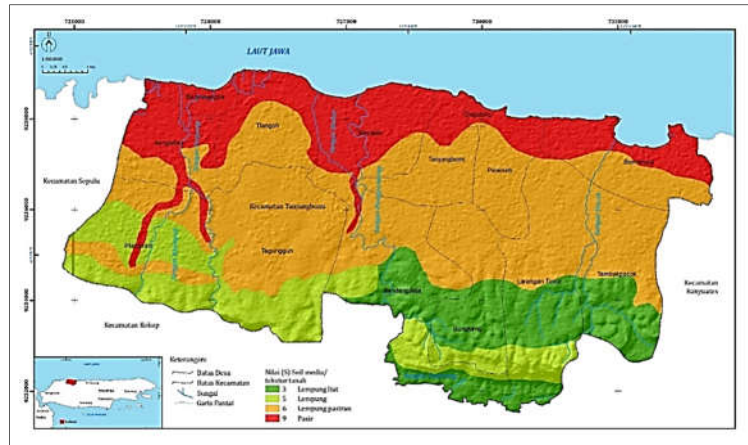
Tekstur tanah / soil media (S) mempunyai pengaruh dalam kecepatan penyebaran pencemaran di permukaan. Hal tersebut dipengaruhi oleh kerapatan material penyusun, sehingga tektur jenis tanah mempunyai kerentanan yang tinggi terhadap daya resap curah hujan. Data tektur tanah diperoleh dari peta tanah skala 1:50.00 Kabupaten Bangkalan dari Kementerian Pertanian (Sisultan, 2020). Klasifikasi nama tanah disajikan pada Tabel 7.

Berdasarkan distribusi peta tanah di daerah penelitian tersusun atas pasir dan lempung (Gambar 6). Hal tersebut dipengaruhi oleh batu induk regional berupa batugamping yang terombak dengan sifat lempungan (napal). Nilai tektur tanah berupa lempung (napal) memiliki potensi rendah terhadap pencemaran, sedangkan tektur tanah yang lepas-lepas seperti pasir dengan ukuran butir sedang hingga kasar memiliki potensi terhadap pencemaran tinggi, karena mempunyai kemampuan mudah dilalui kontaminan atau sumber pencemar masuk kedalam air tanah.

Tabel 7. Tekstur Tanah

Klasifikasi Tanah (USDA)	Tekstur Tanah	Nilai	Bobot	Total
Typic Haplustepts	Lempung liat	3	2	6
Lithic Ustorthents	Lempung	5	2	10
Typic Haplustalfs	Lempung pasiran	6	2	12
Oxyaquic Haplustepts	Lempung pasiran	6	2	12
Sodic Endoaquents	Pasir	9	2	18
Vertic Endoaquents	Pasir	9	2	18

Sumber : Marfai dkk, 2019; Sisultan, 2020



Gambar 6. Nilai Tekstur Tanah / Soil Media (S)

3.5. Kemiringan Lereng

Parameter kemiringan lereng / topography (T) diperoleh dari analisis perhitungan spasial (keruangan) yang diolah dari data *Digital Elevation Model Nasional* (DEMnas) dengan resolusi 11,5 m dari Badan Informasi Geospasial (BIG, 2020). Morfologi daerah penelitian terdiri dari satuan morfologi dataran rendah dan morfologi bergelombang (Marfai dkk, 2019). Pengolahan nilai data ketinggian tempat (DEMnas) dikonversi menjadi nilai kemiringan lereng dengan bantuan sistem informasi geografis (SIG). Hasil dari pengkelasan nilai kemiringan lereng, terdapat dua (2) nilai, yaitu kemiringan lereng 0-2% dengan nilai 10 dan kelas kemiringan lereng >18% dengan nilai 1. Besar bobot untuk parameter kemiringan lereng sebesar 1, nilai tersebut merupakan faktor terkecil dari pendekatan metode DRASTIC.

Berdasarkan pendekatan morfologi dan perhitungan kelas kemiringan lereng, daerah penelitian didominasi dengan kemiringan lereng datar dengan nilai 0-2 % yang terdapat di daerah pesisir (Gambar 7), sedangkan kemiringan lereng yang terjal terdapat dibagian selatan. Nilai kelas kemiringan lereng disajikan pada Tabel 8. Secara umum kemiringan lereng 0-2% sebesar 90% dari luas Kecamatan Tanjungbuni.

Parameter kemiringan lereng memiliki bobot nilai yang paling kecil, yaitu 1 poin (Tabel 2). Parameter kemiringan lereng mengindikasikan potensi percepatan pergerakan kontaminan dari kelas lereng yang semakin terjal mengakibatkan perbesaran nilai aliran permukaan. Berdasarkan hal tersebut potensi pergerakan kontaminan tinggi terjadi di bagian selatan dengan kemiringan lereng >18%. Sedangkan pada bagian datar mempunyai potensi air tanah maupun sumber pencemar (polutan) cepat masuk menuju zona jenuh air.

