

Pemetaan Zona Kerentanan Airtanah Pesisir Formasi Batugamping Terhadap Pencemaran Nitrat Di Kecamatan Sepulu Madura

Erik Febriarta^{1*}, Muh Aris Marfai², Dhandhun Wacano^{3,4}, Ajeng Larasati¹ dan Dyah Rahmawati Hizbaron²

¹Palawa Karya Yogyakarta;

²Program Studi Geografi dan Ilmu Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

³Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

⁴Laboratorium Analisis Risiko Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia

ABSTRAK

Formasi litologi akuifer batugamping mempunyai karakteristik media aliran berupa celah, rekahan, dan lorong pelarutan, sehingga memiliki potensi mengalirkan airtanah dengan kecepatan tinggi. Produktivitas yang tinggi ini mengakibatkan sumber pencemar di permukaan dapat dengan cepat meresap ke sistem akuifer dan bercampur dengan airtanah; kondisi inilah yang memicu kerentanan tinggi. Salah satu langkah pengelolaan airtanah pesisir adalah penentuan zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran. Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui tingkat kerentanan airtanah pesisir terhadap pencemaran di formasi batugamping menggunakan metode COP dengan pendekatan intrinsik dan metode EPIK dengan pendekatan perkembangan karst. Hasil penilaian menggunakan kedua metode tersebut menunjukkan tingkat kerentanan rendah hingga sangat tinggi. Pemetaan metode COP menghasilkan dua kelas kerentanan: rendah (95% dari luas wilayah) dan sedang (4%), sedangkan metode EPIK menghasilkan zona indeks kerentanan yang lebih panjang dengan empat kelas kerentanan, yaitu rendah (1,23%), sedang (17,82%), tinggi (17,82%), dan sangat tinggi (21,65%). Dibandingkan dengan COP, EPIK menghasilkan kelas kerentanan yang lebih tinggi karena pengaruh koefisien pembobot pada formula penghitungannya. Hasil penilaian kerentanan divalidasi dengan indikator limbah domestik berupa senyawa nitrat (NO_3). Uji laboratorium menunjukkan kandungan nitrat (NO_3) airtanah yang bervariasi dari 0,12 mg/l (terendah) hingga 9,80 mg/l (tertinggi). Variasi ini masih berada di bawah baku mutu air minum tetapi di atas baku mutu air limbah domestik atau melebihi kadar nitrat di alam. Berdasarkan hasil validasi, zona kerentanan berkorelasi dengan kandungan nitrat (NO_3). Pada zona kerentanan yang tinggi, ditemukan kadar nitrat yang tinggi pula.

Kata kunci: Batugamping, COP, EPIK, karst, kerentanan, nitrat

ABSTRACT

A limestone aquifer is lithologically characterized by three flow media: fissures, fractures, and dissolution channels, thus creating the potential to drain groundwater at a high rate. This high productivity, however, means that the groundwater is highly vulnerable to pollution. If a pollutant source is present on the surface, it can quickly seep into and mix with the subsurface system. Among the widely proposed management strategies is groundwater vulnerability zoning. This study was intended to determine the degrees of coastal groundwater vulnerability to pollution in a limestone formation with two methods: COP (intrinsic vulnerability) and EPIK (karst development-based vulnerability). The assessment results showed that the vulnerability produced with both methods varied from low to very high. In the mapping, COP produced two levels: low (95% of the total area) and medium (4%), while EPIK generated a longer vulnerability index zone with four levels: low (1.23%), medium (17.82%), high (17.82%), and very high (21.65%). Compared to COP, EPIK results in a higher vulnerability class due to the weighting values in its vulnerability assessment. The results were validated with a domestic waste indicator: the presence of nitrate (NO_3). Laboratory tests showed NO_3 concentrations in the range 0.12 of 9.80 mg/l. These figures are still below the quality standard for drinking water but above that of domestic wastes or exceeding the maximum NO_3 content found in nature. The validation revealed that the vulnerability zone is correlated with NO_3 levels: the higher the vulnerability class of the zone, the higher the nitrate content.

Keywords: COP, EPIK, groundwater, karst, limestone, vulnerability, nitrate

Sitasi: Febriarta, E., Marfai, M.A., Wacano, D., Larasati, A., dan Hizbaron, D.R. (2022). Pemetaan Zona Kerentanan Airtanah Pesisir Formasi Batugamping Terhadap Pencemaran Nitrat Di Kecamatan Sepulu Madura. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 219-230, doi:10.14710/jil.20.2.219-230

1. Pendahuluan

Keterdapatan airtanah sebagai sumber daya air pemenuh kebutuhan dasar manusia sangat

dipengaruhi oleh susunan batuan atau litologi dari formasi batuan. Airtanah berada di media antar butir berupa celah, sarang, maupun lorong pelarutan (pada

* Penulis Korespondensi: e.febriarta@gmail.com

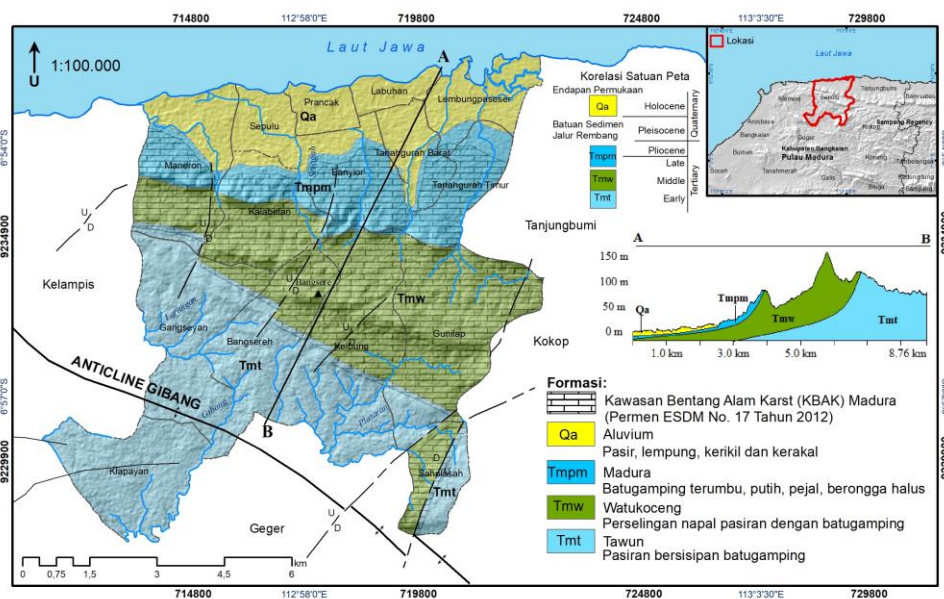
batuan karbonat). Makin porus suatu batuan, makin besar potensi keterdapatannya. Batuan yang porus memiliki sifat kelulusan airtanah yang tinggi (Febriarta & Larasati, 2020; Goldscheider & Drew, 2007), artinya airtanah di dalam sistem akuifer mengalir atau berpindah melalui rongga-rongga batuan dengan cepat.

Akuifer di daerah pesisir umumnya terbentuk oleh endapan material lepas-lepas; contohnya, akuifer pasir (Singhal and Gupta 2010; Todd and Mays 2005). Endapan lepas-lepas ini terbentuk oleh pengendapan hasil fragmentasi batuan induk di sekitar lingkungan pengendapan yang biasanya tersusun atas pasir, kerikil, dan kerakal atau material endapan aluvium (Gaikwad et al. 2020). Menurut Harter & Walker (2001), litologi akuifer yang tersusun oleh material lepas berupa pasir atau batugamping dengan media antar butir berupa celah, sarang, dan lorong pelarutan mempunyai potensi airtanah yang tinggi. Akan tetapi, sifat kelulusannya yang juga tinggi mengakibatkan airtanah rentan mengalami pencemaran (Murali, M., and P. 2018).

