

**KERENTANAN AIRTANAH TERHADAP PENCEMARAN DAERAH  
IMBUHAN PONOR DI KARST GUNUNG SEWU (STUDI DI DAERAH  
ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH BRIBIN)<sup>1</sup>**

*(Ground Water Vulnerability to Contamination of Swallow Holes Recharge Area at  
Gunung Sewu Karst (Study in Bribin Underground River Catchment Area)*

**M. Widyastuti\*, Sudarmadji\*, Sutikno\*, dan Heru Hendrayana\*\***

\* Fakultas Geografi UGM Jurusan Geografi Lingkungan

\*\* Fakultas Teknik UGM Jurusan Teknik Geologi

Diterima: 1 Mei 2012

Disetujui: 27 Juni 2012

**Abstrak**

Airtanah karst merupakan salah satu sumberdaya alam yang potensial di kawasan karst Gunung Sewu. Di sisi lain, akuifer karst sangat rentan terhadap pencemaran. Sungai Bawah Tanah Bribin menjadi sumber air utama untuk masyarakat khususnya untuk mendukung kebutuhan air di musim kemarau. Tujuan penelitian ini adalah: 1) mengetahui karakteristik daerah imbuhan ponor melalui identifikasi variabel kerentanan (kondisi ponor, lereng, vegetasi, tanah dan batuan); dan 2) mengetahui tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode COP. Ponor, gua, dan dolin diidentifikasi melalui sensus, sedangkan pengambilan sampel tanah secara purposive berdasarkan unit seri tanah. Proses pengolahan data mendasarkan metode COP, yang merupakan akronim C (*concentration of flow*/konsentrasi aliran), O (*overlying layer*/lapisan pelindung) and P (*precipitation*/curah hujan). Setiap variabel dan sub variabel mempunyai nilai di setiap kelas dan dihitung melalui operasi perkalian dan penjumlahan. Hasil menunjukkan bahwa karakteristik daerah imbuhan ponor bervariasi menurut aspek jumlah, ukuran, lokasi dan kondisi ponor; lereng dan vegetasi, jenis tanah dan batuan serta ketebalannya. Tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran sebagian besar sangat rentan. Faktor yang mempunyai pengaruh besar adalah konsentrasi aliran. Jumlah ponor sebagai imbuhan terkonsentrasi (titik) dari aliran permukaan menyebabkan sangat rentan.

Kata kunci: daerah imbuhan ponor, kerentanan airtanah, pencemaran, metode COP

**Abstrack**

*Karst groundwater is one of the potential natural resources in the Gunung Sewu karst area. On the other hand, karst aquifers are highly vulnerable to contamination. Bribin underground river become the main water source for the community, especially to support the water demand in the dry season. The purposes of this study are: 1) to know the characteristics of the swallow holes recharge area through identifying vulnerability variables (swallow hole condition, slope, vegetation, soil and rock), and 2) to assess the level of groundwater vulnerability to contamination which is assessed by COP method. Swallow holes, caves and doline are identified by census, while soil sampling are done by purposive sampling using soil series unit. The data processing method based on COP, which is an acronym of C (concentration of flow), O (overlying layer) and P (precipitation). Each variable and sub-variables have value at each class, and then performed with the operation of multiplication and addition. The results showed that characteristics of swallow holes recharge area varies from aspects of the number, demension, location, and condition of swallow holes, slope and vegetation, soil and rock thickness. The level of groundwater vulnerability to contamination in the research area is mostly very high vulnerable. The factor that has a large contribution is the variable of flow concentration. Number of swallow holes as a point recharge of surface flow that makes very vulnerable.*

*Keywords: swallow holes recharge area, groundwater vulnerability, contamination, COP method*

<sup>1)</sup> Sebagian artikel ini merupakan makalah pendukung Seminar Nasional dalam Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) Ikatan Geografiwan Indonesia (IGI), Universitas Negeri Surabaya, 11-12 Desember 2010, Surabaya.

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Karst menurut Ford dan Williams (1989) adalah medan dengan karakteristik hidrologi dan bentuk lahan yang diakibatkan oleh kombinasi dari batuan mudah larut dan mempunyai porositas sekunder yang berkembang baik. Beberapa hal yang mencirikan karst adalah: terdapatnya cekungan-cekungan tertutup dan atau lembah kering dengan berbagai ukuran dan bentuk, tidak terdapatnya atau langkanya drainase atau sungai permukaan, dan terdapatnya gua dari sistem drainase bawah tanah (White, 1988; Sumnerfield, 1991).

Akuifer karst mempunyai karakteristik kompleks dan alami yang membuat berbeda dengan akuifer yang lain, yaitu: heterogenitas yang tinggi sebagai akibat dari terbentuknya sistem aliran airtanah, saluran yang besar, kecepatan aliran yang tinggi mencapai ratusan m/jam, tingkat aliran yang tinggi dari mataair hingga puluhan m<sup>3</sup>/detik (Bakalowicz, 2005). Airtanah karst juga merupakan sumberdaya yang potensial. Kawasan Karst Gunung Sewu Kabupaten Gunungkidul sebenarnya mempunyai potensi airtanah untuk mendukung suplai air pada musim kemarau, permasalahannya terletak pada akses airtanah tersebut karena kedalamannya bervariasi yaitu antara 50-100 m di bawah permukaan tanah (McDonald & Partners, 1984). Untuk mengatasi hal tersebut, Pemerintah Daerah setempat telah melakukan upaya pemompaan sungai bawah tanah Bribin, Seropan, Baron, dan Ngobaran (merupakan satu sistem Bribin-Baron) serta pembangunan jaringan distribusi.

Di sisi lain, akuifer karst sangat rentan terhadap pencemaran. Hal tersebut disebabkan oleh tipisnya lapisan tanah, konsentrasi aliran terdapat pada daerah epikarst (terjadi rekahan secara intensif dan lapisan karst dari akuifer karbonat), serta resapan air melalui ponor sehingga kontaminan dapat secara mudah mencapai airtanah dan tersebar secara cepat di dalam saluran karst (*karst conduit*) mencapai jarak yang jauh (Goldscheider, 2005). Sungai Bawah Tanah (SBT) Bribin

mempunyai potensi yang besar sebagai sumberdaya air baku, dan saat ini telah dimanfaatkan dan dikembangkan untuk mendukung penyediaan air. Selain itu penggunaan lahan di atasnya mempunyai potensi tinggi sebagai sumber pencemar, meskipun saat ini masih tergolong alami, antara lain: permukiman dengan sistem sanitasinya dan pertanian. Oleh karena itu penting sekali untuk melindungi SBT Bribin untuk keberlanjutan fungsi baik secara kuantitas maupun kualitas melalui pengelolaan yang baik dan perlindungan terhadap pencemaran. Salah satu langkah penting untuk perlindungan airtanah karst adalah melakukan zonasi kerentanan airtanah terhadap pencemaran.