Tabel 8. Kemiringan Lereng (%)

Kelas Kemiringan lereng (%)	Nilai	Bobot	Total
0-2	10	1	10
>18	1	1	1

Sumber : Analisis, 2020

3.6. Jenis Zona Tak Jenuh

Jenis zona tak jenuh / *impact of vadose zone media* (I) dalam parameter kerentanan air tanah merupakan parameter dengan pendekatan ukuran butir tanah yang diasumsikan sebagai lapisan permukaan tanah atas (Febriarta dan Purnama, 2020; Prusty and Farooq, 2020; Sugianti et al, 2016). Data jenis zona tak jenuh diperoleh dari data tektur tanah dari peta tanah dari Kementerian Pertanian (Sisultan, 2020) dan data litologi batuan sebagai pembentuk tanah yang diperoleh dari peta geologi (Azis dkk, 1991; ESDM, 2017b). Pengaruh jenis zona tak jenuh terhadap kerentanan tanah adalah jika ukuran butir semakin besar dan tipe tanah yang lepas-lepas meningkatkan laju pergerakan sumber pencemar masuk kedalam akuifer.

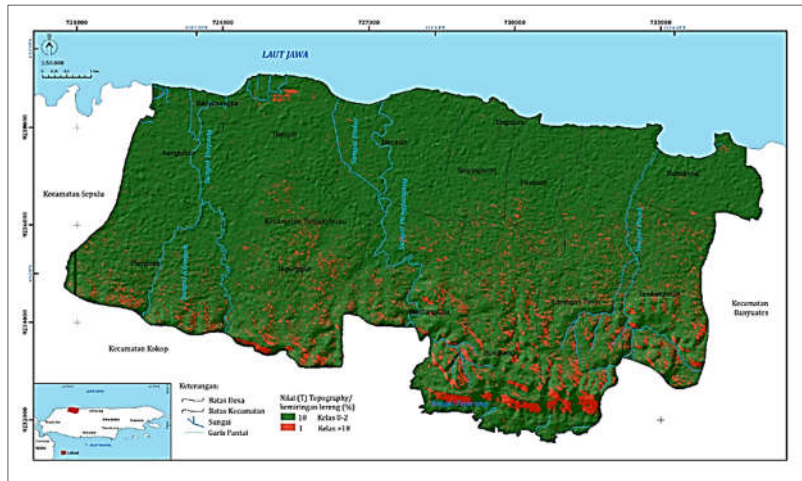
Kondisi jenis tak jenuh berdasarkan pendekatan data litologi masuk kedalam dua (2) material penyusun yaitu pasir pada bagian utara atau daerah pesisir sebagian pada bagian selatan yaitu bagian formasi Bulu dan Ngrayong, yang didominasi oleh batugamping pasir, dengan nilai 6, sedangkan pada bagian tengah merupakan bagian dari formasi Madura (morfologi perbukitan batugamping) yang tersusun oleh batuan batugamping dengan lebih kecil yaitu bernilai 3 poin.

Distribusi zona jenuh dengan ukuran pasir di pesisir (bagian utara) dan rongga antar butir celah batugamping pada bagian perbukitan (bagian selatan) menunjukkan nilai yang tinggi (Gambar 8). Nilai jenis zona tak jenuh terhadap kerentanan air tanah disajikan pada Tabel 9.

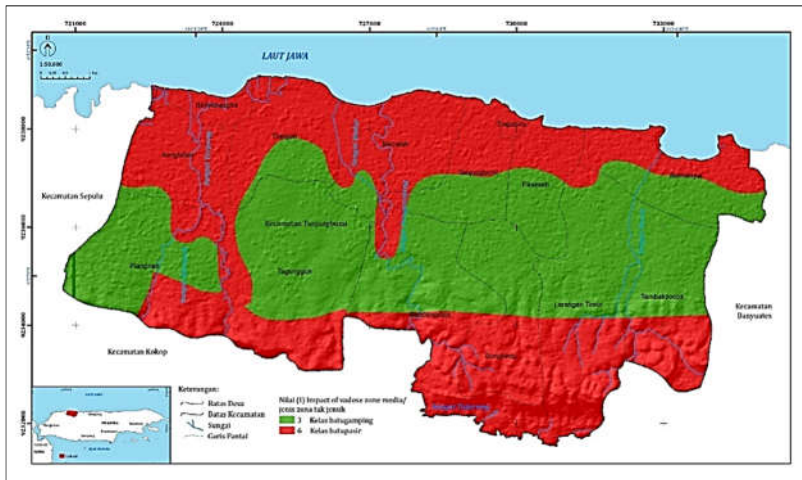
Tabel 9. Jenis Zona Tak Jenuh

Jenis Zona Tak Jenuh	Formasi	Nilai	Bobot	Total
Batugamping	Madura (Tpm)	3	5	15
Pasir	Aluvium (Qa)	6	5	30
Batupasir, lanau, batugamping	Bulu (Tmb)	6	5	30
Batupasir, batulempung, napal, batugamping	Ngrayong (Tmtn)	6	5	30