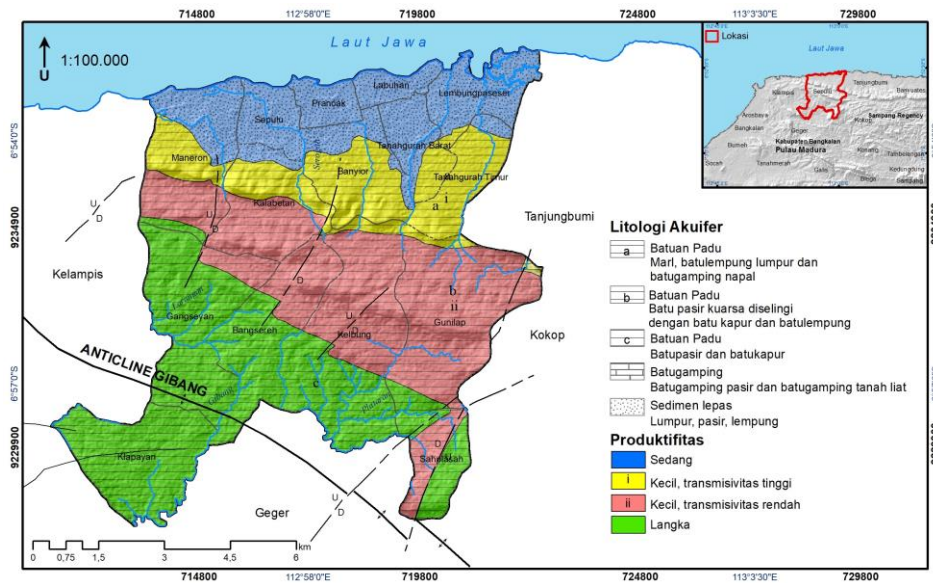
Di dalam konteks sistem akuifer, pencemaran airtanah dipengaruhi oleh sifat aliran dari akuifer (litologi) dan sifat hidrogeologi regional (Doummar et al. 2012). Dataran pesisir utara Pulau Madura tersusun atas material endapan Formasi Aluvium (batuan lanau, pasir, lempung, lumpur, dan kerikil) yang didominasi oleh material pasir. Morfologi perbukitan di sebelah selatan tersusun atas Formasi Madura, Watukoceng, dan Tawun (Gambar 1). Formasi Madura (Tmpm) bagian atas tersusun atas batuan batugamping terumbu yang putih, pejal, berongga halus, setempat berlapis buruk, mengandung foram besar dan pecahan ganggang, serta tanahnya kecoklatan atau kehitaman. Bagian bawahnya tersusun atas batugamping kapuran yang sangat ringan, agak keras, putih kekuningan, pejal,

setempat berlapis buruk, dan mengandung moluska, foram besar dan pecahan ganggang (Supandjono et al. 1992). Formasi Watukoceng (Tmw) bagian atas tersusun atas perselingan napal pasir dengan batugamping, sedangkan bagian bawah berupa batugamping kuarsa dengan sisipan batugamping orbitoid dan batupasir berlapis tipis. Formasi ini merupakan bagian dari kawasan bentang alam karst (KBAK Madura) yang terbentuk akibat pelarutan air pada batuan batugamping dan atau dolomit (KESDM 2018; Permen ESDM 2012). Formasi Tawun (Tmt) bagian atas tersusun atas endapan pasir dengan sisipan batugamping dan batupasir gampingan, sedangkan bagian bawahnya tersusun atas batulempung gampingan berbintal gampingan (KESDM 2012). Secara umum, kondisi geologi regional tersusun atas batuan napal pasir dengan sisipan batugamping (Febriarta et al., 2020; Marfai et al., 2019; Supandjono et al., 1992). Sifat hidrogeologi batugamping tersusun atas media celah, rekahan, dan lorong pelarutan, sehingga memiliki nilai kelulusan sedang hingga tinggi (Dausse, Leonardi, and Jourde 2019).

Produktivitas kecil setempat dengan keterusan tinggi dan kelulusan rendah ditemukan di daerah peralihan lereng dan morfologi perbukitan Gunung Bangsere (bagian batugamping napalan pada Formasi Madura), sedangkan produktivitas kecil setempat dengan keterusan dan kelulusan rendah terdapat di sisi selatan morfologi perbukitan Gunung Bangsere. Secara spasial, produktivitas rendah berada di sebagian KBAK Madura yang terbentuk pada masa Pliosen (Febriarta et al., 2020; Marfai et al., 2019; Supandjono et al., 1992). Produktivitas langka terdapat pada morfologi perbukitan bagian selatan Gunung Bangsere hingga antiklin Gibang dengan keterusan dan kelulusan rendah (Gambar 2).



Gambar 1. Geologi regional pesisir Kecamatan Sepulu.



Gambar 2. Kondisi hidrogeologi pesisir Kecamatan Sepulu

Penyelidikan potensi air, termasuk identifikasi tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran, merupakan dasar perencanaan pendayagunaan dalam rangka pengelolaan airtanah berwawasan lingkungan (Yang et al. 2019). Secara keruangan, informasi kerentanan dapat menentukan distribusi zona tingkat kerentanan. Kerentanan airtanah terhadap pencemaran mengacu pada tingkat kepekaan airtanah terhadap masuknya unsur sumber pencemar (polutan) atau tingkat perubahan kondisi tatanan (kualitas) airtanah akibat aktivitas manusia maupun proses alami yang berpotensi menurunkan kualitas air hingga tidak sesuai dengan peruntukannya (BSN 2002; Vrba and Zaporozec 1994).

Kondisi pembentuk kerentanan tersebut tidak dapat diamati secara langsung karena terjadi di dalam sistem akuifer (Gabr et al., 2020). Terdapat beberapa pendekatan yang digunakan, misalnya pendekatan parameter akuifer seperti kondisi perkolasi suatu formasi batuan atau sifat hidrogeologi airtanah (Aller et al. 1987). Metode GOD menggunakan penilaian parameter sifat hidrogeologis, kedalaman air, dan kondisi litologi zona tak jenuh (Guettaia et al. 2017). Metode DRASTIC merupakan pengukuran multikriteria kerentanan airtanah skala detil pada suatu sistem akuifer yang menggunakan parameter kedalaman air, curah hujan, kelas lereng, litologi, litologi akuifer, media tanah, zona tak jenuh, dan nilai konduktivitas hidrolis (Putranto et al., 2020; Thapa et al., 2018).

Kondisi geologi regional pesisir di Kecamatan Sepulu, Madura, tersusun atas batugamping pasir yang juga termasuk dalam cekungan airtanah (CAT) Ketapang dengan daerah imbuan berada di morfologi perbukitan Gunung Bengsere dan daerah lepasan di dataran pantai yang berbatasan dengan Laut Jawa (KESDM, 2018a; Marfai et al., 2019; Permen ESDM, 2017; Purnama et al., 2019). Metode GOD dan

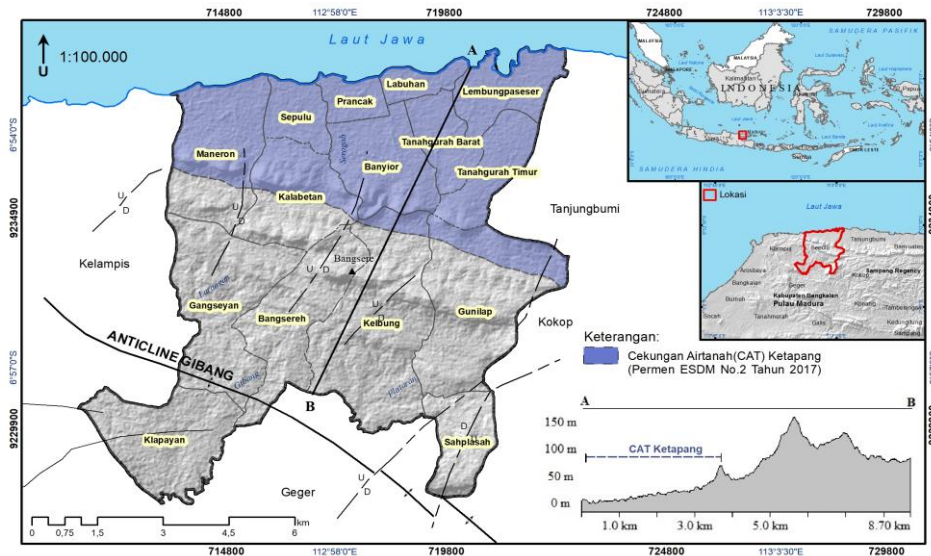
DRASTIC berfokus pada litologi batuan padu, sehingga tidak dapat diterapkan untuk menilai kerentanan airtanah di daerah penelitian yang tersusun atas endapan lepas-lepas dan batuan bercelah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menilai tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran di daerah pesisir pada formasi batugamping dan sebagian karst di Pulau Madura menggunakan metode COP (*intrinsic*, hidrogeologi) dan EPIK (spesifik, hidrogeologi fitur batugamping atau karst) dan memvalidasi hasil pemodelan kerentanan dengan konsentrasi senyawa kimia hasil limbah domestik berupa nitrat (NO_3).

