

# PENILAIAN KERENTANAN DAN RISIKO PENCEMARAN AIRTANAH DI WILAYAH KARST

Tri Rafika Diyah Indartin\*) dan M. Asyroful Mujib\*\*)

***Abstrak.** Air merupakan kebutuhan utama di kawasan karst, akuifer karst yang memiliki karakteristik hidrogeologi dan hidraulik yang berbeda dengan akuifer lain membuat kawasan ini miskin akan aliran permukaan namun disisi lain memiliki potensi airtanah yang cukup melimpah. Sistem drainase karst yang di dominasi oleh drainase bawah permukaan dimana air permukaan sebagian besar masuk ke jaringan sungai bawah tanah melalui ponor dan retakan menyebabkan airtanah di daerah karst sangat rentan terhadap pencemaran. Peningkatan berbagai aktivitas manusia di permukaan bumi akan menghasilkan limbah baik dalam bentuk padat maupun cair yang dapat dengan mudah masuk ke dalam sistem airtanah. Oleh sebab itu, penilaian tingkat kerentanan dan risiko pencemaran airtanah merupakan bagian penting dalam upaya pengelolaan sumberdaya airtanah di kawasan karst. Hasil dari penilaian tersebut yang disajikan sebagai informasi spasial dalam bentuk peta dapat dijadikan sebagai acuan dalam penyusunan rencana penggunaan lahan demi tercapainya keseimbangan antara upaya perlindungan kualitas airtanah dan kepentingan sosial ekonomi masyarakat.*

**Kata kunci :** Pencemaran, airtanah, karst

## PENDAHULUAN

Air merupakan sumberdaya alam yang penting untuk kelangsungan hidup manusia. Peningkatan jumlah penduduk dan pembangunan diberbagai bidang akan berdampak pada peningkatan jumlah kebutuhan air. Selain dari segi kuantitas, kualitas air juga merupakan hal penting dalam pemenuhan kebutuhan air. Kualitas air dipengaruhi oleh faktor alami fisik lingkungan dan faktor non alami. Faktor alami yang berpengaruh terhadap kualitas air adalah iklim, geologi, vegetasi, dan waktu. Sementara itu, faktor non alami

berkaitan dengan aktivitas manusia (Widyastuti, 2006).

Airtanah sama halnya seperti air permukaan juga tidak terlepas dari pencemaran. Leibundgut (1998) menyatakan bahwa khusus pada daerah karst, tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran relatif lebih tinggi dibandingkan dengan airtanah pada akuifer lain. Hal tersebut dikarenakan karakteristik hidrogeologi karst yang unik antara lain memiliki lapisan tanah yang tipis, konsentrasi aliran pada daerah epikarst (adanya rekahan secara intensif dan lapisan karst dari akuifer karbonat), dan resapan air melalui

\*) Mahasiswa S2 Geo-Informasi untuk Manajemen Bencana Sekolah Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

\*\*\*) Mahasiswa S2 Geografi Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada

ponor sehingga kontaminan dapat secara mudah mencapai airtanah dan tersebar secara cepat di dalam sistem karst mencapai jarak yang jauh (Goldscheider, 2005).

Sementara itu, di sisi lain karst merupakan sumber daya alam yang sangat potensial karena hampir sepanjang waktu dapat menyimpan air dalam jumlah yang melimpah sehingga memiliki peluang yang tinggi untuk dikembangkan sebagai sumber penyedia kebutuhan air manusia (Bakalowicz, 2005). Airtanah pada akuifer karst merupakan sumber air utama di beberapa negara. Sekitar 25% penduduk di dunia bergantung pada airtanah tersebut untuk memenuhi kebutuhan air minum, pertanian, dan industri (Goldscheider, 2005).

Dalam konteks pencemaran airtanah, penggunaan lahan di permukaan bumi dinyatakan sebagai lokasi pelepasan zat pencemar yang disebut dengan istilah bahaya (*hazard*). Secara umum, peningkatan kebutuhan terhadap lahan yang selanjutnya berakibat pada perubahan penggunaan lahan terjadi sebagai dampak dari adanya peningkatan jumlah penduduk. Menurut White (1988), sumber pencemar airtanah dibagi dalam empat kategori, antara lain (a) limbah domestik dan publik; (b) aktivitas

pertanian; (c) konstruksi dan pertambangan; (d) aktivitas industri.