Sumber: Azis dkk, 1991; ESDM, 2017b; analisis, 2020



Gambar 7. Nilai Kemiringan Lereng (%) / Topography (T)



Gambar 8. Nilai Zona Tak Jenuh / Impact of Vadose Zone Media (I)

3.7. Konduktivitas Hidraulis Akuifer

Nilai konduktivitas hidraulis akuifer/ *Conductivity hydraulic* (C), merupakan parameter percepatan pergerakan air didalam batuan/tanah yang disajikan dalam satuan m/hari. Konduktivitas hidroulis akuifer mempunyai nilai korelasi dengan jenis batuan/ litologi akuifer, dimana dipengaruhi oleh media aliran antar butir. Parameter konduktivitas hidraulis dapat menentukan keberlangsungan keberadaan air tanah di dalam sistem akuifer (Fetter, 2014; Febriarta dan Larasati, 2020). Sumber data yang digunakan untuk memperoleh data konduktivitas hidraulis akuifer, diperoleh dari data sekunder yaitu peta produktivitas akuifer dari Kementrian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM, 2017a; ESDM, 2017b) kemudian diperbaharui dari penelitaian Marfai dkk (2019).

Secara umum daerah penelitian termasuk bagian dari Cekungan Air Tanah (CAT) Ketapang dengan produktivitas setempat hingga produktivitas sedang. Tingkat produktivitas sedang tersebut dipengaruhi oleh penyusun batuanya, yang didominasi oleh batugamping dengan sifat media menyimpan air

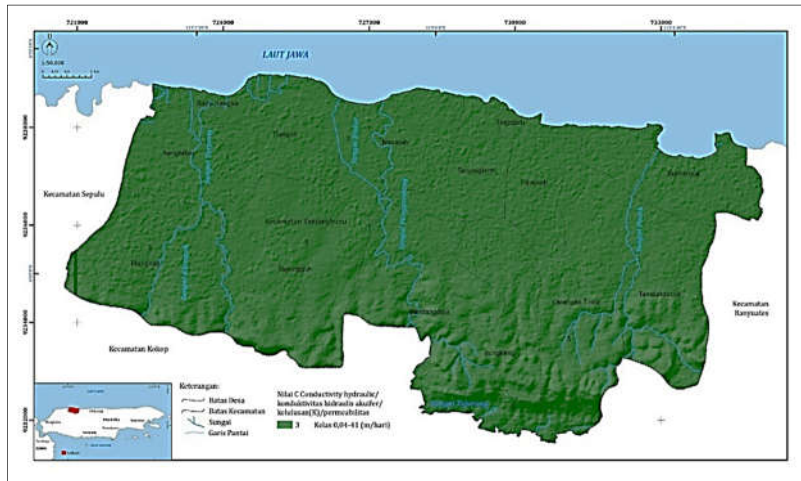
tanah dengan kapasitas rendah, dan lebih cenderung mengalirkan yang dipengaruhi oleh tingkat pelarutan yang tinggi.

Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa tingkat produktivitas akuifer sedang hingga terbatas, dengan nilai kelulusan air tertinggi 3,30 m/hari (Tabel 10) atau bernilai 1, yang berarti sangat rendah dalam parameter kerentanan air tanah. Nilai dari tingkat produktivitas akuifer sedang terdistribusi merata di daerah kajian. Distribusi nilai konduktivitas hidraulis akuifer disajikan pada Gambar 9.

Tabel 10. Konduktivitas Hidraulis Akuifer

Jenis Litologi Akuifer	Formasi	Kelas	Nilai	Bobot	Total
Batugamping	Madura (Tpm)	3,30	1	3	3
Pasir	Aluvium (Qa)	0,50	1	3	3
Batugamping	Madura (Tpm)	0,83	1	3	3
batupasir, lanau, batugamping	Bulu (Tmb)	0,50	1	3	3

Sumber: Azis dkk, 1991; ESDM, 2017a; ESDM, 2017b ; Marfai dkk, 2019



Gambar 9. Nilai Konduktivitas Hidraulis Akuifer / Conductivity Hydraulic (C)