2. Metode

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian secara geografis berada di koordinat -6.888199° hingga -6.979759° BT dan 112.914716° hingga 113.012974° LU, sedangkan secara administrasi berada di pesisir utara Pulau Madura, yakni Kecamatan Sepulu, Kabupaten Bangkalan, Provinsi Jawa Timur. Daerah ini berbatasan langsung dengan Laut Jawa di bagian utara, Desa Kelampis di bagian barat, Desa Tanjungbumi dan Kokop di bagian timur, dan Desa Geger di bagian selatan. Lokasi daerah kajian disajikan pada Gambar 3.

Lokasi penelitian secara morfologi berada di perbukitan batugamping yang melandai hingga daerah pesisir dengan penyusun batuan batuan lepas berupa pasir (Profil melintang A-A Gambar 3). Lokasi penelitian secara kondisi hidrogeologi pada bagian pesisir merupakan bagian dari cekungan airtanah Ketapang atau berada pada formasi Alluvium (Qa) dan Madura (Tmpm) dan bagian selatan non cekungan airtanah yang berada di atas formasi Watukoceng (Tmw) dan Tawun (tmt) yang didominasi oleh batugamping.



Gambar 3. Lokasi kajian berada di pesisir Kecamatan Sepuluh

2.2. Penilaian Kerentanan Metode COP

Kerentanan intrinsik airtanah dinilai menggunakan pendekatan metode COP (Vias et al. 2006) dan EPIK (Doerfliger, Jeannin, and Zwahlen 1999) yang dikembangkan khusus untuk heterogenitas litologi akuifer karst. Seperti yang terlihat pada Gambar 4, metode COP memiliki tiga faktor, yaitu *flow concentration* (C) atau proses infiltrasi, *overlying layers* (O) yang didefinisikan sebagai kondisi kapasitas lapisan atas (tanah) dan lapisan bawah (litologi batuan dari zona tak jenuh), dan *precipitation* (P) atau kondisi curah hujan. Faktor C mengombinasikan jenis infiltrasi dan konsentrasi aliran. Sistem karst memiliki infiltrasi perlahan (difusi) dan aliran yang terkonsentrasi pada celah/rekahan yang membentuk lubang pelarutan (aliran cepat). Terdapat dua skenario penilaian konsentrasi aliran. Skenario 1 (zona pertama) menilai konsentrasi aliran untuk kawasan imbuan dengan fitur karst berupa celah/rekahan pelarutan, atau runtunan (ponor); faktor C dihitung dengan persamaan 1. Skenario 2 (zona kedua) digunakan untuk kawasan lainnya yang tidak memiliki ciri fitur karst; faktor C dihitung dengan persamaan 2, seperti berikut ini:

$$C = dh \cdot ds \cdot sv \quad (1)$$

$$C = sf \cdot sv \quad (2)$$

di mana:

C : Nilai faktor konsentrasi aliran

dh : Jarak ke ponor (m)

ds : Jarak ke aliran influen (*sinking stream*) (m)

sv : Kemiringan lereng % (s) dan vegetasi (v)

sf : Kenampakan permukaan

Permukaan dengan kelerengan tinggi memiliki limpasan permukaan yang tinggi, sehingga daerah yang tergenang mengalami peningkatan imbuan. Di

sisi lain, vegetasi dengan kerapatan tinggi (lebat) mengurangi kemungkinan terjadinya aliran permukaan sebagai pembawa sumber pencemar. Oleh karena itu, kerentanan luasan airtanah dapat berkurang dengan meningkatnya faktor C terutama penurunan kemiringan lereng dan peningkatan vegetasi (Doummar et al. 2012; Vias et al. 2006).

Faktor O (*overlying layers*) terdiri atas lapisan penutup tanah (Os) dan perlapisan batuan (litologi) (OL). Parameter penutup tanah (Os) terdiri dari ketebalan penutup tanah dan tekstur tanah. Makin tebal penutup tanah, makin rendah potensi sumber pencemar yang masuk ke sistem akuifer; makin halus tekstur tanah, makin rendah kemampuannya dalam mengalirkan air (konduktivitas) yang ditandai dengan waktu percepatan aliran (transit) yang lama (Doummar et al. 2012). Oleh karena itu, tanah bertekstur halus dan bersolum tebal (sebagai contoh, tanah lempungan dengan ketebalan > 1 meter pada Gambar 4) membentuk perlindungan yang relatif baik serta kerentanan airtanah yang rendah terhadap pencemaran.

Parameter OL (perlapisan batuan) mengacu pada zona tak jenuh, yakni perlapisan batuan di atas lapisan akuifer dan terdiri dari litologi dan fraktur (ly), ketebalan batuan akuifer (m), dan tipe akuifer (cn, bebas/tertekan). Sub-parameter ly dan m dihitung secara terpisah untuk menghasilkan nilai indeks perlapisan (ly*m), kemudian dikalikan dengan sub-parameter tipe akuifer (cn). Makin rendah nilai ly dan m, makin rendah nilai perlindungan dari pencemaran atau makin tinggi tingkat kerentanan airtanahnya (Doummar et al. 2012). Rumus penilaian OL dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$OL = [ly \cdot m] \cdot cn \quad (3)$$

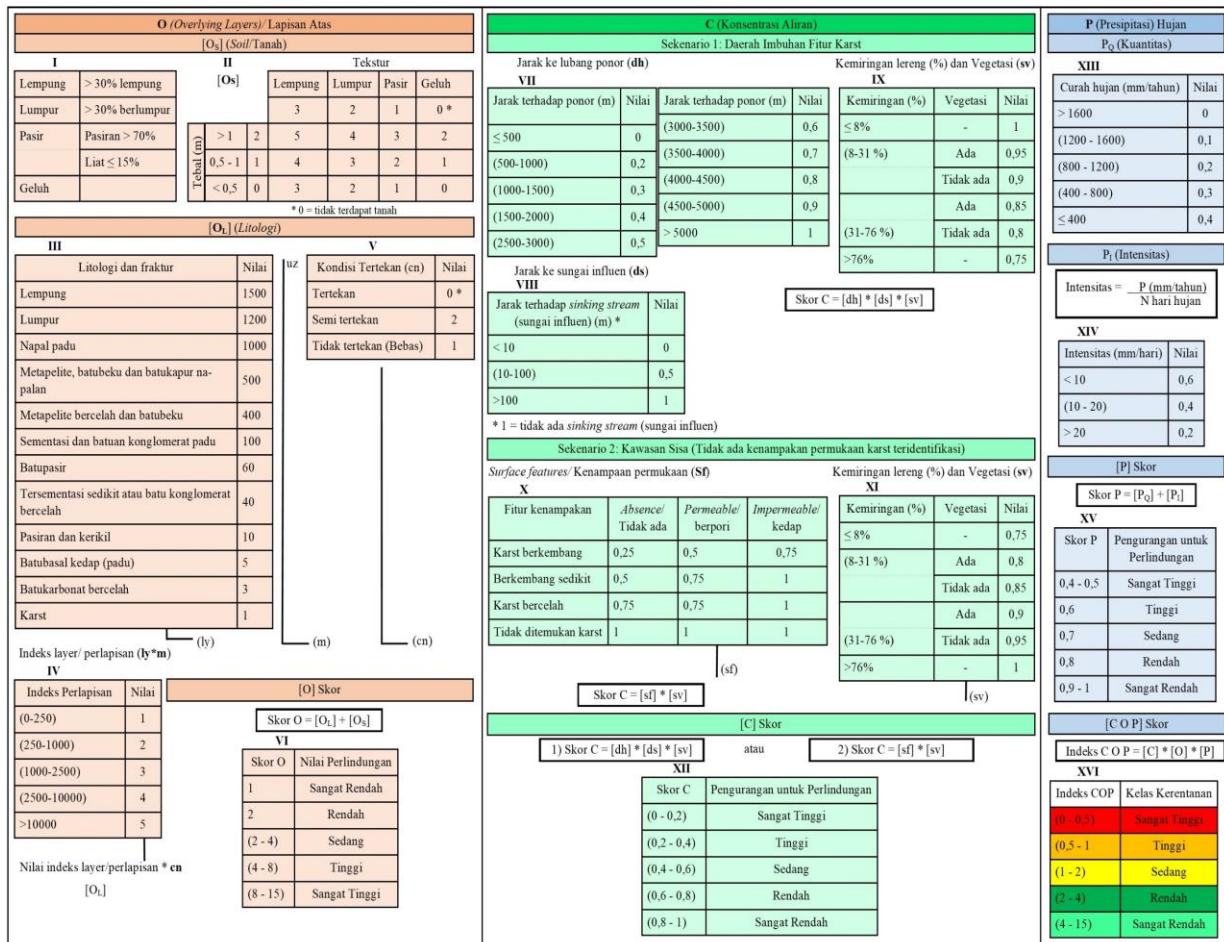
di mana:

OL : Faktor tekstur tanah dan perlapisan batuan

ly : Jenis perlapisan batuan (litologi dan fraktur)

m : Ketebalan akuifer (m)

cn : Tipe akuifer (bebas/tertekan)



Gambar 4. Metode COP untuk penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran (Doummar et al. 2012; Vias et al. 2006)

2.3. Penilaian Kerentanan Spesifik (EPIK)

Metode EPIK dikembangkan oleh Doerfliger et al., (1999) untuk menilai faktor perlindungan akuifer karst dari sumber pencemar berdasarkan *epikarst* (E), *protective cover* (P) atau tutupan pelindung, *infiltration* (I) atau infiltrasi, dan *karst network development* (K) atau perkembangan jaringan karst. Epikarst (E) mengacu pada zona bentukan karstifikasi di bawah penutup tanah, dan penilainnya bergantung pada tiga kondisi kenampakan morfologi karst yang ditemukan pada zona ini. Tutupan pelindung (P) merupakan kondisi ketebalan tutupan tanah atau formasi geologi non-karst di atas akuifer utama; tutupan pelindung yang tebal memiliki skor parameter P tinggi dan perlindungan yang baik terhadap pencemaran. Infiltrasi (I) menunjukkan sifat aliran air dari permukaan menuju ke dalam tanah: terkonsentrasi atau menyebar. Menurut Goldscheider & Drew (2007), aliran dengan konsentrasi menyebar memiliki kerentanan rendah dibandingkan dengan infiltrasi yang terkonsentrasi, seperti aliran influen dan ponor. Perkembangan jaringan karst (K) menunjukkan tingkat karstifikasi suatu formasi yang

dilihat dari perkembangan fitur permukaan dan ketersediaan jaringan aliran karst di bawah tanah. Setiap parameter EPIK diberi skor 1 hingga 3 atau 4 (lihat Gambar 5) dan diberi bobot sesuai dengan rumus pendekatan faktor perlindungan (F) berikut (Dorfliger and Zwahlen 1998):

$$F = 3(E) + 2(P) + 1(I) + 3(K) \quad (4)$$

di mana:

- F : Faktor perlindungan
- E : Epikarst
- P : Protective Cover
- I : Infiltration
- K : Karstification

Nilai faktor perlindungan (F) kemudian dikelompokkan menjadi empat tingkat/zona kerentanan, seperti yang disajikan dalam Tabel 1. Hasil akhir penilaian kerentanan airtanah intrinsik dan spesifik adalah peta distribusi keruangan (spasial) yang menunjukkan zona perlindungan untuk tingkat kerentanan yang sesuai.

Parameter	Kode	Skor	Deskripsi
Epikarst (E)			
Morfologi kenampakan fitur karst	E1	1	Goa, ponor, dolin, kenampakan karren, cuetas (bukit atau punggung dengan kemiringan landai)
	E2	2	Zona perantara berada sejajar dolin, uvala, lembah kering, ngarai/lembah(jurang), polje
Tidak ditemukan morfologi karst	E3	3	Zona lainnya (tidak termasuk keduanya)
Protective Cover/Tutupan pelindung (P)			
			A. Ketebalan tanah <20 cm bertumpu langsung pada formasi batugamping atau pada formasi detrital dengan konduktivitas hidrolik yang sangat tinggi* B. Ketebalan tanah <20 cm yang bertumpu pada formasi geologi dengan konduktivitas hidrolik rendah**
Tidak terdapat tutupan pelindung	P1	1	Ketebalan tanah 0 - 20 cm
	P2	2	Ketebalan tanah 20 - 100 cm
	P3	3	Ketebalan tanah > 1 m
Tutupan pelindung	P4	4	ketebalan tanah > 8 m, formasi konduktivitas hidrolik sangat rendah atau > 6 m formasi konduktivitas hidrolik sangat rendah dengan > 1 m (diperlukan pengukuran)
Infiltrasi (I)			
Infiltrasi terkonsentrasi (<i>concentrated</i>)	I1	1	Aliran tahunan atau terbentuk sementara, aliran sementara atau permanen yang masuk ke ponor, aliran permukaan infiltrasi; area tangkapan aliran air dari drainase buatan
	I2	2	Area tangkapan aliran air yang tidak dikeringkan secara artifisial dan dengan kemiringan lebih dari 25% untuk padang rumput dan padang rumput
	I3	3	Area tangkapan aliran air yang tidak dikeringkan secara artifisial dan dengan kemiringan kurang dari 10% untuk area yang dibajak (dibudidayakan) dan kurang dari 25% untuk padang rumput
Di luar daerah tangkapan aliran air permukaan: dasar lereng dan lereng curam (lebih dari 10% untuk area yang dibajak (dibudidayakan) dan lebih besar dari 25% untuk padang rumput dan padang rumput) di mana air limpasan menyusup			
Infiltrasi menyebar (<i>diffuse</i>)	I4	4	Zona lainnya (tidak termasuk ketiganya)
Perkembangan Karst (K)			
Karst berkembang baik	K1	1	Jaringan karst yang berkembang baik dengan saluran berukuran desimeter (dm) hingga meter (m) dengan aliran influen dan saling terhubung dengan baik
Jaringan kurang berkembang	K2	2	Jaringan karst yang tidak berkembang dengan baik dengan saluran atau saluran yang tidak terhubung atau diisi dengan baik, atau saluran dengan ukuran desimeter atau lebih kecil
Akuifer campur atau bercelah	K3	3	Zona pelepasan media berpori dengan kemungkinan pengaruh perlindungan - akuifer non-karst bercelah

Gambar 5. Metode EPIK untuk penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran (Doerfliger et al. 1999)

Tabel 1. Kriteria tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran berdasarkan nilai faktor perlindungan (F) pada metode EPIK

Faktor Perlindungan (F)	Tingkat Kerentanan
9 < F ≤ 19	Sangat Tinggi
20 < F ≤ 25	Tinggi
F > 25	Sedang
F > 25 (nilai P4 dan I3,4)	Rendah

Sumber: (Dorfliger and Zwahlen 1998)

2.4. Validasi Kerentanan Pencemaran dengan Senyawa Nitrat (NO₃)

Validasi penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran merupakan langkah evaluasi hasil pemodelan dengan kondisi lingkungan eksisting menggunakan pendekatan senyawa kimia air, terutama senyawa potensi pencemar seperti nitrit (NO₂) dan nitrat (NO₃) (Bastani and Harter 2019; Purnama and Cahyadi 2019). Nilai konsentrasi senyawa nitrat (NO₃) diperoleh dari sampel airtanah

dan kemudian diuji di laboratorium dengan metode uji spektrofotometri. Sampel air ditentukan menggunakan teknik purposive sampling untuk mendapatkan representasi perbedaan morfologi dan penggunaan lahan permukiman untuk mengetahui konsentrasi hasil limbah domestik berupa nitrat (NO₃).

Senyawa nitrat ditemukan di alam dengan konsentrasi 0,1 mg/l. Sampel airtanah yang memiliki konsentrasi nitrat melebihi angka ini mengindikasikan adanya sumber pencemar dari pembuangan limbah, sampah padat, dan sisa kegiatan domestik, pertanian, dan industri (Gaikwad et al. 2020; PSDA 2018; PUPR 2016). Analisis senyawa nitrat (NO₃) dibandingkan dengan nilai baku mutu polusi domestik menurut PSDA (2018) dan dibandingkan juga dengan baku mutu standar PermenKes nomor 32 tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, dan Pemandian Umum (lihat Tabel 2).