Limbah yang berasal dari kawasan permukiman baik dalam bentuk padat maupun cair mencakup *septic tanks* dan tempat pembuangan sampah berpotensi menurunkan kualitas airtanah. Demikian juga dengan aktivitas pertanian secara intensif dengan menggunakan pupuk, insektisida, dan herbisida. Kegiatan konstruksi dan pertambangan akan menghasilkan limbah berkaitan dengan proses pemindahan material. Kegiatan eksploitasi batugamping melalui pembukaan lahan akan mengakibatkan perubahan tutupan lahan dan hilangnya lapisan tanah sebagai lapisan penyaring zat pencemar sebelum masuk ke dalam tanah melalui infiltrasi air hujan. Sementara itu, aktivitas industri yang pada umumnya menghasilkan limbah dalam jumlah yang relatif besar juga merupakan sumber polutan dalam pencemaran airtanah.

Mengacu pada kondisi tersebut, risiko pencemaran airtanah menjadi salah satu permasalahan di daerah karst yang penting untuk diperhatikan. Hal tersebut dapat dipahami sebagai dampak dari kondisi hidrogeologi alami karst yang unik yang menyebabkan airtanah di daerah karst menjadi mudah untuk tercemar dan juga adanya

kecenderungan peningkatan jumlah penduduk yang berpotensi mengakibatkan peningkatan jumlah zat pencemar. Penilaian dan pemetaan risiko pencemaran airtanah merupakan salah satu langkah tepat dalam usaha perlindungan kualitas airtanah. Hasil dari proses penilaian dan pemetaan tersebut dapat digunakan sebagai salah satu aspek pertimbangan dalam penyusunan rencana tata ruang wilayah demi keseimbangan antara tujuan perlindungan airtanah di satu sisi dan aspek kepentingan sosial ekonomi masyarakat di sisi lain.

### **AIRTANAH KARST**

Airtanah merupakan air yang terdapat pada wilayah yang jenuh di bawah permukaan tanah (Asdak, 2007). Dari keseluruhan air yang berada di bumi ini, lebih dari 96% merupakan airtanah (Seyhan, 1990). Jumlah airtanah yang sangat besar tersebut menjadikan airtanah memiliki peranan penting dalam sirkulasi air dan pemenuhan kebutuhan terhadap air.

Todd (1980) mendefinisikan airtanah sebagai air yang mengisi celah atau rongga antar batuan dan bersifat dinamis. Airtanah dapat ditemukan pada formasi geologi tembus air yang dikenal sebagai akuifer. Akuifer merupakan formasi pengikat air yang

memungkinkan jumlah air yang cukup besar untuk bergerak melaluinya pada kondisi lapangan yang biasa (Seyhan, 1990). Menurut Bakalowicz (2005), batuan karbonat yang merupakan batuan utama dalam pembentukan karst merupakan akuifer yang potensial karena dapat menyimpan air. Karst dapat dikatakan sebagai akuifer karena hampir sepanjang waktu mampu menyimpan airtanah yang dapat dimanfaatkan oleh manusia sebagai sumber/penyedia air.

Perdebatan mengenai karakteristik dan keberadaan airtanah di akuifer karst sudah berlangsung lama. Terjadinya silang pendapat mengenai ada tidaknya muka airtanah di karst lebih disebabkan oleh ketidaksepahaman mengenai konsep muka air tanah. Karakteristik muka airtanah di karst sangat berbeda dengan akuifer lain. Faktor yang sangat menentukan adalah adanya sifat akuifer karst yang cenderung anisotropis akibat dominasi pelarutan yang menghasilkan lorong-lorong conduit yang tidak beraturan (Haryono dan Adji, 2004).