Daly *et al.* (2002) membagi kerentanan menjadi dua, yaitu intrinsik dan spesifik. Kerentanan intrinsik (*intrinsic vulnerability*) didasarkan pada karakteristik hidrogeologi suatu wilayah, tetapi tidak tergantung pada pencemar alami maupun pencemar buatan. Kerentanan spesifik (*specific vulnerability*) didasarkan pada karakteristik unsur dan kelompok unsur pencemar dan keterkaitannya dengan sistem hidrogeologi. Konsep kerentanan airtanah didasarkan pada *origin - pathway - target model* (Goldscheider, 2002). *Origin* diasumsikan sebagai tempat dilepaskannya kontaminan, *pathway* merupakan alur aliran kontaminan potensial dari tempat dilepaskan hingga ke titik atau tempat yang harus dilindungi, dan target adalah air yang harus dilindungi (*resources - akuifer, sources - sumur/mataair*). Ada empat faktor yang dipertimbangkan, meliputi: *overlying layer* (O), *concentration of flow* (C), *precipitation regime* (P) dan *karst network development* (K) (Drew, 2003). Faktor O, C dan K mencerminkan karakteristik internal sistem karst; sedangkan P adalah faktor eksternal. Untuk pemetaan kerentanan akuifer, maka faktor O, C dan P harus dipertimbangkan; sedangkan untuk pemetaan kerentanan sumur dan mataair maka faktor K harus ditambahkan. Alur aliran untuk perlindungan akuifer terdiri dari sebagian besar bagian vertikal yaitu lapisan pelindung (*protective cover*) dan untuk perlindungan sumur/mataair juga meliputi aliran horisontal di akuifer.

COP merupakan salah satu metode yang dikembangkan untuk kajian kerentanan intrinsik akuifer karst (karbonat). Metode ini hasil pengembangan metode sebelumnya yaitu EPIK (Doerfliger dan Zwahlen, 1998) dan PI (Goldscheider, 2002). Ada tiga variabel yang digunakan dalam metode tersebut, yaitu : *concentration of flow*, *overlying layer* dan *precipitation*. Metode ini dirancang fleksibel dan dapat diterapkan untuk wilayah yang mempunyai iklim berbeda. Oleh karena itu metode ini dicoba untuk diaplikasikan di daerah karst Gunung Sewu yang tipologi karst yang berbeda. Dengan demikian dapat diketahui hambatan atau kelayakan dalam penerapan metode ini dan ke depan memberikan peluang bagi pengembangan metode COP yang sesuai dengan kondisi daerah penelitian.

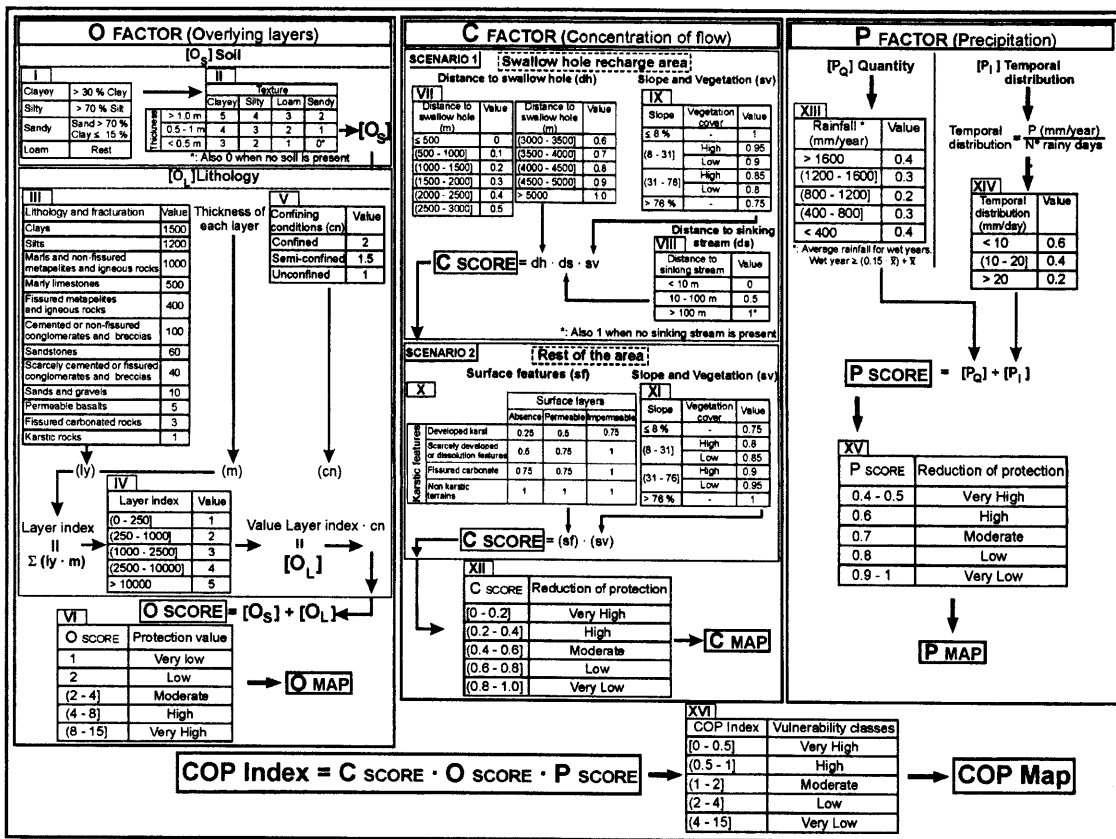
**Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui karakteristik daerah imbuhan ponor daerah penelitian melalui identifikasi variabel kerentanan (kondisi ponor, lereng, vegetasi, tanah dan batuan);
2. Mengetahui kerentanan airtanah terhadap pencemaran yang dinilai dengan metode COP.

**METODE PENELITIAN**

**Materi Penelitian**

Populasi yang menjadi objek dalam penelitian ini adalah ponor, gua, dolin, tanah dan batuan untuk karakterisasi daerah imbuhan ponor dan penentuan kerentanan. Identifikasi ponor, gua, dolin dilakukan secara sensus, sedangkan sampel tanah diambil berdasarkan unit seri tanah untuk penentuan tekstur dan ketebalan. Pengamatan bantuan secara sampling pada singkapan batuan sebagai cek



Gambar 1. Diagram Metode Cop (Zwahlen, 2003)

lapangan dari data sekunder yang sudah ada.

Bahan utama dalam penelitian ini adalah sampel tanah. Selain itu beberapa peta tematik untuk mendukung penelitian ini adalah Peta Rupa Bumi skala 1 : 25.000, Foto Udara Pankromatik skala 1 : 30.000, Citra Aster, Peta Geomorfologi skala 1 : 50.000, Peta Geologi skala 1 : 100.000, Peta Hidrogeologi 1 : 250.000, Peta Penggunaan Lahan skala 1 : 25.000, Peta Tanah Semi Detail Skala 1 : 50.000.

Jenis data dalam penelitian ini mencakup data geomorfologi, geologi dan hidrologi. Data tersebut terinci dalam variabel penelitian yang meliputi: faktor C (*concentration of flow*), O (*overlying layer*), dan P (*precipitation*). Variabel yang diukur untuk faktor C (*concentration of flow*) meliputi: ponor, gua, dolin, daerah imbuhan ponor, jarak terhadap ponor dan sungai tenggelam, lereng, vegetasi, dan morfologi. Faktor O (*overlying layer*) meliputi: jenis dan ketebalan batuan, tekstur dan ketebalan tanah. Faktor P (*precipitation*) meliputi: tebal dan intensitas hujan.

### Cara Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan lapangan dan perangkat keras maupun perangkat lunak untuk analisis kerentanan. Beberapa peralatan lapangan untuk melakukan pengukuran beberapa parameter, seperti: GPS, *laser distance*, kompas geologi, palu geologi, pita meter, bor tangan, *Mini Station Data Logger*, *Automatic Rainfall Recorder* (ARR), kamera, perangkat keras berupa seperangkat perangkat keras (CPU, komputer, printer, monitor); sedangkan perangkat lunak untuk pemetaan adalah *ArcView*.