3.8. Zona Kerentanan Air Tanah Terhadap Pencemaran

Zona kerentanan air tanah terhadap pencemaran di Kecamatan Tanjungbumi, diperoleh dari perhitungan linier semua parameter kerentanan DRASTIC. Berdasarkan perhitungan indeks kerentanan diperoleh rentang nilai indeks dengan rentang nilai 96-148. Pembagian kelas menurut Pacheco *et al* (2015) dan Thapa *et al* (2018) diperoleh lima (5) kelas kerentanan. Kelas kerentanan air tanah disajikan pada Tabel 11. Berdasarkan hasil analisis kerentanan air tanah, diketahui kerentanan sangat rendah seluas 2,18 km² atau 3,20 % dari luas Kecamatan Tanjungbumi, kerentanan rendah seluas 10,01 km² atau 14,69 %, kerentanan dengan nilai

sedang seluas 45,74 km² atau 67,11 %, kerentanan dengan nilai tinggi seluas 7,22 km² atau 10,59 %, dan kerentanan dengan nilai sangat tinggi dengan luas 3 km² atau 4,40% dari luas kecamatan Tanjungbumi.

Secara umum kerentanan air tanah terhadap potensi kerentanan di Kecamatan Tanjungbumi termasuk bernilai sedang. Secara keruangan (spasial) nilai sedang dan rendah terdapat di bagian tengah Kecamatan Tanjungbumi. Nilai kerentanan sangat rendah terdapat di bagian perbukitan pada bagian selatan dari Kecamatan Tanjungbumi, sedangkan nilai kerentanan tinggi dan sangat tinggi terdapat pada bagian utara yang merupakan dataran pesisir dan pantai yang dipengaruhi oleh ketebalan dan kedalaman air tanah yang dangkal.

Tabel. 11. Luas Desa Terhadap Kerentanan Air Tanah

No.	Nama Desa	Luas (Km ²) Kerentanan Air Tanah (DRASTIC)									
		Sangat Rendah		Rendah		Sedang		Tinggi		Sangat Tinggi	
			%		%		%		%		%
1	Aengtaber	-	-	-	-	1,65	2,43	1,45	2,13	0,52	0,75
2	Bandangdaja	1,40	2,06	3,45	5,06	3,13	4,59	0,03	0,04	-	-
3	Banyusangka	-	-	-	-	-	-	0,35	0,51	0,69	1,01
4	Bumianyar	-	-	0,01	0,01	3,11	4,57	1,46	2,14	0,08	0,11
5	Bungkeng	0,06	0,09	1,14	1,67	3,62	5,31	-	-	-	-
6	Larangan Timur	0,72	1,05	1,13	1,66	6,13	9,00	0,01	0,02	-	-
7	Mecajah	-	-	0,61	0,90	3,07	4,50	0,86	1,26	0,51	0,74
8	Paseseh	-	-	0,17	0,25	2,25	3,30	0,65	0,95	-	-
9	Plangiran	-	-	0,18	0,26	5,82	8,53	1,10	1,61	0,04	0,06
10	Tagungguh	-	-	1,78	2,61	7,38	10,83	0,02	0,03	-	-
11	Tambakpocok	-	-	0,77	1,13	4,89	7,17	-	-	-	-
12	Tanjungbumi	-	-	0,77	1,13	2,07	3,04	0,48	0,71	-	-
13	Tlagabiru	-	-	-	-	0,07	0,10	0,18	0,27	-	-
14	Tlangoh	-	-	-	-	2,55	3,75	0,62	0,91	1,16	1,70

Sumber : Analisis, 2020

Zona kerentanan dengan nilai sangat rendah terdapat pada bagian selatan yang merupakan perbukitan batugamping dengan faktor yang mempengaruhi adalah kedalaman air tanah yang > 14 m. Kedalaman tersebut menimbulkan dampak yang relatif kecil, kemudian dipengaruhi oleh kondisi batuan berupa bagian dari formasi Ngrayong yang tersusun atas dominasi batugamping pasiran dengan sisipan lempung. Kondisi tekstur tanah lempungan tersebut mempunyai potensi lambat untuk meloloskan air tanah. Karakteristik lempungan

mempunyai sifat akuiklud dalam meloloskan air tanah, dan pergerakan air tanah yang sangat lambat. Selain faktor tersebut, kondisi imbuhan air tanah sangat kecil berkisar 80-100 mm/tahun yang jatuh di daerah perbukitan dengan batuan permukaan napal lempungan tidak banyak yang masuk kedalam akuifer air tanah, dan lebih banyak menjadi aliran permukaan masuk ke daerah aliran sungai Pangpanjang dan Tojurang.