Veni *et al.*, (2001) menyatakan bahwa permukaan air yang terdapat pada sistem aliran goa menunjukkan muka airtanah pada akuifer karst. Lapisan yang berada di atas muka airtanah tersebut disebut sebagai *vadose*

*zone* sedangkan lapisan yang berada di bawahnya disebut *phreatic zone*. Hal tersebut sesuai dengan pendapat yang dikemukakan oleh Haryono dan Adji (2004) yang menyatakan bahwa air pada sungai bawah tanah di daerah karst boleh disebut sebagai airtanah karena air tersebut mengisi percelahan yang banyak terdapat pada daerah karst.

## **KERENTANAN AIR TANAH TERHADAP PENCEMARAN**

Istilah kerentanan airtanah terhadap pencemaran (*groundwater vulnerability to contamination*) pertama kali diperkenalkan pada tahun 1968 oleh Margat yang mendefinisikan kerentanan airtanah sebagai kemungkinan difusi dan perkolasi zat pencemar dari permukaan tanah ke dalam muka airtanah pada kondisi alamiah (Vias *et al.*, 2006). Kerentanan airtanah dibedakan menjadi dua macam yaitu kerentanan intrinsik dan kerentanan spesifik (Vrba dan Zaporozec, 1994 dalam Goldscheider, 2005). European Commission melalui program COST 620 “*vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*” mendefinisikan kerentanan intrinsik sebagai kepekaan airtanah berdasarkan karakteristik geologi, hidrologi dan

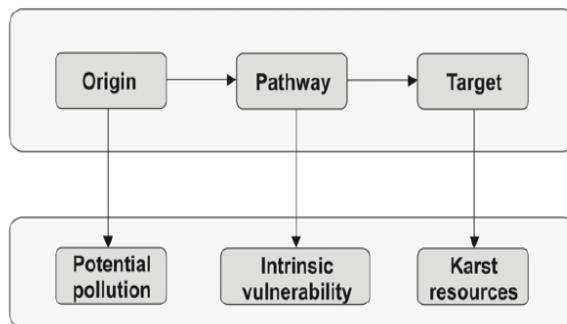
hidrogeologi dari suatu wilayah dan tidak bergantung pada karakteristik kontaminan, sedangkan kerentanan spesifik bergantung pada sifat-sifat kontaminan yang selanjutnya mempengaruhi kerentanan intrinsik suatu wilayah.

Leibundgut (1998) menyatakan bahwa kerentanan intrinsik airtanah bergantung pada karakteristik zona tanah, zona tidak jenuh dan zona jenuh. Kerentanan tersebut didasarkan pada asumsi bahwa kondisi fisik lingkungan memiliki potensi tertentu dalam memberikan perlindungan terhadap dampak yang timbul akibat proses alami dan aktivitas manusia. Sementara itu kerentanan spesifik diartikan sebagai tingkat kepekaan airtanah yang disebabkan oleh bahaya aktual yang berkaitan dengan kegiatan manusia seperti penggunaan lahan. Pengertian yang lebih khusus tentang kerentanan spesifik dikemukakan oleh Doerflinger *et al.*, (1999) yang menyatakan bahwa kerentanan spesifik ditentukan oleh sifat dan jenis kontaminan yang mungkin berbeda dari kontaminan yang satu dengan yang lain.

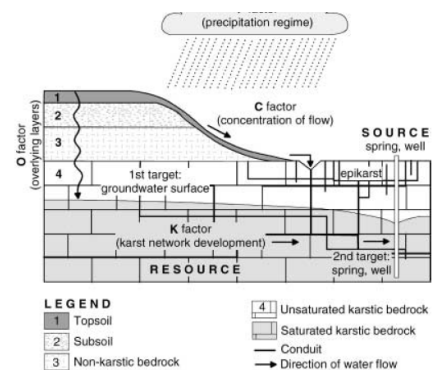
Konsep dasar dalam penilaian kerentanan airtanah pada akuifer karst didasarkan pada konsep *origin-pathway-target* model. Dalam konsep tersebut digambarkan bahwa terdapat 3

faktor yang mengontrol kerentanan airtanah yaitu sumber polutan, perjalanan polutan dan materi yang terkontaminasi yaitu airtanah. *Origin* merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan lokasi yang berpotensi melepaskan polutan yang pada umumnya berkaitan dengan

aktivitas manusia pada permukaan lahan. *Pathway* merupakan perjalanan polutan dari titik/lokasi pelepasan polutan menuju *target* yaitu zona penyimpan airtanah pada akuifer karst. Secara skematis konsep dalam pencemaran airtanah tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Sumber: Vlaicu dan Munteanu, 2008