Perolehan data dilakukan secara langsung melalui pengukuran lapangan (data primer) dan melalui survei instansional (data sekunder). Data primer meliputi: daerah tangkapan ponor dan sungai tenggelam (jarak terhadap ponor, jarak terhadap sungai tenggelam), distribusi ponor, kenampakan permukaan/morfologi, lereng, vegetasi penutup, tanah (distribusi ukuran butir dan ketebalan), batuan (jenis, struktur dan ketebalan lapisan),

tebal dan intensitas hujan. Data sekunder berupa data penelusuran gua, data bor, peta-peta tematik dan hasil penelitian sebelumnya yang terkait.

Pengolahan dan analisis data untuk karakteristik daerah imbuhan ponor dilakukan secara deskriptif kuantitatif yang didasarkan pada klasifikasi COP dan menggunakan peta yang diproses menggunakan aplikasi SIG (Sistem Informasi Geografis) sehingga secara spasial dapat tergambarkan dengan jelas. Penilaian kerentanan menggunakan metode COP yang diproses menggunakan *software ArcView*. COP merupakan akronim dari faktor C (*concentration of flow*), O (*overlying layer*) dan P (*precipitation*) (Vias *et al.*, 2006). Secara lebih lengkap proses penilaian metode COP disajikan dalam Gambar 1.

Analisis C (*concentration of flow*), terdapat dua skenario: 1) daerah imbuhan ponor dan 2) daerah selain imbuhan ponor (*rest of the area*). Skenario 1, variabel yang dikaji meliputi jarak terhadap ponor, lereng dan vegetasi, serta jarak ke sungai tenggelam. Skenario 2, variabel yang dikaji meliputi kenampakan khas permukaan, lereng dan vegetasi. Masing-masing variabel mempunyai kelas interval dan nilai. Nilai C diperoleh dari hasil perkalian masing-masing variabel pengaruh. O (*overlying layer*) dibagi menjadi 2 sub parameter yaitu tanah ( $O_s$ ) dan batuan ( $O_l$ ). Variabel tanah ( $O_s$ ) yang dikaji meliputi tekstur dan ketebalan tanah. Berdasarkan tabulasi silang antara ketebalan dan tekstur tanah akan diperoleh nilai untuk sub parameter  $O_s$ . Variabel batuan ( $O_l$ ) yang dikaji meliputi jenis batuan dan ketebalan lapisan batuan, serta kondisi kekedapan (*confining condition*). Setiap jenis batuan mempunyai nilai, sesuai tingkat kemudahan dilalui air. Perkalian setiap nilai jenis batuan dengan ketebalan perlapisan masing-masing jenis batuan tersebut menghasilkan indeks perlapisan (*layer index*). Kelas interval dari indeks perlapisan ini mempunyai nilai, dan nilai indeks perlapisan dikalikan dengan kondisi kekedapan akan menghasilkan nilai untuk sub parameter  $O_l$ . Nilai O merupakan penjumlahan dari nilai  $O_s$  dan  $O_l$ , dikelaskan dan

memberikan tingkatan nilai perlindungan. **P** (*precipitation*) mencakup jumlah ( $P_0$ ) dan intensitas ( $P_1$ ). Penjumlahan antara nilai  $P_0$  dan  $P_1$  menghasilkan nilai  $P$ . Ketiga faktor tersebut merupakan penyusun Indeks COP melalui operasi perkalian, yang mencerminkan kelas kerentanan airtanah terhadap pencemaran.

## HASIL PENELITIAN

### Daerah Penelitian

Lokasi penelitian adalah daerah karst Gunung Sewu yang dapat mencerminkan kondisi karst daerah tropis, dan Daerah Aliran Sungai Bawah Tanah Bribin sebagai daerah kajian. DAS Bribin secara administratif meliputi 5 wilayah bagian kecamatan, yaitu : Kecamatan Ponjong, Semanu, dan Rongkop (Kabupaten Gunungkidul Provinsi DIY), serta Kecamatan Eromoko dan Pracimantoro (Kabupaten Wonogiri Provinsi Jawa Tengah). Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, batas DAS relatif sudah dapat diidentifikasi meskipun belum secara tepat dapat dipastikan (batas sisi Timur didasarkan pada topografi permukaan melalui interpretasi foto udara). Daerah penelitian memiliki luas 17.169,22 Ha, secara geografis terletak di antara 463069 – 478786 mT dan 9105306 – 9126660 mU.

### Kondisi Ponor, Gua dan Telaga (Dolin)

Pada dasarnya ponor, gua, dolin merupakan satu kesatuan yang tidak terpisahkan. Dolin pada berbagai literatur tentang karst sering disebut *sinkhole*, *sink*, *swallow holes*, *cenote* dan *blue hole* (Haryono dan Adji, 2004). Doline merupakan cekungan tertutup berbentuk bulat atau lonjong dengan ukuran beberapa meter hingga lebih kurang 1 km (Ford dan Williams, 1989). Setiap dolin atau cekungan tertutup tersusun oleh tiga komponen (White, 1988), yaitu: pengatus, mintakat yang berubah oleh proses pelarutan, dan tanah penutup ataupun endapan/sedimen. Gua menurut Ford dan Williams (1989) adalah bukaan batuan alami bawah permukaan yang cukup luas untuk dimasuki manusia. White (1988) mendefinisikan gua sebagai rongga yang tersisa setelah posi

batuan karbonat berpindah akibat proses pelarutan di dalam sirkulasi airtanah.

Berdasarkan hasil survei lapangan dapat diketahui bahwa kondisi ponor, gua dan telaga di daerah penelitian sangat beragam. Hasil survei menunjukkan bahwa distribusi ponor/gua/dolin di daerah penelitian terdapat 349 lokasi. Di Kecamatan Ponjong terdapat 74 ponor, 14 gua dan 40 telaga (dolin), di Kecamatan Semanu terdapat 19 ponor, 7 gua dan 14 telaga (dolin), di Kecamatan Rongkop terdapat 26 ponor, 2 gua dan 19 telaga, di Kecamatan Eromoko terdapat 71 ponor, 14 gua dan 14 telaga, sedangkan di Pracimantoro terdapat 19 ponor, dan 1 telaga.

### Ponor (*swallow hole*)

Ponor yang dijumpai di lapangan kondisinya bervariasi yang dapat dirangkum dalam beberapa kategori menurut ukuran lebar, dan kedalaman sebagai berikut. Dimensi ponor dengan ukuran lebar: < 1 m, 1 – 5 m, > 5 m, dan kedalaman: < 10 m, 10 – 100 m, > 100 m. Ponor sebagai pengatus dolin yang menghubungkan ke sistem drainase bawah permukaan tidak selalu terletak di tengah basin (cekungan), akan tetapi ada yang terletak tepi cekungan berbatasan dengan tebing atau lereng bukit. Dalam satu daerah tangkapan ponor, jumlah ponor tidak selalu tunggal, ada beberapa yang jumlahnya lebih dari satu. Kondisi ponor bervariasi : 1) mulut ponor dibiarkan terbuka seperti adanya dan ada yang ditanggul dengan batu, 2) dasar ponor ada yang berair dan dimanfaatkan oleh penduduk untuk keperluan domestik, namun ada yang tidak berair terisi sedimen, 3) ditutup oleh penduduk agar dapat diusahakan untuk lahan pertanian. Beberapa di antaranya, awalnya mulut ponor lebar misal 5 m kemudian menyempit menjadi 2 m karena ditanggul dengan batu, atau ditimbun.