Zona kerentanan rendah terdapat pada bagian tengah kecamatan Tanjungbumi, yaitu sebagian Desa

Tanggung, Bandangdajah, Tanjungbumi, Paseseh, Bungkeng, Larangan Timur dan Tambakpocok. Pada zona kerentanan rendah dapat terjadi potensi pencemaran bila dalam jangka waktu yang panjang, meresap masuk kedalam air tanah secara perlahan. Hal tersebut dipengaruhi oleh karakteristik fisik secara umum di Kecamatan Tanjungbumi memiliki kedalaman air tanah berkisar 5-10 m. Kedalaman tersebut memerlukan waktu yang relatif lama untuk air masuk kedalam sistem akuifer air tanah dengan potensi kelulusan air rata-rata 3 m/hari. Selain faktor tersebut, dipengaruhi juga tekstur tanah gampingan dengan sisipan lempung, yang mempunyai sifat lambat dalam meloloskan air tanah. Jumlah intensitas imbuhan berkisar 80-120 mm/tahun, yang dapat memperbesar faktor pencemaran bila masuk pada akuifer dangkal. Zona kerentanan sedang memiliki luas 16,69 % dari luas Kecamatan Tanjungbumi (Gambar 10). Pada zona kerentanan rendah bila terjadi pencemaran dari suatu sumber pencemar akan relatif berjalan lambat hingga masuk kedalam akuifer air tanah.

Hasil dari analisis DRASTIC, diketahui bahwa seluas 45,74 km² (67,11%) memiliki kerentanan air tanah sedang (Gambar 10). Pada zona kerentanan tingkat sedang dapat tercemar sebagian dari sumber pencemar (polutan). Kerentanan sedang terdapat di sebagian besar tengah Kecamatan Tanjungbumi. Morfologi pada bagian tengah merupakan dataran dengan kondisi kedalaman air tanah beragam, dengan kondisi kedalaman rata-rata 2-4 m. Kedalaman tersebut menjadikan kecepatan sumber pencemar (polutan) lebih cepat masuk kedalam akuifer air tanah pada kedalaman yang lebih dangkal. Jumlah imbuhan berkisar 100-120 mm/tahun, yang masuk kedalam tanah pada batuan gamping pasir yang mempunyai kelulusan 3 m/hari dapat mempercepat pencemaran.

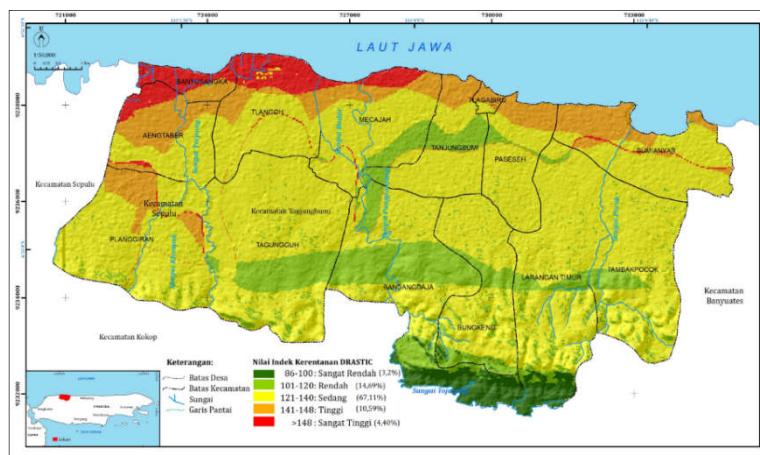
Sifat litologi akuifer tersebut dicirikan dengan karakteristik media aliran rongga antar butir tidak terlalu rapat, yang mempunyai sifat cepat membawa sumber pencemar (polutan) masuk kedalam akuifer air tanah. Pada wilayah tengah dari Kecamatan Tanjungbumi merupakan dataran dengan kemiringan lereng 0-2% memiliki faktor yang tinggi atau

parameter yang mempengaruhi secara dominan laju pencemaran. Kondisi topografi tersebut mengakibatkan sumber pencemaran (polutan) lebih mudah masuk kedalam tanah menuju zona jenuh air. Penggunaan lahan sawah dan pertanian banyak ditemukan pada morfologi dataran ini, sehingga perlu pembatasan dan pengawasan penggunaan pupuk (tepat guna) dalam kegiatan pertanian maupun perkebunan. Salah satu dampak dari penggunaan pupuk yang berlebihan adalah sumber air dapat tercemar nitrit dan nitrat masuk kedalam sistem akuifer air tanah yang dapat mengakibatkan masalah pencernaan.

Zona kerentanan tinggi, potensi pencemaran dapat hampir masuk seluruhnya. Hal tersebut dipengaruhi oleh kondisi karakteristik pasir yang merupakan bagian dari formasi aluvium yang tersusun dari pasir dengan media aliran ukuran antar butir lepas lepas sehingga sangat mudah mengalirkan air masuk ke zona tak jenuh, pada kedalaman rata-rata air tanah 3-4,5 m.