Sumber: Daly *et al.*, 2002

Gambar 1 Konsep *origin-pathway-target model*

Akuifer karst merupakan akuifer yang rentan terhadap pencemaran. Karakteristik daerah karst yang berbeda dengan bentangalam lainnya yaitu tipisnya lapisan tanah, adanya konsentrasi aliran pada epikarst, infiltrasi yang cepat melalui retakan/celah batuan, ponor dan kenampakan lainnya yang khas pada daerah karst. Akibat karakteristik khas tersebut, polutan dapat secara mudah mencapai airtanah dan secara cepat menyebar ke keseluruhan area karst (Leibundgut, 1998; Doerflinger *et al.*, 1998; Vias *et al.*, 2006; Ravbar dan Goldscheider., 2009).

Bagian yang paling rentan pada daerah karst adalah area yang memiliki sistem masukan imbuhan air secara cepat yaitu sistem conduit. Bagian-bagian tersebut umumnya dicirikan dengan kenampakan dolin dan ponor, titik dimana sungai permukaan hilang ke bawah permukaan. Suatu telaga atau badan air terbuka yang memiliki rangkaian terhadap sistem karst juga mempunyai tingkat kerentanan yang tinggi terhadap pencemaran. Karakteristik tanah dan batuan pada lapisan atas di daerah karst memiliki peranan penting dalam proses perjalanan polutan menuju airtanah.

Semakin tebal lapisan tanah dan batuan dengan permeabilitas rendah, maka kemungkinan pencemaran yang mungkin terjadi pada airtanah akan semakin kecil.

### **PENILAIAN KERENTANAN AIRTANAH TERHADAP PENCEMARAN DI KARST**

Selama satu dekade terakhir ini, beberapa ahli mencoba mengembangkan metode untuk menilai tingkat kerentanan airtanah khusus pada daerah karst. Metode-metode tersebut antara lain metode EPIK, metode PI dan metode COP.

#### **a. Metode EPIK**

Metode EPIK merupakan metode yang pertama kali dikembangkan untuk penilaian kerentanan airtanah pada daerah karst di Switzerland dalam program Water Protection Ordinance. EPIK merupakan singkatan dari empat faktor yang berpengaruh terhadap kerentanan airtanah di daerah karst, yaitu; *Epikarst development*, *Protective Cover*, *Infiltration conditions*, dan *Karst network development*. Metode ini merupakan metode pembobotan dan perangkingan multiatribut melalui overlay dan pemberian index (Doerflinger et al., 1999; Vlaicu dan Munteanu, 2008; Polemio et al., 2009; Ravbar dan Goldscheider, 2009)

#### **b. Metode PI**

Metode PI merupakan metode yang dikembangkan sebagai proyek COST Action 620 pada tahun 2000 yang didanai oleh German Institutions. Metode ini pada dasarnya merupakan pengembangan metode EPIK. Metode PI merupakan akronim dari P (*Protective cover*) dan I (*Infiltration conditions*). Faktor P dapat diterapkan di semua sistem akifer sedangkan faktor I didasarkan pada karakteristik imbunan khusus pada daerah karst dan proses infiltrasi yang berlangsung.

Metode ini merupakan salah satu metode untuk mengukur kerentanan intrisik airtanah dimana kebutuhan data secara detail sangat diperlukan. Nilai kerentanan ditunjukkan dari hasil pengalihan faktor P dan faktor I. Semakin tinggi nilai tersebut maka semakin rendah tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran dan demikian sebaliknya. Hal ini dikarenakan nilai perkalian menunjukkan tingkat perlindungan secara alami oleh sistem karst terhadap pencemaran yang mungkin terjadi.