Tabel 2. Nilai baku mutu konsentrasi senyawa Nitrat (NO₃)

No.	Pedoman Baku Mutu Nitrat (NO ₃)	Baku Mutu (mg/l)	Sumber
1.	Balai Pekerjaan Umum Sumber Daya Air (PSDA, identifikasi untuk polusi domestik)	0,1	Gaikwad et al. (2020; PSDA, (2018)
2.	PermenKes No.32 tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, dan Pemandian Umum	10	PermenKes (2017)

Sumber: Analisis Data, 2021

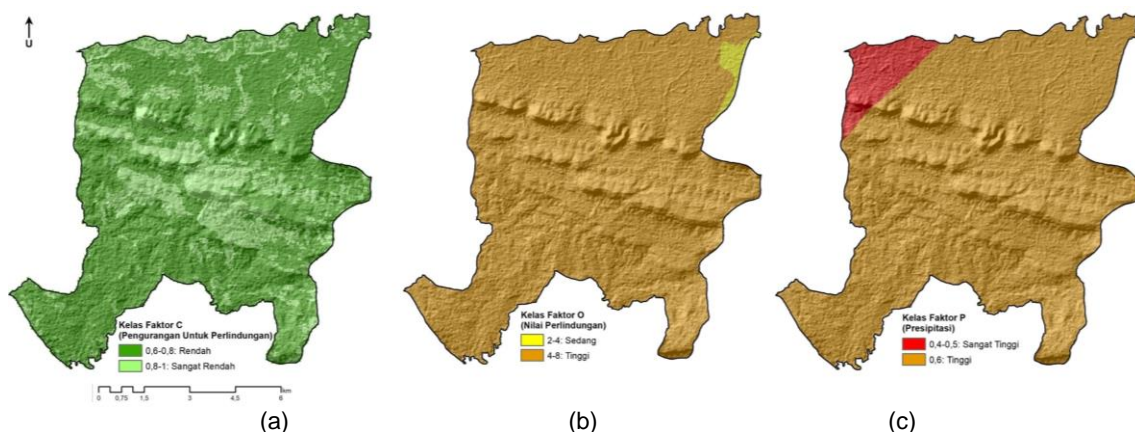
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kerentanan Airtanah Menurut Metode COP

Faktor C (*flow concentration*) terdiri atas (a) kenampakan morfologi karst, (b) kondisi kemiringan lereng yang diperoleh dari konversi data *digital elevation model* (DEM) dari BIG (2018) menjadi gradien lereng menggunakan aplikasi sistem informasi geografis (SIG), dan (c) kondisi vegetasi berdasarkan data penggunaan lahan tahun 2018 dari BIG (2018b). Perhitungan faktor C menggunakan rumus pendekatan skenario 2, yakni penilaian konsentrasi aliran pada zona dengan kenampakan morfologi karst sangat sedikit. Berdasarkan hasil analisis linier faktor C, diperoleh dua kelas pengurangan untuk perlindungan, yaitu rendah dan sangat rendah, dengan kelas rendah mendominasi daerah penelitian (Gambar 6a). Semakin landai lereng suatu daerah, semakin rendah nilai kerentanan yang diperoleh; kondisi seperti ini ditemukan di daerah dataran pantai. Dominasi kelas rendah dipengaruhi oleh kenampakan karst yang belum berkembang, kondisi morfologi bergelombang, dan adanya vegetasi. Di daerah penelitian, kondisi vegetasi dan kemiringan lereng memiliki pengaruh yang signifikan dalam perhitungan analisis karena memiliki faktor pengali yang besar. Menurut Doummar et al., (2012) dan Amil et al., (2020), kerapatan vegetasi tinggi meningkatkan perlindungan terhadap airtanah, sehingga menurunkan nilai kerentanannya terhadap pencemaran.

Faktor O (*overlying layers*) terdiri atas ketebalan tanah dan kondisi litologi. Data yang diperoleh dari Marfai et al. (2019) dan Sisultan (2017) menunjukkan bahwa ketebalan tanah di daerah penelitian adalah 10-70 cm, sedangkan data litologi yang diperoleh dari KESDM (2015a) dan Marfai et al., (2019) mengindikasikan dominasi oleh endapan lepas berupa pasir pada dataran pantai dan batulempung pasir dengan sisipan batupasir dan batugamping pada area dengan morfologi bergelombang. Dari perhitungan faktor O, diperoleh dua kelas perlindungan terhadap pencemaran, yaitu sedang pada daerah pesisir (dataran pantai) dan tinggi yang mendominasi wilayah penelitian (Gambar 6b). Nilai tinggi tersebut dipengaruhi oleh litologi dengan media akuifer bercelah yang mempunyai potensi mengalirkan air ke dalam sistem akuifer dengan laju percepatan tinggi yang dapat mendorong terjadinya pencemaran (Putranto et al. 2020).

Faktor P (*precipitation*) diperoleh dari data curah hujan sekunder dari Febriarta et al. (2020) dan Marfai et al. (2019) yang menunjukkan curah hujan daerah penelitian sebesar 1.000-1.300 mm/tahun. Berdasarkan hasil perhitungan faktor P, diperoleh dua kelas, yakni kelas hujan sangat tinggi (1.300 mm/tahun) di barat laut pesisir dan kelas hujan tinggi di bagian selatan daerah penelitian (1.000-1.200 mm/tahun) (Gambar 6c). Curah hujan dan intensitas hujan yang tinggi mengencerkan sumber pencemar dan meningkatkan volumenya, sehingga kondisi ini menjadi faktor pembentuk kerentanan yang tinggi (Hosseini and Saremi 2018; Putranto 2019).



Gambar 6. Kelas faktor konsentrasi aliran/C (a), lapisan tanah dan litologi/O (b), dan presipitasi/P (c) dalam penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran menggunakan metode COP

3.2. Kerentanan Airtanah Menurut Metode EPIK

Parameter epikarst (E) dianalisis menggunakan data *digital elevation model* (DEM) dari BIG, (2018a) dan KESDM (2018b). Berdasarkan hasil analisis, terdapat tiga kelas parameter (Gambar 7a), yakni kenampakan permukaan karst pada morfologi perbukitan di bagian tengah (bagian Gunung Bangsere) dengan skor 1 (faktor perlindungan rendah, kerentanan tinggi), morfologi bergelombang di bagian tengah dan tenggara dengan skor 2 (sedang), dan morfologi tanpa kenampakan karst di bagian pesisir utara dan selatan dengan skor 3 (faktor perlindungan tinggi, kerentanan rendah). Parameter E di bagian pesisir utara dan selatan memiliki skor 3, sehingga memiliki faktor pembentuk kerentanan airtanah yang rendah.

Parameter tutupan pelindung (P) ditentukan menggunakan data tanah dari Sisultan (2017). Daerah pesisir memiliki ketebalan rata-rata 18 cm yang termasuk dalam kategori kerentanan tinggi. Semakin tipis lapisan tanah maka semakin tinggi kerentanan airtanah karena dapat mempercepat proses masuknya air permukaan ke akuifer (Putranto and Rude 2016). Bagian perbukitan memiliki ketebalan 77 cm, atau kelas P2 (skor 2), sedangkan daerah dengan morfologi bergelombang di bagian selatan memiliki ketebalan rata-rata 105 cm yang termasuk kelas P3 (skor 3) (Gambar 7b).

Parameter infiltrasi (I) ditentukan menggunakan data sekunder kondisi aliran permukaan yang dianalisis dari DEM menggunakan data BIG (2018a) dan data sekunder kondisi vegetasi dari BIG (2018b). Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa kondisi infiltrasi pada kelerengan 10% memiliki nilai faktor pembentuk kerentanan yang lebih tinggi daripada kelerengan 20%, sehingga masuk kelas I2, sedangkan pada kelerengan lebih dari 25% yang mendominasi daerah penelitian, infiltrasi dianggap kelas I3 (Gambar 7c).

Parameter perkembangan jaringan karst (K) dianalisis menggunakan DEM dari BIG (2018a) dan data sekunder kawasan bentang alam karst dari KESDM (2018b) dan Permen ESDM, (2012). Berdasarkan hasil analisis tersebut, diketahui bahwa jaringan karst di bagian perbukitan tengah (bagian

Gunung Bangsere) kurang berkembang, sehingga memiliki nilai faktor pembentuk kerentanan sedang, sedangkan jaringan karst di bagian pesisir utara dan bagian selatan memiliki perkembangan campuran dengan nilai faktor pembentuk kerentanan rendah (Gambar 7d). Kalhor et al. (2019) menyebutkan bahwa semakin tidak berkembang suatu kawasan karst (akuifer karst) maka semakin rendah tingkat kerentanannya terhadap pencemaran. Hal ini dipengaruhi oleh perkembangan media aliran yang belum terhubung langsung dengan sistem akuifer airtanah.