Imbuhan air tanah pada zona tinggi berkisar 80-120 mm/tahun. Imbuhan air tersebut mempengaruhi kecepatan konduktivitas hidrolis masuk kedalam akuifer bebas dengan nilai 3,30 m/hari. Tekstur tanah berupa pasir juga menjadi salah satu faktor cepatnya bila terjadi kontaminasi. Kondisi morfologi berupa dataran pantai mengakibatkan potensi sumber pencemar (polutan) lebih cepat masuk yang dipengaruhi juga oleh kondisi zona jenuh air yang lebih cepat. Zona kerentanan tinggi terdapat sejajar dengan garis pantai yang berada pada pesisir Desa Aengtaber, Tlanguh, Planggiran, Mecajah, Tlagabiru dan Bumianyar. Secara distribusi keruangan (spasial) disajikan pada Gambar 10.

Zona kerentanan sangat tinggi berada di sebagian dataran pantai Desa Aengtaber, Banyusangka, Tlangoh, Plnaggran, Mecajah dan Bumianyar yang berbatasan langsung dengan Laut Jawa. Potensi kerentanan air tanah juga dapat mengakibatkan masuknya air laut kedalam akuifer air tawar yang mengakibatkan nilai salinitas meningkat sehingga mengakibatkan rasa air menjadi asin, dan menurunnya kualitas air tanah, hingga tidak dapat dikonsumsi.



Gambar 10. Kerentanan DRASTIC Air Tanah di Kecamatan Tanjungbumi

Kerentanan sangat tinggi dipengaruhi oleh kedalaman air tanah yang sangat dangkal (<3 m), dengan media rongga antar butir lepas-lepas berupa pasir sehingga lebih cepat masuk menuju zona tak jenuh air tanah dengan potensi kelulusan 3,30 m/hari. Potensi imbuhan air tanah sebesar 80-100 mm/tahun. Zona kerentanan sangat tinggi berada pada morfologi dataran pantai dengan kemiringan lereng 0-2%, hal tersebut dapat mengakibatkan sumber pencemar (polutan) masuk lebih cepat. Perlunya pemantauan pada sumur yang digunakan secara rutin untuk kegiatan rumah tangga (domestik) untuk menjaga kondisi kualitas air tidak melebihi baku mutu air bersih.

4. Kesimpulan

Di daerah penelitian terdapat lima (5) kerentanan pencemaran air tanah terhadap sumber pencemar, yaitu tingkat kerentanan sangat rendah seluas 2,18 km² (3,20 %), kerentanan rendah seluas 10,01 km² (14,69 %), kerentanan sedang seluas 45,74 km² (67,11 %), kerentanan tinggi seluas 7,22 km² (10,59 %), dan kerentanan sangat tinggi dengan luas 3 km² (4,40%) dari luas kecamatan Tanjungbumi.

Kerentanan sangat rendah dapat terjadi kontaminasi pada akuifer air tanah, jika terdapat sumber pencemar (polutan) yang masuk perlahan ke dalam zona jenuh dalam waktu yang lama. Salah satu upaya pengelolannya adalah dengan pemantauan berkala. Kerentanan zona rendah, memiliki potensi terjadi pencemaran hingga masuk ke akuifer air tanah dalam skala pencemaran berulang (secara berkala). Saran untuk pengelolaan air pada zona kerentanan rendah adalah pemantauan kualitas air dengan batas baku mutu minimal air bersih. Kerentanan sedang memiliki potensi tercemar setengah dari sumber pencemar (polutan). Saran untuk pengelolaan air, adalah dengan sosialisasi pupuk pertanian yang sesuai dikarenakan didominasi oleh penggunaan lahan pertanian dan kebun, memberikan pemahaman pengelolaan limbah rumah tangga terintegrasi dan pemantauan kualitas air secara berkala.

Kerentanan tinggi memiliki sifat dapat tercemar hampir seluruh dari sumber pencemar (polutan). Saran untuk pengelolaan air tanah adalah pembuatan sumur pantai dengan pemantauan kualitas air dengan kadar minimum baku mutu, memantau dan mengendalikan setiap kegiatan pembuangan limbah yang berpotensi sebagai sumber pencemar. Kerentanan sangat tinggi memiliki sifat, sumber pencemar (polutan) dapat mencemari seluruh sumber daya air. Saran untuk pengelolaan air, yaitu dengan pembuatan sumur pantau, pemantauan fluktuasi dan kualitas air tidak melebihi baku mutu air bersih, gerakan hemat air, pemanenan air hujan (optimalisasi pemanfaatan air hujan /PAH), dan pembuatan peraturan daerah (PERDA) tentang pengelolaan dan perlindungan lingkungan hidup, terlebih pengelolaan sampah atau limbah.