#### **c. Metode COP**

Metode COP merupakan metode yang didasarkan pada *Pan-European Approach* untuk menilai dan memetakan kerentanan intrinsik airtanah yang diajukan oleh COST

Action 620. Tingkat kerentanan diperoleh melalui penilaian dari tiga faktor yaitu concentration of flow (C), overlying faktor (O), dan precipitation (P). Faktor O merupakan faktor perlindungan yang secara alami diberikan oleh kondisi hidrogeologi di daerah karst dengan memperhatikan parameter kondisi tanah dan batuan sebagai lapisan atas. Faktor C dan P merupakan faktor yang memberikan efek penurunan terhadap perlindungan alami tersebut. Faktor C merujuk pada kondisi permukaan yang mengontrol aliran air masuk ke dalam tanah berdasarkan kenampakan khusus daerah karst yaitu adanya sistem saluran dan difusi. Sementara itu, faktor P berkaitan dengan kemampuan air mengangkut polutan ke dalam sistem aliran karst.

Sama halnya dengan metode-metode sebelumnya, metode ini juga merupakan metode dengan sistem pembobotan, penjumlahan, pengalihan dan pengekelasan masing-masing parameter penentu kerentanan intrinsik airtanah hingga dihasilkan nilai COP yang menunjukkan tingkat kerentanan airtanah tersebut.

Berbagai penelitian dengan menerapkan metode-metode tersebut di atas telah banyak dilakukan di berbagai lokasi khususnya di Eropa. Penelitian dengan tujuan membandingkan

ketepatan dan kebenaran metode-metode tersebut juga telah dilakukan (Andreo et al., 2006; Vias et al., 2006; Polemio et al., 2009; Ravbar dan Goldscheider, 2009). Untuk penelitian kerentanan airtanah kawasan karst yang berada di negara berkembang beriklim tropis telah dilakukan oleh Nguyet (2006) yang berlokasi di NW Vietnam dengan menggunakan metode COP.

## **BAHAYA PENCEMARAN AIRTANAH**

Dalam konteks pencemaran airtanah, bahaya (*hazard*) didefinisikan sebagai sumber yang berpotensi menimbulkan pencemaran yang dihasilkan dari aktivitas manusia yang secara utama dilakukan pada permukaan lahan (Zwahlen, 2004). Oleh karena itu, inventarisasi bahaya pencemaran airtanah dimulai dari proses identifikasi jenis penggunaan lahan yang secara umum diklasifikasikan dalam tiga kelompok yaitu infrastruktur/kawasan terbangun, industrial dan agrikultural.

Pencemaran airtanah merupakan kejadian yang umum terjadi di akuifer karst pada daerah terbangun dengan kepadatan penduduk yang tinggi (Veni et al, 2001). Sumber pencemar tersebut berasal dari *septic tank*, limpasan air



yang membawa logam, oli, minyak, limbah dan sampah padat, serta buangan limbah kimia oleh aktivitas industri dan rumah tangga. Sementara itu, pada daerah pedesaan dimana pemanfaatan lahan utama adalah lahan pertanian intensif, maka sumber pencemar berasal dari pupuk kimia, pestisida, dan herbisida. Kuantitas dari berbagai sumber pencemar tersebut mengikuti periode musim. Sumber pencemar lain seperti mikroorganisme dari limbah peternakan dan timbunan pupuk kandang dapat juga masuk ke dalam airtanah melalui resapan air.

Berdasarkan berbagai kondisi tersebut maka dapat disimpulkan bahwa pencemaran airtanah merupakan salah satu bentuk ancaman (*hazard*) terhadap lingkungan yang terjadi akibat ulah atau campur tangan manusia. Hal tersebut sesuai dengan penggolongan bencana oleh International Council for Science (Mulugeta et al, 2007), bahwa pencemaran air dikategorikan sebagai salah satu bentuk bencana yang terjadi akibat ancaman yang diberikan oleh manusia (*Human-induced Hazards*). Ancaman tersebut akan menjadi bencana apabila terjadi interaksi dengan manusia sehingga menimbulkan gangguan pada kehidupan manusia.