3.3. Indeks Kerentanan Airtanah terhadap Pencemaran di Akuifer Pesisir

Kedua indeks kerentanan yang dihasilkan dari perhitungan metode COP dan EPIK menghasilkan tingkat kerentanan yang berbeda. Penilaian menggunakan metode COP menghasilkan kelas kerentanan tinggi yang dominan (95,55%), sedangkan penilaian dengan metode EPIK menunjukkan bahwa sekitar sepertiga daerah penelitian (30,60%) memiliki kerentanan sangat tinggi. Selain itu, metode COP membagi indeks kerentanan menjadi dua tingkat, sedangkan metode EPIK membaginya menjadi empat. Daerah atau zona kerentanan yang dihasilkan kedua metode tersebut menggambarkan lokasi yang berbeda. Berdasarkan hasil penilaian dengan metode COP, zona kerentanan rendah ditemukan hampir menyeluruh di daerah kajian (Gambar 8), sedangkan metode EPIK menghasilkan zona kerentanan rendah hingga sangat tinggi yang signifikan. Distribusi dengan tingkat kerentanan yang sama terdapat pada sebagian zona kerentanan rendah yang terdapat di sebagian Desa Gangseyan dan Bangsereh. Luas zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran disajikan dalam Tabel 3.

Kerentanan sedang dari hasil metode COP memiliki karakteristik sebagai berikut: kenampakan perkembangan karst yang belum berkembang dengan kemiringan lereng 8-31%, litologi berupa batuan padu dan bercelah dengan tekstur permukaan (tekstur tanah) lempungan, dan curah hujan 800-1.200 mm/tahun.

Tabel 3. Luas zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran di akuifer pesisir Kecamatan Sepulu, Pulau Madura

Metode	Kelas Kerentanan	Skor Kerentanan	Luas		Desa
			km ²	%	
COP	Sedang	1-2	67,61	95,55	Labuan, Prancak, Maneron, Sepulu, Tanahgurah Barat, Banyior, Klabetan, Klebung, Gangseyan, Bangsereh, Klapayan, Sahplalah, Gunilap, Tanahgurah Timur, Lembungpasaser
	Rendah	2-4	3,15	4,45	Maneron, Sepulu, Kalabetan, Bangsereh, Tanahgurah Timur, Lembungpasaser
	Sangat Tinggi	9-19	21,65	30,60	Maneron, Tanahgurah Barat, Banyior, Kalabetan, Kelbung, Gangseyan, Bangsereh, Sahplalah, Gunilap, Tanahgurah Timur
EPIK	Tinggi	20-25	12,61	17,82	Labuan, Prancak, Maneron, Sepulu, Tanahgurah Barat, Banyior, Kalabetan, Kelbung, Gangseyan, Bangsereh, Sahplalah, Gunilap, Tanahgurah Timur, Lembungpasaser
	Sedang	26-27	12,61	17,82	Maneron, Kalabetan, Gangseyan, Bangsereh, Klapayan
	Rendah (P4&I3)	>25	1,23	1,74	Gangseyan, Bangsereh

Sumber: Analisis Data, 2021

Namun demikian, sebagian kerentanan sedang di pesisir memiliki karakteristik sebagai berikut: tidak ditemukannya kenampakan karst, memiliki kemiringan lereng <8%, berada pada litologi batuan padu dan endapan dengan penyusun pasir dan kerikil, dan memiliki curah hujan sedang (1.000-1.300 mm/tahun).

Faktor O, terdiri dari litologi (O_L) dan ketebalan tanah (O_s), dan faktor P (curah hujan) sangat mempengaruhi kondisi lapisan atas yang menghasilkan tingginya nilai perlindungan (lihat Gambar 6). Berdasarkan hasil perhitungan, faktor C tidak berperan secara signifikan dalam mendorong terjadinya pencemaran karena, berdasarkan kelas kerentanan, daerah kajian termasuk dalam karst yang belum berkembang. Guastaldi et al. (2014) menyebutkan bahwa kenampakan karst yang belum berkembang memiliki nilai yang kecil terhadap faktor perlindungan airtanah dari pencemaran. Guastaldi et al. (2014) menyebutkan kenampakan karst yang belum berkembang dapat memberikan faktor pembentuk kerentanan yang rendah.

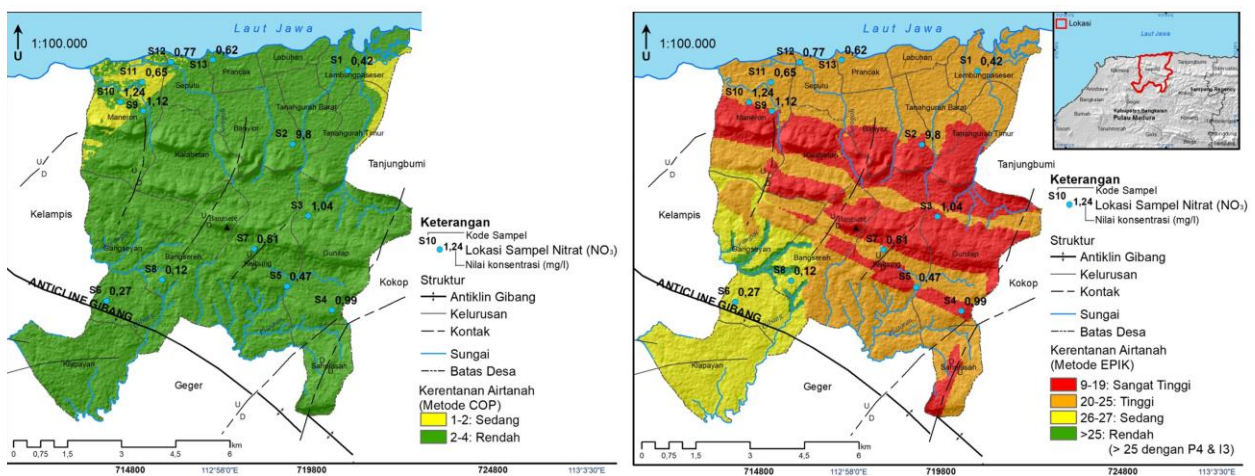
Zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran hasil analisis metode EPIK yang disajikan pada Gambar 8 menunjukkan hasil yang lebih spesifik dengan rentang kelas yang lebih panjang. Zona kerentanan rendah di morfologi perbukitan karst (bagian tengah) pada metode COP secara signifikan menjadi tiga kelas pada hasil penilaian metode EPIK, yakni kelas sedang hingga sangat tinggi. Zona kerentanan sangat tinggi mempunyai karakteristik faktor ketebalan tanah 0-20 cm dengan pola aliran permukaan menyebar, sedangkan zona kerentanan tinggi mempunyai karakteristik faktor ketebalan tanah 20-100 cm dengan jaringan karst yang belum berkembang dan akuifer campur atau bercelah. Zona kerentanan sedang mempunyai karakteristik berupa faktor ketebalan tanah 20-100 cm dengan pola aliran menyebar, sedangkan zona kerentanan rendah mempunyai akuifer campur atau bercelah (faktor

litologi), penutup atas berupa ketebalan tanah > 1 m, dan kondisi aliran permukaan menyebar.

Faktor utama yang mempengaruhi faktor perlindungan (F) adalah epikarst (E) dan tingkat perkembangan karst (K). Meskipun jaringan karst di daerah kajian belum berkembang, faktor K memiliki koefisien penimbang sebesar 3, sehingga memiliki peran yang signifikan dalam membentuk tingkat kerentanan airtanah. Perkembangan karstifikasi (K) didasarkan atas litologi akuifer berupa batuan padu pada daerah pesisir yang merupakan faktor pembentuk kerentanan. Faktor tutupan pelindung (ketebalan tanah/P) memiliki koefisien penimbang sebesar 2 atau lebih rendah dibandingkan faktor E dan K. Selain itu, metode EPIK turut mempertimbangkan kondisi infiltrasi (I) berdasarkan variasi kemiringan lereng yang memengaruhi batas zona kerentanan. Hanya saja, faktor I ini memiliki koefisien pembobotan yang kecil, yakni 1.

3.4. Validasi Perhitungan dan Analisis

Pemetaan zona kerentanan airtanah divalidasi dengan kondisi lingkungan terukur, yakni parameter limbah domestik berupa konsentrasi nitrat (NO_3) (Abdelmajid & Omar, 2013; Febriarta & Riasasi, 2019). Nilai nitrat merupakan indikator pencemaran airtanah dari limbah domestik tingginya nilai nitrat sangat dipengaruhi oleh laju pergerakan airtanah (laju pencemaran di akuifer) yang dipengaruhi oleh parameter akuifer yaitu celah atau rongga antar butir, sehingga semakin bercelah litologi akuifer maka laju pencemaran akan semakin cepat (Putranto et al. 2020). Berdasarkan hasil analisis laboratorium (Tabel 4), nilai konsentrasi nitrat (NO_3) berada di bawah baku mutu untuk air minum dengan rentang nilai 0,12 mg/l (terendah) hingga 9,80 mg/l (tertinggi). Namun demikian, dibandingkan dengan konsentrasi nitrat (NO_3) di alam, keberadaan nitrat tersebut telah melebihi nilai baku mutu air limbah domestik (0,1 mg/l) (Voutchkova et al. 2021).