Ucapan Terima kasih

Artikel ini merupakan analisis lanjut dari penelitian terkait kajian "Air Tanah Berkelanjutan Berbasis Masyarakat di Kabupaten Bangkalan, Madura" yang difasilitasi oleh PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WMO). Ucapan terima kasih disampaikan kepada Fakultas Geografi UGM dan PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WMO) yang telah memfasilitasi dan mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdeslam, I., Fehdi, C., Djabri, L. 2017. Application of Drastic Method for Determining The Vulnerability of An Alluvial Aquifer: Morsott-El Aouinet North East of Algeria: Using Arcgis Environment. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, Beirut Lebanon. Energy Procedia Vol. 119. Pages 308-317.
- Abdullah, T.O., Ali, S.S., Al-Ansari, N.A., Knutsson, S. 2020. Assessment Of Groundwater Vulnerability To Pollution Using Two Different Vulnerability Models in Halabja-Saidsadiq Basin, Iraq. Groundwater For Sustainable Development. Vol. 10 No. 4. Pages 1-6.
- Abuduwaili, J., Issanova, G., Saparov, G. 2019. Water Resources Development and Management. Springer. Springer Nature Singapore.
- Aller, L., Bennett, t., Lehr, J. H., Petty, r. J., and Hackett, G. 1987. DRASTIC; A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. United States (USA): U.S. Environ. Prot. Agency, United States (USA).
- Arshad, A., Zhang, Z., Zang, W., Dilawar, A. 2020. Mapping Favorable Groundwater Potential Recharge Zones Using A GIS-Based Analytical Hierarchical Process And Probability Frequency Ratio Model: A Case Study From An Agro-Urban Region Of Pakistan. Geoscience Frontiers. Vol. 11 No. Pages 5-19.
- Azis, S., Sutrisno, Noya, Y., Brata K. 1991. Peta Geologi Lembar Tanjungbumi dan Pamekasan, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Cahyadi, A. 2019. Analisis Kerentanan Air tanah terhadap pencemaran di Pulau Koral Sangat Kecil dengan Menggunakan Metode GOD. Jurnal Geografi. Vol. 26 No. 1. Pages 48-53.
- Ciemens, M., Khurelbaatar, G., Merz, R., Siebert, C., Affeden, M.V., Rodiger, T. 2020. Groundwater Protection Under Water Scarcity; From Regional Risk Assessment To Local Wastewater Treatment Solutions In Jordan. Science of The Total Environment. Vol. 7 No. 1. Pages 1-13.
- Badan Informasi Geospasial (BIG). 2020. DEMNAS 1609-21.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2002. Standar Nasional Indonesia (SNI) No.19-6728.1-2002, Tentang Penyusunan Neraca Sumber Daya - Bagian 1: Sumber Daya Air Spasial. Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Bakr, H.A.E.A. 2020. Groundwater Vulnerability Assessment In Different Types Of Aquifers. Agricultural Water Management. Vol. 1. Pages 10-14.
- Devianto, L.A., Lusiana, N., Ramdani, F. 2019. Analisis Kerentanan Pencemaran Air Tanah di Kota Batu Menggunakan Analisis Multikriteria Spasial dengan