Daerah imbuhan ponor di daerah penelitian tidak selalu mempunyai pengatus tunggal, bentuk dan luasannya beragam. Apabila dibuat rasio jumlah ponor terhadap luasan daerah imbuhan, maka akan diperoleh hasil yang bervariasi. Rasio jumlah ponor terbagi dalam tiga kelas, yaitu: 0,002 – 0,157; 0,157 – 0,499; 0,499 – 1,486. Berdasarkan klasifikasi tersebut dapat

diketahui bahwa secara umum daerah penelitian masuk dalam klasifikasi rendah, sedangkan kelas sedang dan tinggi hanya sebagian kecil wilayah. Hal ini dipengaruhi oleh daerah imbuhan yang luas dengan pengatusan tunggal. Beberapa ponor/luweng yang ada di daerah penelitian antara lain: Luweng Sawah Ombo, Wuto, Jati, Lebah, Plalangan, Ngrisik, Bodel, Telo, Songo, Cokro, Gunung Cilik, Grudo (Kecamatan Ponjong); Luweng Jurang, Balong, Sindon, Karang, Bendo, Jurang Jero, Song Kondang, Buh Putih, Ngrinjing, Ledok, Jomblangan, Song Kombang, Bromo Lor, Wediutah, dan Ngrinjing (Kecamatan Semanu); Luweng Ombo, Balong, Nujo, Nglengkeng, Grigak, Bendungan, Kalen, Sawah, Nglampeng, Nglobong, Towati, Pucung, Mesu, Ngledek, dan Jambu (Kecamatan Rongkop); Luweng Belikan, Gesing, Pace, Tumpak (Kecamatan Eromoko); serta Luweng Watukerti, Sengon (Kecamatan Pracimantoro).

#### Gua

Kondisi gua-gua yang dijumpai di lapangan ada yang berair dan ada yang tidak berair. Dari 38 gua di daerah penelitian, 17 di antaranya tidak berair. McDonald dan Partners (1984), juga telah melakukan penelusuran gua. Lorong gua terbentuk akibat aliran airtanah yang bergerak dari tempat yang tinggi ke tempat yang rendah yang menjadi keluarannya. Proses tersebut dipengaruhi oleh faktor geologi (struktur geologi: sesar, retakan terbuka) yang memacu terjadinya proses pelarutan. Gua-gua yang terdapat di daerah penelitian di antaranya adalah Gua Krendo, Gremeng, Towo, Gunung Gua, Paesan, Rinjani, Song Gilap, Munggur, Tlaga (Kecamatan Ponjong); Gua Ngreneng, Semuluh, Jlamprong, Seropan, Bribin, Pace, Banyu Anyar, Seropan, Bribin, Sodong (Kecamatan Semanu), Ngerong, Ngreneng, dan Blunyah (Kecamatan Rongkop); Grudo, Macan, Sambu, Dluwak, Kucing, Gua Pucak Sewu (Kecamatan Eromoko), Gua Tanjung (Kecamatan Pracimantoro).

#### Telaga (*doline*)

Kondisi dolin bervariasi, ada yang kering, tergenang sesaat dan permanen. Kondisi tersebut dikontrol oleh ada tidaknya ponor, ketebalan sedimen dasar dolin, pembuatan tanggul mengelilingi dolin, ukuran atau volume dolin, vegetasi di lereng bukit dalam daerah tangkapan ponor. Beberapa faktor tersebut akan mempengaruhi air hujan dan limpasan permukaan mengisi dolin. Dari pengamatan di lapangan menunjukkan variasi mengenai kondisi dolin, yaitu:

1. Dolin/telaga kering, air langsung meresap ke sistem bawah permukaan melalui ponor baik dalam internal dolin itu sendiri ataupun mengalir ke sistem ponor yang lain. Pembuatan tanggul batu kedap di sekeliling dolin dapat menyebabkan dolin kering karena imbuhan air dari daerah imbuhan terhalang. Banyak hal yang diinformasikan oleh penduduk memperjelas kondisi hal tersebut. Selain itu, volume dolin yang kecil dan pengaruh evaporasi dapat menyebabkan keringnya telaga;
2. Dolin yang tergenang cukup bervariasi, yaitu: ada yang sifatnya perenial dan ada yang sesaat. Sifat air yang tergenang sesaat ini cukup bervariasi: < 1 bulan, 1–3 bulan dan 3–6 bulan. Lama tinggal air dalam dolin yang sifatnya perenial ini dipengaruhi oleh tersumbatnya ponor karena sedimentasi. Lapisan sedimen cukup tebal dan daya tampung atau volume dolin yang tinggi.

Beberapa telaga yang dijumpai di lapangan antara lain: Telaga Kanogoro, Kepleng, Prampil Dua, Bindo, Betoro, Sunut, Kedokan, Asem Lulang, Gombang, Mendak, Gandok Ngrejek (Kecamatan Ponjong), Telaga Danggolo, Jalakan (Kecamatan Eromoko), Telaga Gesing, Sriten, Kempul, Ngroyo, Nguluran, Jurug, Tileng, Ngringging (Kecamatan Rongkop), Telaga Karang-tritisan, Sempon, Widoro, Wuluh, Ngepung (Kecamatan Semanu).

#### Kondisi Lereng dan Kerapatan Vegetasi Kondisi Lereng

Lereng di daerah penelitian sangat dipengaruhi oleh proses geomorfologi yang akan menentukan kenampakan permukaan atau

karst. Secara geomorfologi, bentuk lahan daerah penelitian meliputi basin tertutup, kerucut karst, lembah karst dan dataran karst. Variasi lereng di daerah penelitian ditentukan oleh bentuk lahan tersebut. Klasifikasi lereng mengacu pada metode COP untuk kepentingan penilaian kerentanan airtanah karst terhadap pencemaran. Ada 4 kelas lereng, yaitu:  $\leq 8\%$ ,  $8 - 31\%$ ,  $31 - 76\%$  dan  $> 76\%$ . Sebagian besar kelas lereng adalah kelas 2 dan 3 (perbukitan), sedangkan untuk kelas 1 dan kelas 4 hanya sebagian kecil. Permukiman terdapat di lereng kelas 1, dan untuk lereng kelas 4 khususnya pada kerucut-kerucut karst.

### Kerapatan Vegetasi

Kerapatan vegetasi diperoleh dari perhitungan nilai NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) yang diturunkan dari Citra Aster. Berdasarkan hasil analisis NDVI sebagian besar daerah penelitian termasuk ke dalam kelas sedang. Hal itu dapat dipahami bahwa fakta di lapangan menunjukkan tutupan lahan sebagaimana besar berupa tegalan dan semak (tanpa tutupan vegetasi), dan juga permukiman. Kerapatan vegetasi ini akan berpengaruh terhadap intersepsi hujan sebelum mencapai permukaan tanah. Vegetasi dalam hal ini mempunyai fungsi menghambat laju limpasan permukaan. Semakin rapat vegetasi maka laju limpasan akan semakin kecil. Asumsinya apabila terdapat sumber pencemar maka limpasan tersebut akan membawa polutan masuk ke dalam sistem bawah permukaan melalui *point recharge* ataupun secara *diffuse*. Meskipun demikian, berdasarkan penelitian terdahulu (McDonald dan Partners, 1984; Setyahadi, dkk., 2001) diketahui bahwa nilai koefisien limpasan di daerah penelitian khususnya di kawasan karst adalah kecil yaitu berkisar antara 4 – 27%. Kecilnya nilai limpasan karena kehilangan air lebih dikontrol oleh intensitas rekahan batuan.