## **RISIKO PENCEMARAN AIRTANAH**

Peraturan Pemerintah No.20 Tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air mendefinisikan bahwa pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya. Sementara itu, definisi lebih spesifik tentang pencemaran airtanah (*groundwater contamination*) yaitu masuknya suatu substansi pada konsentrasi yang tidak diinginkan yang secara tidak normal terdapat dalam air seperti mikroorganisme, zat kimia, limbah/kotoran yang menjadikan air tidak berfungsi sesuai dengan kegunaan yang diharapkan (Zaporozec, 2004).

Risiko pencemaran airtanah didefinisikan sebagai kemungkinan pencemaran akibat adanya kejadian yang berbahaya. Berdasarkan konsep *origin-pathway-target model*, risiko pencemaran airtanah bergantung pada 3 faktor yaitu:

- a. *Hazard*, berasal dari aktivitas manusia di permukaan bumi yang berpotensi sebagai sumber pencemar bagi airtanah (*origin*)



- b. *Intrinsic Vulnerability*, menunjukkan kemudahan airtanah untuk mengalami pencemaran berdasarkan kondisi hidrogeologi daerah tertentu (*pathway*)
- c. Konsekuensi yang mungkin terjadi akibat kejadian pencemaran dimana airtanah menjadi *target*

Berdasarkan hal tersebut, COST Action 620 merumuskan suatu persamaan matematis untuk melakukan penilaian risiko pencemaran airtanah seperti berikut:

$$R = 1/HI \cdot V$$

R = *Risk Index*

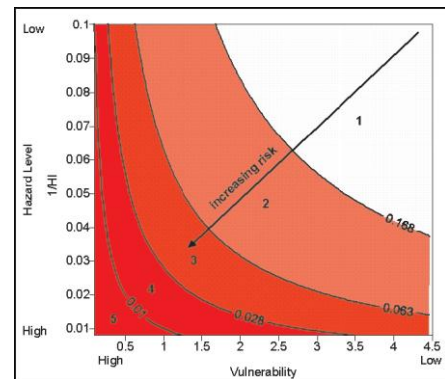
HI = *Hazard Index*

V = *Intrinsic Vulnerability index*

Rumus diatas menunjukkan intensitas risiko (*risk intensity*) pencemaran airtanah. Pada indeks kerentanan intrinsik (V), semakin besar nilainya maka kerentanan semakin rendah dan demikian sebaliknya. Sementara itu, dalam indeks bahaya (HI), semakin besar nilai maka semakin besar bahaya yang diberikan. Oleh karena itu, untuk menghindari kesalahan dalam penilaian/pemaknaan tingkat risiko, maka angka 1 digunakan sebagai pembagi terhadap HI.

Pada dasarnya, konsep penilaian risiko tersebut didasarkan pada kombinasi (hubungan) antara indeks

bahaya dengan indeks kerentanan intrinsik airtanah terhadap pencemaran. Berdasarkan hal tersebut, maka penilaian risiko pencemaran airtanah juga dapat dilakukan dengan metode matrik.



Gambar 2 Skema Hubungan antara HI dan V dalam Risiko Pencemaran

## PERANAN PENGINDERAAN JAUH DAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS

Penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan teknologi yang saat ini tidak bisa dilepaskan dalam kegiatan survei, pemetaan, dan pemodelan untuk pengelolaan lingkungan, sumberdaya dan wilayah (Danoedoro, 2012). Menurut Weng (2010) penginderaan jauh merupakan rangkaian aktivitas merekam, mengobservasi dan mengenali objek-objek atau kejadian-kejadian dari jarak yang jauh. Sementara itu, Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan suatu

sistem untuk memasukkan, mengumpulkan, memanipulasi dan menghasilkan data yang terreferensi secara geografis (Goodchild, 1996 dalam Zwahlen, 2004).

Dalam konteks pencemaran airtanah, data yang diperoleh dari penginderaan jauh memiliki peranan yang penting sebagai sumber data dalam upaya penilaian dan pemetaan kerentanan intrinsik airtanah, bahaya, dan risiko pencemaran. Tingkat akurasi informasi yang dapat diperoleh dari data penginderaan jauh sangat bergantung pada resolusi spasial data tersebut. Penggunaan citra resolusi tinggi dapat menghasilkan informasi yang akurat mengenai lokasi, sebaran, batas, ukuran dan jenis masing-masing penggunaan lahan sehingga dapat dengan mudah dilakukan pemetaan sebaran sumber pencemar airtanah.