Gambar 8. Indeks kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode COP dan EPIK

Tabel 4. Distribusi konsentrasi senyawa nitrat (NO₃) di daerah penelitian

No.	Kode	Koordinat (UTM: Zona 49s)			NO ₃ (mg/l)	Zona Kerentanan	
		X	Y	Z (mdpal)		COP	EPIK
1	S1	720856	9237730	5	0,42	Rendah	Tinggi
2	S2	719322	9235715	34	9,80	Rendah	Sangat Tinggi
3	S3	719737	9233737	88	1,04	Rendah	Sangat Tinggi
4	S4	720390	9231137	117	0,99	Rendah	Sangat Tinggi
5	S5	719143	9231802	87	0,47	Rendah	Tinggi
6	S6	714165	9231423	113	0,27	Rendah	Sedang
7	S7	718244	9232838	54	0,51	Rendah	Tinggi
8	S8	715705	9231997	87	0,12	Rendah	Sedang
9	S9	715197	9236647	20	1,12	Rendah	Sangat Tinggi
10	S10	714566	9236891	40	1,24	Sedang	Sangat Tinggi
11	S11	715178	9237440	8	0,65	Sedang	Tinggi
12	S12	715972	9237992	8	0,77	Rendah	Tinggi
13	S13	717126	9238043	9	0,62	Rendah	Tinggi

Keterangan: Seluruh sampel melebihi kadar nitrat di alam (0,1 mg/l) tetapi di bawah baku mutu air untuk keperluan sanitasi dan konsumsi (10 mg/l).

Sumber: Analisis Data, 2021

Zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran yang diperoleh menggunakan metode EPIK memiliki korelasi dengan distribusi konsentrasi nitrat (NO₃). Pada zona kerentanan sangat tinggi, ditemukan kandungan nitrat yang tinggi. Sebaliknya, kandungan nitrat yang rendah (Sampel S8) berada pada zona kerentanan rendah (sedang pada metode EPIK). Korelasi positif antara zona kerentanan dengan distribusi konsentrasi nitrat serupa dengan hasil penelitian Purnama & Cahyadi (2019) yang menemukan konsentrasi nitrat tinggi di lokasi dengan kerentanan cukup tinggi. Selain itu, Thapa et al. (2019) juga menyebutkan bahwa senyawa nitrat (NO₃) dapat digunakan sebagai parameter kondisi lingkungan yang sudah sangat tercemar. Berdasarkan hasil pemodelan derajat kerentanan airtanah dan nilai NO₃ dengan terhadap pencemaran terdapat korelasi bahwa semakin tinggi derajat kerentanan airtanah semakin tinggi juga nilai senyawa nitrat (NO₃) yang dimungkinkan terjadi penyebaran pencemaran airtanah bergerak cepat.

4. Kesimpulan

Kerentanan airtanah terhadap pencemaran dapat diperoleh melalui penilaian sifat hidrogeologi. Metode EPIK menghasilkan tingkat kerentanan yang lebih signifikan dengan nilai rentang yang lebih panjang, sehingga dapat dibagi menjadi empat tingkat kerentanan: rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi, sedangkan metode COP hanya menghasil dua kelas kerentanan: rendah dan sedang. Metode COP dan EPIK memiliki perbedaan deliniasi yang mengakibatkan nilai dan kelas kerentanan lebih tinggi pada hasil penilaian menggunakan metode EPIK. Metode EPIK dapat diadopsi untuk menilai potensi airtanah atau kondisi produktivitas yang rendah. Analisis nilai konsentrasi nitrat (NO₃) dapat digunakan sebagai indikator pencemaran karena mempunyai korelasi dengan derajat kerentanan airtanah terhadap pencemaran.

Saran yang dapat diberikan dalam pengelolaan airtanah pada zona kerentanan tinggi dan sangat

tinggi adalah pemantauan kondisi kualitas airtanah menggunakan sumur pantau dan pembuatan undang-undang tentang pengelolaan dan perlindungan lingkungan hidup oleh pemerintah daerah. Saran pengelolaan pada zona kerentanan sedang dan rendah adalah edukasi masyarakat tentang pengelolaan sampah rumah tangga terpadu.

Ucapan Terima Kasih

Artikel ini merupakan kelanjutan Kegiatan Pengelolaan Airtanah Berkelanjutan Berbasis Masyarakat di Kabupaten Bangkalan Madura yang difasilitasi oleh PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WHO). Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada PT Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WHO) dan Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada yang telah mendukung dan memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmadjid, B., and S. Omar. 2013. "Assessment of Groundwater Pollution by Nitrates Using Intrinsic Vulnerability Methods: A Case Study of the Nil Valley Groundwater (Jijel, North-East Algeria)." *African Journal of Environmental Science and Technology* 7(10):949-60.
- Aller, L., T. Bennett, J. H. Lehr, R. J. Petty, and G. Hackett. 1987. *DRASTIC; a Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. United States: United States Environmental Protection Agency.
- Amil, Ayşenur, Pınar Avcı, Ahmet Çil, Ayşe Muhammetoğlu, and Naciye Nur Özyurt. 2020. "Significance of Validation for Karst Aquifers' Vulnerability Assessments: Antalya Travertine Plateau (Turkey) Application." *Journal of Contaminant Hydrology* 228:103557. doi: 10.1016/j.jconhyd.2019.103557.
- Bastani, Mehrdad, and Thomas Harter. 2019. "Source Area Management Practices as Remediation Tool to Address Groundwater Nitrate Pollution in Drinking Supply Wells." *Journal of Contaminant Hydrology* 226:103521. doi: 10.1016/j.jconhyd.2019.103521.
- BIG. 2018a. *DEMNAS 1609-12 (Sepulu) & DEMNAS 1609-21*