### Kondisi Tanah

Kondisi tanah dalam penelitian pada sub bab ini fokusnya adalah ketebalan dan tekstur tanah. Keduanya merupakan variabel dari *overlying layer* bersama dengan jenis dan

ketebalan batuan. Hasil laboratorium untuk analisis butir dari sampel tanah yang diambil atas dasar seri tanah, menunjukkan bahwa sebagian besar tekstur termasuk ke dalam material lempungan dan geluh. Ketebalan tanah di lapangan diidentifikasi berdasarkan kedalaman bor tangan yang mampu dilakukan untuk pengambilan sampel tanah dengan dasar klasifikasi metode COP yang sudah ada. Untuk daerah lembah mempunyai ketebalan yang lebih dibanding daerah bukit maupun lereng bukit. Untuk daerah lembah kedalaman yang dapat dicapai dengan bor tangan berkisar 2 m, sedangkan untuk daerah lereng/bukit kurang dari 1 m.

### Kondisi Batuan

Batuan di daerah penelitian dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu batuan gamping (Formasi Wonosari) dan batuan vulkanik (Formasi Semilir). Jenis batugamping pada Formasi Wonosari sebagian besar tersusun oleh batugamping terumbu, meskipun terdapat juga batugamping berlapis, batugamping napalan dan batugamping konglomerat (Suroño, dkk., 1992; Samodra, 2005 dalam Adji, 2009). Jenis batuan pada Formasi Semilir merupakan perselingan antara tufa, breksi piroklastik, lapili, dan sisipan lempung dan batupasir vulkanik (Suroño, dkk., 1992). Ketebalan batuan pada masing-masing formasi sebagai lapisan zona tak jenuh bervariasi, dan teridentifikasi berkisar 24 – 460 m. Ketebalan batuan yang diperhitungkan dalam penelitian ini adalah lapisan batuan yang berada di atas sungai bawah tanah. Hal ini merupakan salah satu kesulitan dalam penelitian ini untuk memperkirakan ketebalan batuan secara tepat. Kompleksnya jaringan sungai bawah tanah yang sampai saat ini masih menjadi bahan diskusi dan kajian yang semakin saling melengkapi (Bahri, dkk., 2008). Hal yang ditempuh adalah memperhitungkan gua-gua berair yang sudah pernah disurvei oleh peneliti terdahulu (McDonald & Partners, 1984), dengan detail ukuran morfometri gua. Dengan demikian dapat dihitung dari ketinggian atap gua hingga topografi permukaan. Berdasarkan data tersebut diketahui bahwa rata-rata ketebalan batuan di daerah penelitian adalah 25 – 460 m dpl.

Metode geofisik sebagai validasi penting sehingga mendapatkan gambaran lebih jelas sistem jaringan sungai bawah tanah (Bahri, dkk., 2008).

### **Kerentanan Airtanah terhadap Pencemaran**

#### ***Concentration of Flow (C)***

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan, sub variabel yang mempengaruhinya pada skenario pertama, secara spasial dapat dilihat bahwa jarak ke ponor sebagian besar termasuk dalam klasifikasi dekat yaitu  $\leq 500$  m dengan nilai 0 dan 500 – 1000 m dengan nilai 0,1, sedangkan yang mempunyai jarak 1000 – 1500 m relatif sedikit. Untuk jarak ke sungai tenggelam tidak ada sehingga untuk sub variabel ds mempunyai nilai 1. Variabel sv merupakan kombinasi antarlereng dengan vegetasi. Lereng di daerah penelitian bervariasi tergantung bentuk lahannya, sedangkan kerapatan vegetasi relatif homogen. Dari penggabungan keduanya diketahui bahwa secara umum dominasi pada kelas lereng ke 2 (8 – 31 %) dengan vegetasi rendah. Untuk lereng kelas 3 (31 – 76 %) dengan vegetasi penutup yang sedang. Hasil penilaian variabel C untuk skenario yang pertama semuanya adalah sangat tinggi, yaitu dengan rentang 0 – 0,2. Penilaian untuk daerah non ponor (*rest area*) diklasifikasikan daerah karst yang berkembang dengan lapisan yang permeabel dan non karst. Lereng dan vegetasi hampir sama dengan skenario yang pertama. Hasil C untuk skenario ke dua bervariasi dari kelas sangat rendah hingga tinggi. Namun untuk daerah yang berbatuan gamping dominasi kelas sedang hingga tinggi, sedangkan untuk daerah yang berbatuan vulkanik termasuk klasifikasi sangat rendah hingga rendah. Apabila dilihat hasil dari penilaian faktor C ini memang dapat dipahami karena ponor tersebar di sebagian besar daerah penelitian. Artinya bahwa pengatusan melalui *point recharge* memang proses yang dominan, dibanding proses infiltrasi yang lain. Secara spasial peta faktor C (*Concentration of Flow*) dapat dilihat pada Gambar 2.