Kemampuan SIG dalam menyediakan/ menyajikan informasi secara spasial dari data geografis maupun data atribut (non spasial) menjadikan SIG sebagai alat yang sangat membantu dalam berbagai penelitian geografis. SIG memiliki kelebihan dalam mengintegrasikan dan menganalisis data dari berbagai sumber seperti penginderaan jauh, peta tematik, pengukuran lapangan (survei tanah, batuan dan hasil uji sampel) dan data

sensus. Berbagai data yang diperoleh dari berbagai sumber tersebut dapat diproses, dipetakan, dianalisis dan disajikan sebagai informasi spasial sesuai dengan skala yang diinginkan melalui SIG. Namun perlu disadari bahwa selain memiliki beberapa kelebihan yang mempermudah proses pengolahan dan penyajian data spasial, SIG juga memiliki beberapa kelemahan. Gogu (2000) dalam Zwahlen (2004) menyatakan bahwa kesalahan-kesalahan data dalam SIG berasal dari kesalahan dalam proses pengukuran, interpolasi dan estimasi data, pemodelan secara spasial dan temporal, dan kesalahan dalam pengisian data. Berbagai kelemahan tersebut menunjukkan bahwa bukan hal yang mudah untuk merepresentasikan dunia nyata dalam bentuk peta.

## **PENUTUP**

Airtanah pada kawasan karst memiliki kepekaan terhadap pencemaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan airtanah pada kawasan non-karst. Hal tersebut dapat dipahami sebagai dampak dari karakteristik hidrologi dan hidrogeologi karst yang unik, seperti lapisan tanah yang tipis dan adanya sistem aliran yang cepat melalui ponor ataupun celah. Kondisi tersebut menyebabkan aliran

permukaan yang kemungkinan membawa zat pencemar baik dalam bentuk limbah padat maupun cair dapat secara cepat menuju sistem akuifer dan menimbulkan pencemaran airtanah.

Penilaian kerentanan dan risiko pencemaran airtanah merupakan salah satu alternatif dalam upaya melindungi kualitas airtanah. Penilaian kerentanan airtanah akan memberikan informasi tentang lokasi mana yang secara alamiah memiliki tingkat kepekaan tinggi terhadap perubahan dan aktivitas manusia di permukaan bumi. Penggunaan data penginderaan jauh sangat bermanfaat dalam identifikasi sebaran sumber pencemar yang dilakukan melalui interpretasi penggunaan lahan yang terdapat pada lokasi tertentu. Selanjutnya, dengan melakukan proses pembobotan, penilaian, dan pemetaan dengan menggunakan aplikasi SIG maka akan diperoleh informasi tentang lokasi mana yang memiliki kemungkinan pencemaran paling tinggi. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penilaian dan pemetaan tersebut maka dapat dilakukan tindakan-tindakan pencegahan seperti penyusunan rencana tata ruang yang tepat oleh pemerintah daerah dan peningkatan pemahaman dan kesadaran masyarakat karst dalam usaha menjaga keberlanjutan ekosistem

karst sehingga mereka dapat menyesuaikan diri terhadap karakteristik lingkungan tempat hidup mereka.

## DAFTAR PUSTAKA

- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Vias, J.M., Neukum, C., Sinreich, M., Jimenez, P., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hotzl, H., Perles, M.J., Zwahlen, F., 2006, "Karst Groundwater Protection: First Application of a Pan-European Approach to Vulnerability, Hazard, and Risk Mapping in The Sierra de Libar (Southern Spain)", *Science of the Total Environment* 357, Hal. 54-73, Elsevier B.V
- Asdak, C., 2007, *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Bakalowicz, M., 2005, "Karst Groundwater: A Challenge for New Resources", *Hydrogeology Journal* (2005) 13, Hal 148-160, Verlag: Springer
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C., Zwahlen, F., 2002, "Main concepts of "European Approach" to Karst-Groundwater-Vulnerability Assessment and Mapping". *Hydrogeology*