- (*Tanjungbumi*). Bogor, Indonesia: Badan Informasi Geospasial (BIG).
- BIG. 2018b. *Rupa Bumi Indonesia Kabupaten Bangkalan 1:25.000*. Bogor, Indonesia: Badan Informasi Geospasial (BIG).
- BSN. 2002. *Standar Nasional Indonesia No. 19-6728.1-2002 Penyusunan Neraca Sumber Daya - Bagian 1: Sumber Daya Air Spasial*. Badan Standardisasi Nasional. Vol. ICS 13.060. Jakarta, Indonesia, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Dausse, Amélie, Véronique Leonardi, and Hervé Jourde. 2019. "Journal of Hydrology: Regional Studies Hydraulic Characterization and Identification of Flow-Bearing Structures Based on Multi-Scale Investigations Applied to the Lez Karst Aquifer." *Journal of Hydrology: Regional Studies* 26(November):100627. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100627.
- Doerfliger, N., P. Y. Jeannin, and F. Zwahlen. 1999. "Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A New Method of Defining Protection Areas Using a Multi-Attribute Approach and GIS Tools (EPIK Method)." *Environmental Geology* 39(2):165-76. doi: 10.1007/s002540050446.
- Dorfliger, N., and F. Zwahlen. 1998. "Practical Guide - Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)." *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern*, 56.
- Doumar, Joanna, Armin Margane, Tobias Geyer, and Martin Sauter. 2012. *Vulnerability Mapping Using the COP and EPIK Methods*. Special Re. Goettingen: University of Goettingen.
- Elsayed Gabr, Mohamed, Hoda Soussa, and Ehab Fattouh. 2020. "Groundwater Quality Evaluation for Drinking and Irrigation Uses in Dayrout City Upper Egypt." *Ain Shams Engineering Journal*. doi: 10.1016/j.asej.2020.05.010.
- ESDM. 2018. *Cekungan Air Tanah (CAT)*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Febriarta, E., M. A. Marfai, D. R. Hizbaron, and A. Larasati. 2020. "Kajian Spasial Multi Kriteria DRASTIC Kerentanan Air Tanah Pesisir Akuifer Batugamping Di Tanjungbumi Madura." *Jurnal Ilmu Lingkungan* 18(3):476-87. doi: 10.14710/jil.18.3.476-487.
- Febriarta, Erik, and Ajeng Larasati. 2020. "Karakteristik Akuifer Air Tanah Dangkal Di Endapan Muda Merapi Yogyakarta." *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan* 12(2):84-99. doi: https://doi.org/10.20885/jstl.vol12.iss2.art1.
- Febriarta, Erik, and Widiyana Riasasi. 2019. "Karakteristik Kualitas Air Embung Tambakboyo Di Kabupaten Sleman Yogyakarta." *Seminar Nasional Pengelolaan Pesisir Dan Daerah Aliran Sungai Ke-5* 5:117-23.
- Gaikwad, Satyajit K., Ajaykumar K. Kadam, Ritish R. Ramgir, Akanksha S. Kashikar, Vasant M. Wagh, Avinash M. Kandekar, Suryakant P. Gaikwad, Ramdas B. Madale, Namdev J. Pawar, and Kishor D. Kamble. 2020. "HydroResearch Assessment of the Groundwater Geochemistry from a Part of West Coast of India Using Statistical Methods and Water Quality Index." *HydroResearch* 3:48-60. doi: 10.1016/j.hydres.2020.04.001.
- Goldscheider, Nico, and David Drew. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. Vol. 53. London: Taylor & Francis Group, London.
- Guastaldi, Enrico, Luca Graziano, Giovanni Liali, Fabio Nunzio Antonio Brogna, and Alessio Barbagli. 2014. "Intrinsic Vulnerability Assessment of Saturnia Thermal Aquifer by Means of Three Parametric Methods: SINTACS, GODS and COP." *Environmental Earth Sciences* 72(8):2861-78. doi: 10.1007/s12665-014-3191-z.
- Guettaia, Sabrine, Messaoud Hacini, Abderrezak Boudjema, Abderrezak Zahrouna, Abderrezak Boudjema, and P. Ferrão. 2017. "Vulnerability Assessment of an Aquifer in an Arid Environment and Vulnerability Assessment of an Aquifer in an Arid Environment and Comparison of the Applied Methods: Case of the Mio-Plio-Quaternary Comparison of the Applied Methods: Case of the Mio-Pli." *Energy Procedia* 119:482-89. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.057.
- Harter, T., and L. .. G. Walker. 2001. *Booklet: Assessing Vulnerability of Groundwater*. California: California Department of Health Services.
- Hosseini, M., and A. Saremi. 2018. "Assessment and Estimating Groundwater Vulnerability to Pollution Using a Modified DRASTIC and GODS Models (Case Study: Malayer Plain of Iran)." *Civil Engineering Journal* 42(2):433-422.
- Kalhor, Koosha, Reza Ghasemizadeh, Ljiljana Rajic, and Akram Alshawabkeh. 2019. "Assessment of Groundwater Quality and Remediation in Karst Aquifers: A Review." *Groundwater for Sustainable Development* 8:104-21. doi: 10.1016/j.gsd.2018.10.004.
- KESDM. 2012. *Geologi*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KESDM. 2015a. *Litologi Akuifer*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KESDM. 2015b. *Produktivitas Akuifer*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KESDM. 2018. *Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK)*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Marfai, Muh Aris, Erik Febriarta, Bayu Argadyanto Prabawa, and Fredi Satya Candra Rosaji. 2019. *Rencana Pemenuhan Kuantitas Dan Kualitas Air Desa Bandangdaja, Tanjungbumi Bangkalan Madura*. Laporan Ak. Yogyakarta, Indonesia: Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WHO) dan Universitas Gadjah Mada.
- Murali, R. Mani, Ankita M., and Vethamony P. 2018. "A New Insight to Vulnerability of Central Odisha Coast, India Using Analytical Hierarchical Process (AHP) Based Approach." *Journal of Coastal Conservation* 22(4):799-819. doi: 10.1007/s11852-018-0610-4.
- Permen ESDM. 2012. *Peraturan Menteri ESDM No. 17 Tahun 2012 Tentang Penetapan Kawasan Bentang Karst*. Jakarta, Indonesia: Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.
- PermenESDM. 2017. *Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral No.2 Tahun 2017 Tentang Cekungan Air Tanah Di Indonesia*. Jakarta, Indonesia: Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.
- PermenKes. 2017. *Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Hygiene Sanitasi, Kolam Renang, Slous Per Aqua, Dan Pemandian Umum Nomor 32 Tahun 2017*. Jakarta, Indonesia: Peraturan Menteri Kesehatan (PermenKes).
- PSDA. 2018. *Nitrat/Nitrit (NO2)*. Jawa Tengah: Balai Pekerjaan Umum Sumber Daya Air (PSDA) dan Penataan Ruang Bodri Kuto Jawa Tengah.
- PUPR. 2016. *Penyusunan Rencana Induk Sistem Pelayanan*

- Air Minum (RI-SPAM) Kabupaten Maluku Tenggara Barat*. Maluku Tenggara Barat: Direktorat Jendral Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Purnama, Setyawan, and Ahmad Cahyadi. 2019. "Groundwater Vulnerability to Pollution in Kasihan District, Bantul Regency, Indonesia." *Forum Geografi* 33(2):140–52. doi: 10.23917/forgeo.v33i2.7672.
- Purnama, Setyawan, Tommy Ardian Tivianton, Achmad Cahyadi, and Erik Febriarta. 2019. "Kajian Daerah Imbuhan Airtanah Di Kabupaten Ngawi." *Kajian Daerah Imbuhan Airtanah Di Kabupaten Ngawi* 16(1):54–59. doi: 10.15294/jg.v16i1.18358.
- Putranto, Thomas Triadi. 2019. "Studi Kerentanan Airtanah Terhadap Pencemaran Dengan Menggunakan Metode Drastic Pada Cekungan Airtanah (CAT) Karanganyar-Boyolali, Provinsi Jawa Tengah." *Jurnal Ilmu Lingkungan* 17(1):159. doi: 10.14710/jil.17.1.159-171.
- Putranto, Thomas Triadi, and Thomas Rude. 2016. "Hydrogeological Model of an Urban City in a Coastal Area, Case Study: Semarang, Indonesia." *Indonesian Journal on Geoscience* 3(1). doi: 10.17014/ijog.3.1.17-27.
- Putranto, Thomas Triadi, Tri Winarno, and Axel Prima Agita Susanta. 2020. "Risk Assessment of Groundwater Abstraction Vulnerability Using Spatial Analysis: Case Study at Salatiga Groundwater Basin, Indonesia." *Indonesian Journal on Geoscience* 7(2). doi: 10.17014/ijog.7.2.215-224.
- Singhal, B. B. ..., and R. ... Gupta. 2010. *Applied Hydrogeology of Fracture Rock*. London: Springer Dordrecht Heidelberg London.
- Sisultan. 2017. *Peta Tanah Skala 1:50.000*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pertanian.
- Supandjono, J. B., K. Hasan, H. Panggabean, D. Satria, and Sukardi. 1992. *Peta Geologi Lembar Surabaya Dan Sapulu, Jawa*. Bandung, Indonesia: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geolog.
- Thapa, R., S. Gupta, S. Guin, and H. Kaur. 2018. "Sensitivity Analysis and Mapping the Potential Groundwater Vulnerability Zones in Birbhum District, India: A Comparative Approach between Vulnerability Models." *Water Science* 32:44–66.
- Thapa, Raju, Srimanta Gupta, Harjeet Kaur, and Raju Baski. 2019. "Assessment of Groundwater Quality Scenario in Respect of Fluoride and Nitrate Contamination in and around Gharbar Village, Jharkhand, India." *HydroResearch* 2:60–68. doi: 10.1016/j.hydres.2019.09.002.
- Todd, D. K., and L. W. Mays. 2005. *Groundwater Hydrology*. 3rd ed. Denver: John Wiley & Sons, Inc.
- Vías, J. M., B. Andreo, M. J. Perles, Fulvio Carrasco, Inaki Vadillo, and P. Jiménez. 2006. "Proposed Method for Groundwater Vulnerability Mapping in Carbonate (Karstic) Aquifers: The COP Method." *Hydrogeology Journal* 14(6):912–25. doi: 10.1007/s10040-006-0023-6.
- Voutchkova, Denitza D., Jörg Schullehner, Per Rasmussen, and Birgitte Hansen. 2021. "A High-Resolution Nitrate Vulnerability Assessment of Sandy Aquifers (DRASTIC-N)." *Journal of Environmental Management* 277:111330. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111330.
- Vrba, J., and A. Zaporozec. 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. Hannover: International Association of Hydrogeologist.
- Yang, Shuai, Wei-ya Ge, Hong-han Chen, and Wen-li Xu. 2019. "Investigation of Soil and Groundwater Environment in Urban Area during Post-Industrial Era: A Case Study of Brownfield in Zhenjiang, Jiangsu Province, China." *China Geology* 3(4):504–14. doi: 10.31035/cg2018128.