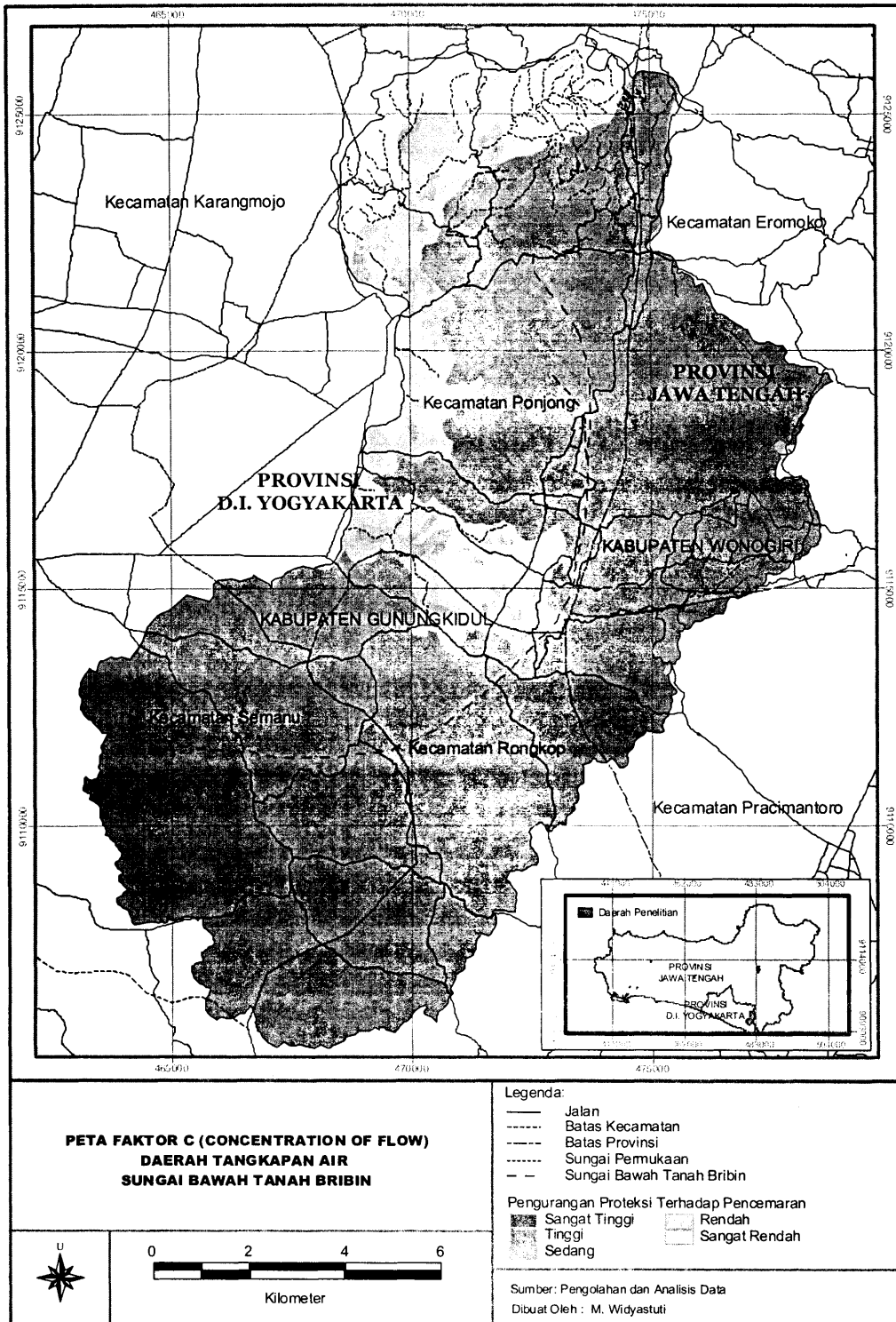
#### ***Overlaying Layer (O)***

Sub variabel tanah (Os) secara umum bertekstur lempung dan geluh. Variasi ketebalan tergantung pada bentuk lahan, yaitu lembah, lereng dan bukit menurut unit seri tanah. Peta faktor O disajikan pada Gambar 3. Ketebalan lapisan tanah di bukit kurang dari 0,5 m, lereng mempunyai ketebalan antara 0,5 – 1 m; sedangkan lembah bervariasi ada yang ketebalannya 0,5 – 1 m dan lebih dari 1 m. Batuan dalam klasifikasi metode COP daerah penelitian termasuk ke dalam batuan karst (*karstic rock*) untuk Formasi Wonosari dan konglomerat, breksi dan batupasir (Formasi Semilir). Penentuan nilai litologi merupakan kombinasi perkalian antara jenis batuan (ly) dan ketebalan batuan (m) (sebagai ketebalan batuan yang relatif tipis).

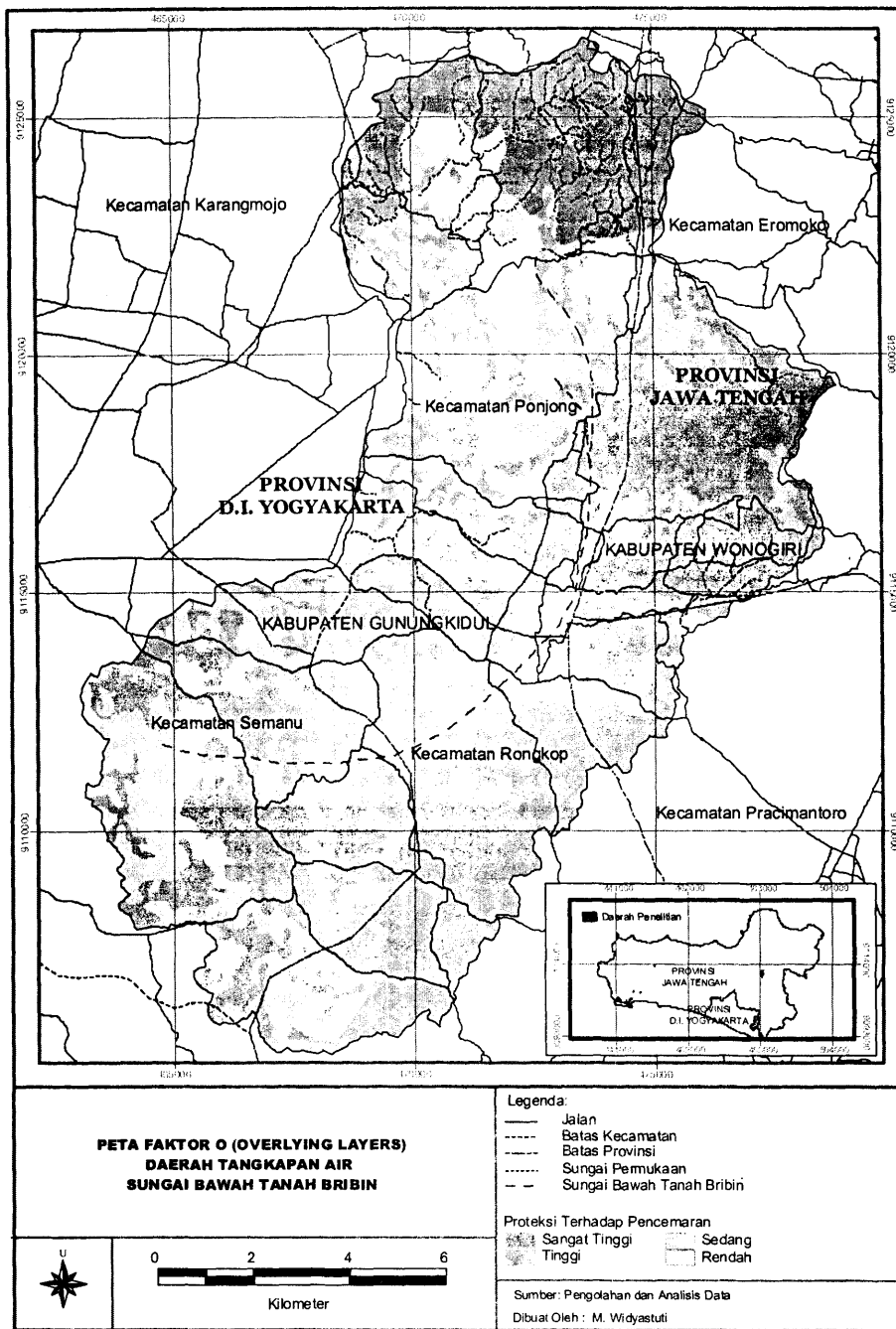
#### ***Precipitation (P)***

Hujan menurut Daly *et al.* (2002) mencakup jumlah dan faktor yang berpengaruh terhadap infiltrasi seperti: frekuensi, distribusi temporal, durasi, dan intensitas kejadian hujan. Faktor tersebut akan membantu mengidentifikasi kemampuan curah hujan dalam membawa kontaminan dari permukaan ke airtanah. Curah hujan di daerah penelitian diukur atas dasar stasiun yang terbatas yaitu 3 stasiun hujan di Tambakromo (hulu), Karangasem (tengah), dan Bribin (hilir). Berdasarkan data yang terukur, curah hujan tahunan di daerah penelitian secara spasial terbagi ke dalam 3 klasifikasi yaitu: >1600 mm/tahun, 1200 – 1600 mm/th dan 800 – 1200 mm. Curah hujan yang diperhitungkan dalam penilaian ini adalah dari jumlah bulan basah. Distribusi temporal curah hujan dihitung atas dasar pembagian jumlah curah hujan tahunan dengan jumlah hari (kejadian) hujan. Hasil yang diperoleh distribusi temporal termasuk ke dalam klasifikasi 1 dan 2 yaitu < 10 dan 10-20. Dari kedua sub variabel tersebut yaitu PQ dan PI diperoleh hasil, nilai variabel P (*precipitation*) daerah penelitian terdapat 3 klasifikasi sangat rendah, rendah dan sedang (Gambar 4). Hal tersebut mengindikasikan bahwa kemampuan curah hujan daerah penelitian dalam membawa