- Journal* (2002) 10, Hal 340-345,  
Verlag: Springer
- Danoedoro, P., 2012, *Pengantar Pengideraan Jauh Digital*, Yogyakarta: C.V Andi Offset
- Doerflinger, N., Jeannin, P.Y., dan Zwahlen, F., 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, issue 2, Hal. 165-176
- Ducci, D., 2007, Intrinsic Vulnerability of The Alburni Karst System (Southern Italy), dalam *Natural and Antropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation*, diedit oleh Parise, M., dan Gunn, J., London: The Geological Society, Hal.137-151
- Ford, D., dan Williams, P., 2007, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, England: John Willey and Sons Ltd
- Goldscheider, N., 2005, "Karst Groundwater Vulnerability Mapping: Application of a New Method in the Swabian Alb, Germany", *Hydrogeology Journal* 13, issue 4, Hal. 555-564
- Haryono, E., dan Adj, T.N., 2004, *Geomorfologi dan Hidrologi Karst* (Bahan Ajar), Universitas Gadjah Mada
- Leibundgut, C., 1998, "Vulnerability of Karst Aquifers", *Karst Hydrology*, No.247
- Mulugeta, G., Ayonghea, S., Daby, D., Dube, O.P., Gudyanga, F., Lucio, F., Durrheim, R., 2007. ICSU Regional Office for Africa, 2007, *Natural and Human-induced Hazard and Disasters in sub-Saharan Africa*, ICSU (International Council for Science) Regional Office for Africa.
- Nguyet, V.T.M., 2006, Hydrogeological Characterisation and Groundwater Protection of Tropical Mountainous Karst Areas in NW Vietnam, Dissertation: Vrije Universiteit Brussel.
- Nguyet, V.T.M., dan Goldscheider N., 2006, "A Simplified Methodology for Mapping Groundwater Vulnerability and Contamination Risk, and Its First Application in Tropical Karst Area, Vietnam", *Hydrogeology Journal*, 1, Hal. 1-10
- Palemio, M., Casarano, D., Limoni, P.P., 2009, "Karstic Aquifer Vulnerability Assessment Methods and Results at a Test Site (Apulia, Southern Italy)", *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, Hal. 1461-1470

- Peraturan Pemerintah No.20 Tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air
- Ravbar, N., dan Goldscheider, N., 2009, "Comparative Application of Four Methods of Grondwater Vulnerability mapping in a Slovene Karst Catchment", *Hydrogeology Journal* 17, issue 3, Hal.725-73
- Seyhan, E., 1990, *Dasar-Dasar Hidrologi*, Terjemahan, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Todd, D.K., 1980, *Groundwater Hydrology*, New York: John Wiley and Sons
- Veni, G., DuChene, H., Crawford, N.C., Groves, C.G., Huppert, G.N., Kastning, E.H., Olson, R., Wheeler, B.J., 2001, *Living With Karst: A Fragile Foundation*, Alexandria: American Geological Institute
- Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jimenez, P., 2006, "Proposed Method for Grondwater Vulnerability Mapping in carbonate (Karstic) Aquifer: The COP Method", *Hydrogeology Journal*, 14, Hal. 912-925, Verlag: Springer
- Vlaicu, M., Munteanu, C.M., 2008, "Karst Groundwater Vulnerability Assessment Methods", Institute of Speleology, Hal.107-118
- Weng, Q., 2010, *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Application*, United States of America: The McGraw-Hill Companies
- Widyastuti, M., 2006, "Pencemaran Airtanah di Daerah Karst", *Gunung Sewu Indonesian Cave and Karst Journal*, Vol 2 No.2 November 2006, Hal.113-124
- Zaporozec, A., 2004, *Groundwater Contamination Inventory: A Methodological Guide with a Model Legend for Groundwater Contamination Inventory and Risk Maps*, Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
- Zwahlen, F., 2004, *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*, Final Report (COST Action 620) European Commission Directorate-General for Research and Innovation, Luxembourg: European Communities