- Indek DRASTIC. Jurnal Wilayah dan Lingkungan. Vol. 7 No. 2. Hal 90-104.
- Febriarta, E., Suswanti, dan Novandaru, S. 2019. Interpretasi Electrical Resistivity Tomography (ERT) Untuk Pendugaan Air Tanah Dangkal Pada Formasi Gunungapi Muda. Jurnal Nasional Teknologi Terapan. Vol. 13 No. 1. Hal 49-62.
- Febriarta, E., Prabawa, B. A., Rosaji, F.S.C. 2018. Sumber Daya Air di Pulau Pelapis Kepulauan Karimata, Kabupaten Kayong Utara, Kalimantan Barat. Prosiding Seminar nasional Ke-4 Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai. Vol. 4. Hal 181-186.
- Febriarta, E., Larasti, A. 2020. Karakteristik Akuifer Air Tanah Dangkal di Enpdan Muda Merapi Yogyakarta. Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan. Vol. 12 No. 2. Hal 84-99.
- Febriarta, E., dan Oktama, R. 2020. Pemetaan Daya Dukung Lingkungan Berbasis Jasa Ekosistem Penyedia Pangan dan Air Bersih di Kota Pekalongan. Jurnal Ilmu Lingkungan. Vol. 18 No. 2. Hal 283-289.
- Febriarta, E., dan Purnama, S. 2020. Identifikasi Keterdapatan Airtanah Dengan Electromagnetic Very Low Frequency (EM-VLF) di Non Cekungan Airtanah Kecamatan Ungaran Timur. Jurnal Geosains dan Teknologi. Vol. 3 No. 2. Hal 52-62.
- Fetter, C.W., 2014. Applied Hydrogeology Fourth Edition. Pearson New International Education. England.
- Gaikwad, S.K., Kadam, A.K., Ramgir, R.R., Kashikar, A.S., Wagh, V.M., Kandeekar. A.M., Gaikwad, S.P., Madale, R.B., Pawar, N.J., Kamble, K.D. 2020. Assessment Of The Groundwater Geochemistry From A Part Of West Coast Of India Using Statistical Methods And Water Quality Index. HydroResearch. Vol. 3. Pages 48-60.
- Hailin, Y., Ligang, X., Chang, Y., Jiaying, X. 2011. Evaluation of Groundwater Vulnerability with Improved DRASTIC Method. 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT 2011). Procesa Environmental Sciences Vol. 10. Pages 2690-2695.
- Jena, S., Panda, R.K., Ramadas, M., Mohanty, P., Pattaniak, S.K. 2020. Delineation Of Groundwater Storage And Recharge Potential Zones Using Rs-Gis-Ahp: Application In Arable Land Expansion. Remote Sensing Applications: Society and Environment. Vol. 19. Pages 1-12.
- Lathamani, R., Jandarhana, M.R., Mahalingan, B., Suresha, S. 2015. Evaluation Of Aquifer Vulnerability Using Drastic Model And GIS: A Case Study Of Mysore City, Karnataka, India. Aquatic Procedia. Vol. 4. Pages 31-38.
- Marfai, M.A, Febriarta, E., Prabawa, B.A., Rosaji, F.S.C. 2019. Rencana Pemenuhan Kuantitas Dan Kualitas Air Desa Bandangdaja, Tanjungbumi, Bangkalan, Madura. Laporan Final. Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Muhammad, A.M., Zhonghua, T., Dawood, A.S., Eral, B. 2015. Evaluation of Local Groundwater Vulnerability based on DRASTIC Index Method in Lahore, Pakistan. Geofísica Internacional. Vol. 1. Pages 67-81.
- Orimoloye, I.R., Kalumba, A.M., Mazinyo, S., Nel, W. 2020. Geospatial Analysis of Wetland Dynamics: Wetland Depletion and Biodiversity Conservation of Isimangaliso Wetland, South Africa. Journal of King Saud University - Science. Vol. 32 No. 1. Pages 90-96.
- Pacheco, F.A.L., Pires, L.M.G.R., Santos, R.M.B., dan Fernandes, L.F.S. 2015. Factor Weighting In DRASTIC Modeling. Science of the Total Environment Vol. 505. Pages 474-486.
- Prusty, P., Farooq, S.H. 2020. Seawater intrusion in the coastal aquifers of India - A review. HydroResearch. Vol. 3. Pages 61-74.
- Putranto, T.T., Ali, R.K., dan Putro, A.B. 2019. Studi Kerentanan Air tanah terhadap Pencemaran dengan Menggunakan Metode DRASTIC pada Cekungan Air tanah (CAT) Karanganyar-Boyolali, Provinsi Jawa Tengah. Jurnal Ilmu Lingkungan, Vol. 17 No. 1. Pages 158-171.
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM). 2012. Penetapan Kawasan Bentang Alam Karst (KABAK) nomor 17 tahun 2012. Jakarta. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). 2017a. Litologi Akuifer.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). 2017b. Produktivitas Air Tanah.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). 2017c. Geologi Struktur.
- Smith, D.N.I., Ortega-Camacho, D., Acosta-Gonzalez. G. 2020. A Multi-Approach Assessment Of Land Use Effects On Groundwater Quality In Akarstic Aquifer. Heliyon. Vol. 6 No. 1. Pages 1-11.
- Sugianti, K., Mulyadi, D., Maria, R. 2016. Analisis Kerentanan Pencemaran Air Tanah dengan Pendekatan DRASTIC di Bandung Selatan. Jurnal lingkungan dan bencana geologi. Vol. 7 No. 1. Hal 19-33.
- Sukardi. 1992. Geologi Lembar Surabaya & Sapulu, Jawa. Badan Geologi, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung. Badan Geologi.
- Singhal, B.B.S., and Gupta, R.P. 2010. Applied Hydrogeology of Fracture Rock, Springer Dordrecht Heidelberg London. Springer.
- Sisultan. 2020. Peta Tanah Skala 1:50.000 Bangkalan, Provinsi Jawa Timur.
- Thapa, R., Gupta, S., Guin, S., Kaur, H. 2018. Sensitivity Analysis and Mapping The Potential Groundwater Vulnerability Zones in Birbhun District, India: A Comparative Approach Between Vulnerability Models. Water Science. Vol. 32. Pages 44-66.
- Yang, H., Kagabu, M., Okumura, A., Shimada, Jun., Shibata, T., Paniti, D.L. 2020. Hydrogeochemical Processes And Long-Term Effects Of Sea-Level Risein An Uplifted Atoll Island Of Minami-Daito, Japan. Journal of Hydrology: Regional Studies. Vol. 31. Pages 1-11.
- Vrba, J. and Zaporozec, A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Hannover. International Association of Hydrogeologist.