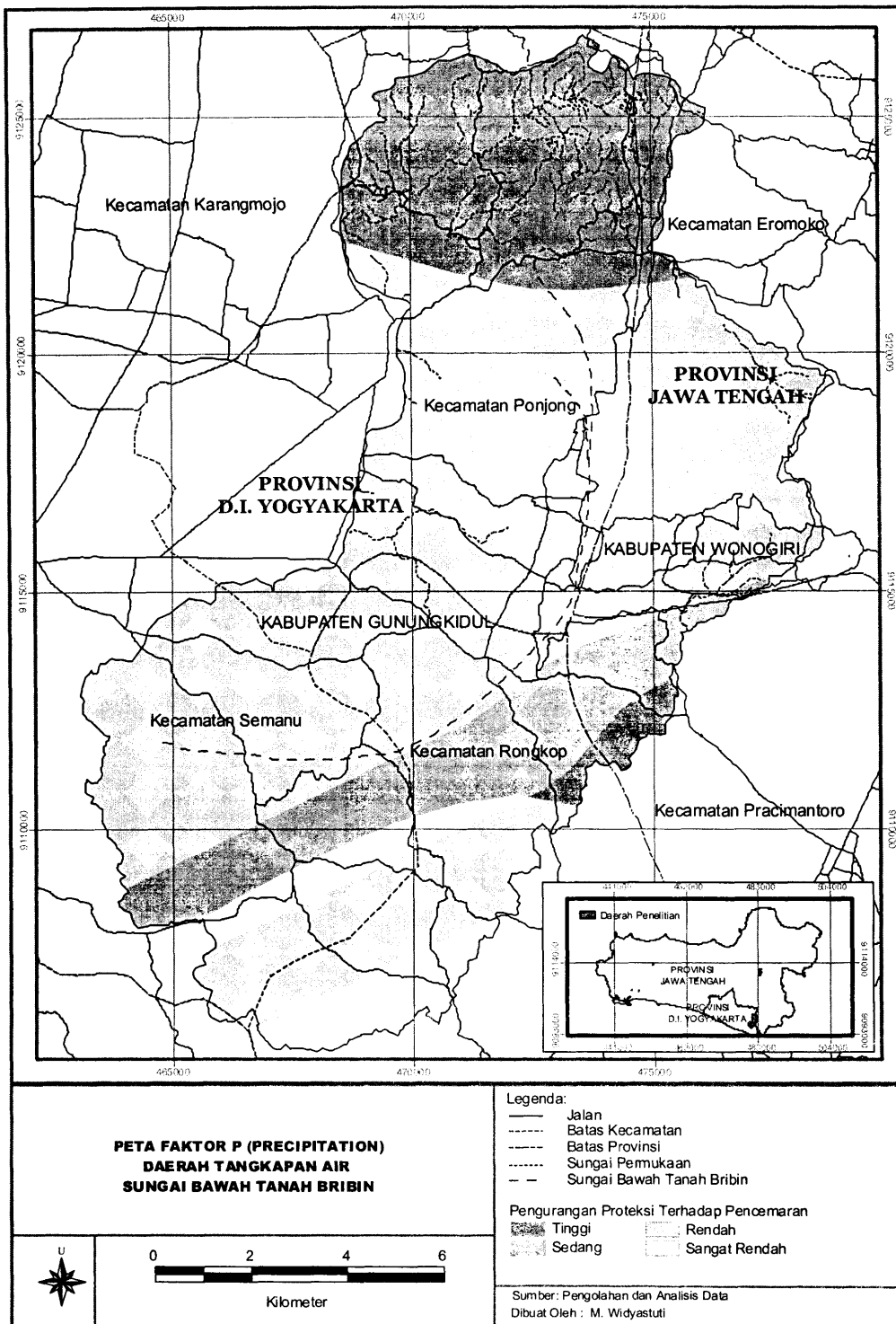




Gambar 2. Peta Faktor C (Concentration of Flow) Daerah Penelitian



Gambar 3. Peta Faktor O (Overlying Layer) Daerah Penelitian



Gambar 4. Peta Faktor P (*Precipitation*) Daerah Penelitian

kontaminan termasuk kategori sangat rendah hingga sedang.

### **Tingkat Kerentanan Airtanah terhadap Pencemaran**

Hasil penilaian kerentanan airtanah karst terhadap pencemaran di daerah penelitian berdasarkan metode COP diketahui bahwa sebagian besar daerah penelitian mempunyai tingkat kerentanan yang tinggi meskipun ada bagian wilayah yang mempunyai tingkat kerentanan yang rendah hingga sedang (Gambar 5). Tingginya kerentanan tersebut sangat dikontrol oleh beberapa hal. Dari aspek konsentrasi aliran pada skenario pertama semuanya menunjukkan nilai yang sangat tinggi karena proses infiltrasi melalui ponor/luweng dan didukung jarak terpendek dari daerah imbuhan ke ponor ataupun sungai tenggelam.

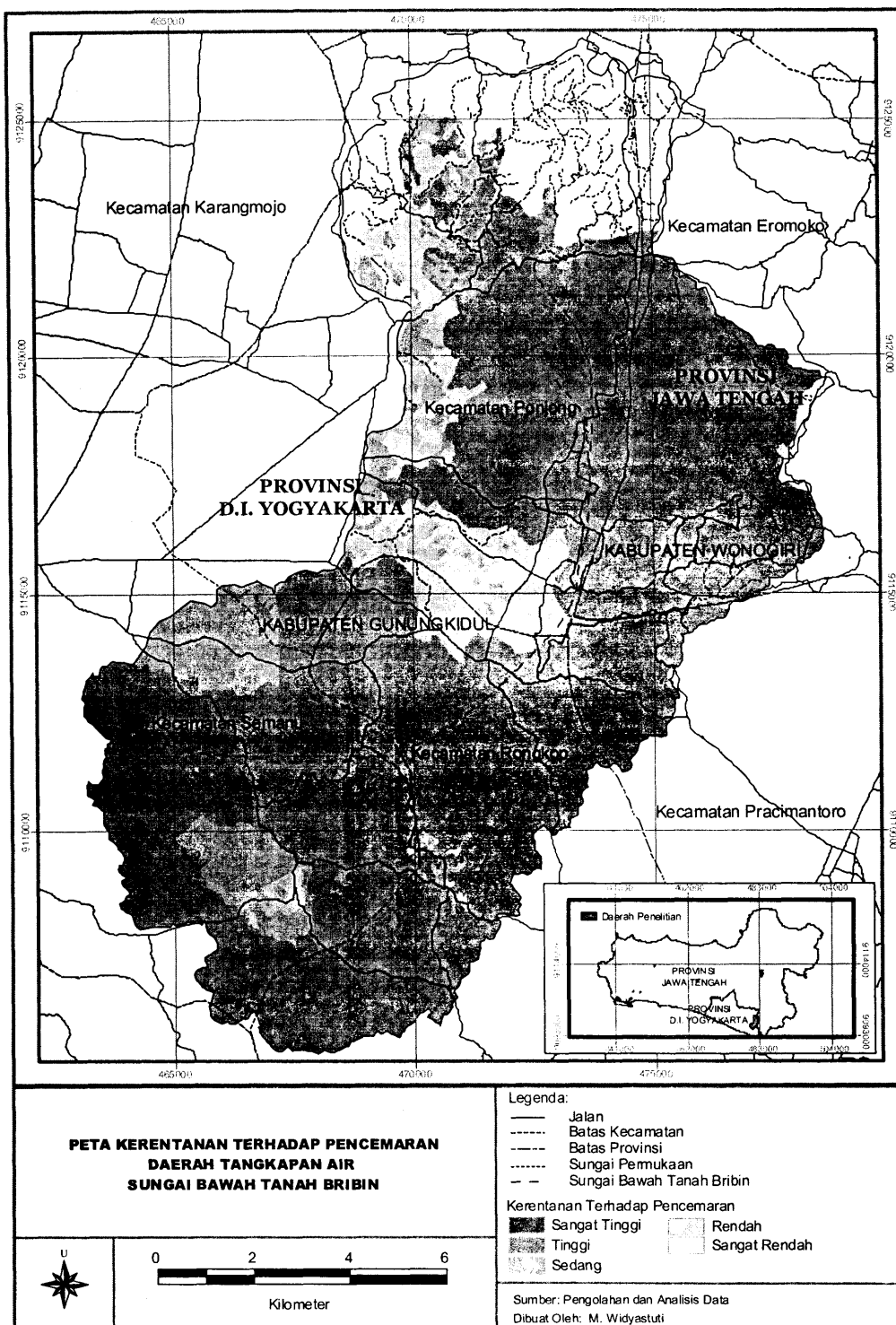
Hal itu juga diperjelas oleh penelitian terdahulu bahwa nilai koefisien limpasan permukaan di daerah penelitian rendah karena banyaknya kehilangan air melalui sistem perekahan (McDonald dan Partners, 1984, Setyahadi, dkk., 2001). Faktor lainnya adalah indeks lapisan mempunyai nilai yang rendah karena jenis batuan dan juga ketebalan lapisan yang menyebabkan tingkat perlindungan lapisan terhadap kontaminan menjadi rendah. Meskipun, variabel lapisan penutup dari kondisi tanah sebenarnya sebagian besar bertekstur lempung dapat berfungsi sebagai penghambat laju air karena nilai permeabilitasnya rendah. Akan tetapi karena proses infiltrasi yang dominan adalah melalui ponor sehingga hal tersebut yang menjadi dominan. Sebagian kecil wilayah penelitian mempunyai tingkatan kerentanan rendah, sedang dan tinggi. Kerentanan yang rendah terdapat pada daerah yang merupakan *rest area* khususnya pada daerah yang berbatuan vulkanik, sedangkan kerentanan sedang hingga tinggi pada daerah yang berbatuan gamping yang proses infiltrasinya tidak melalui ponor akan tetapi secara difus. Oleh karena itu di daerah ini tingkatan kerentanan lebih dikontrol oleh perlapisan zona tak jenuh dan curah hujan baik dari jumlah dan distribusi temporal.

## **PEMBAHASAN, SIMPULAN DAN SARAN**

### **Pembahasan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik daerah tangkapan ponor bervariasi menurut aspek jumlah, dimensi dan kondisi ponor, lereng, vegetasi, tanah dan batuan. Kondisi ini akan menentukan tingkatan kerentanan daerah penelitian. Secara geologi, di daerah penelitian terdapat dua formasi batuan yaitu Formasi Semilir dan Wonosari. Keduanya mempunyai karakter fisik yang berbeda khususnya ditinjau dari jenis, ketebalan, kekedapan, dan perekahan batuan, proses infiltrasi, serta morfologi permukaan. Pada Formasi Semilir dan sebagian Formasi Wonosari (bukan daerah imbuhan ponor) merupakan daerah yang proses infiltrasinya secara difus; sedangkan daerah tangkapan ponor didominasi proses infiltrasi melalui ponor (*point recharge*). Banyaknya ponor/luweng di daerah penelitian merupakan media bagi konsentrasi aliran permukaan menuju ke sistem bawah permukaan. Lereng dan vegetasi yang mempunyai peran dalam mempercepat ataupun menghambat limpasan permukaan ternyata tidak mempunyai pengaruh yang besar, karena kehilangan air banyak melalui perekahan batuan. Hal itu dibuktikan hasil penelitian terdahulu bahwa nilai koefisien limpasan kecil.

Tanah dan batuan mempunyai fungsi sebagai lapisan penutup/pelindung khususnya pada daerah yang proses infiltrasinya secara difus melalui zona tak jenuh. Ke dua lapisan ini memegang kunci dalam proses penting hidrogeologi. Tekstur tanah sangat menentukan laju infiltrasi air. Sebagian besar daerah penelitian mempunyai tekstur lempung dan geluh. Lempung mempunyai kemampuan menahan laju air ke bawah permukaan karena nilai permeabilitasnya sangat kecil. Hal ini memberikan tingkat perlindungan yang lebih baik dibanding tanah dengan tekstur pasir. Batuan seperti yang telah disebutkan sebelumnya, di daerah penelitian terdapat dua kelompok batuan yang berbeda yaitu batugamping dan batuan vulkanik. Kemampuan lapisan batuan tersebut dalam meloloskan air



Gambar 5. Peta Kerentanan Airtanah terhadap Pencemaran (Indeks COP) Daerah Penelitian

berbeda, tergantung sistem peretakan dan kedalaman. Berdasarkan hasil analisis *over-laying layer* ini tergolong ke dalam klasifikasi sedang dan tinggi dalam fungsi perlindungan.

Curah hujan membantu mengidentifikasi kontaminan dari permukaan ke sistem airtanah. Oleh karena itu jumlah dan intensitas hujan sangat menentukan kemampuan membawa kontaminan dan hujan yang diperhitungkan adalah bulan basah. Hasil analisis menunjukkan bahwa daerah penelitian termasuk ke dalam kategori sangat rendah, rendah dan sedang. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kemampuan curah hujan daerah penelitian dalam membawa kontaminan termasuk kategori sangat rendah hingga sedang. Dengan demikian maka secara umum peran hujan dalam mempengaruhi tingkatan kerentanan dapat dikatakan kecil.

Dari ketiga kondisi menentukan tingkatan kerentanan airtanah karst terhadap pencemaran di daerah penelitian. Berdasarkan metode COP diketahui bahwa sebagian besar daerah penelitian mempunyai tingkat kerentanan yang tinggi meskipun ada bagian wilayah yang mempunyai tingkat kerentanan yang rendah hingga tinggi. Hal itu membuktikan bahwa peran faktor konsentrasi aliran (C) lebih dominan dibanding faktor yang lainnya (O dan P). Meskipun kondisi ponor beragam: jumlah tidak selalu tunggal setiap daerah imbuhan ponor, kondisi mulut ponor terbuka (dengan berbagai dimensi lebar dan dalam) dan tertutup, dolin tergenang dan kering; semuanya memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kecepatan proses laju aliran permukaan ke sistem bawah permukaan. Hal ini ke depan dapat dijadikan pertimbangan dalam penilaian kerentanan, bukan hanya jarak terhadap ponor saja melainkan keragaman kondisi tersebut akan dapat melengkapi metode yang sesuai dengan kondisi daerah penelitian.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa karakteristik daerah imbuhan ponor bervariasi dari aspek jumlah, dimensi, letak dan kondisi ponor; lereng, vegetasi, tanah dan ketebalan batuan. Karakteristik tersebut menentukan tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran di daerah

penelitian. Hal itu dapat dibuktikan pada hasil penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran menunjukkan bahwa sebagian besar daerah penelitian mempunyai tingkat kerentanan yang sangat tinggi. Faktor yang sangat berpengaruh adalah konsentrasi aliran yang didominasi oleh infiltrasi melalui ponor.

Penelitian ini masih perlu ditindak lanjuti dengan validasi hasil dengan hidrograf aliran, kemograf dan uji perunut untuk membuktikan setiap zonasi atau tingkatan kerentanan. Adanya keterbatasan pengukuran ketebalan batuan karena ketersediaan data perlu dilakukan lebih detail melalui pendugaan geofisik sehingga dapat memvalidasi hasil pemetaan ketebalan batuan. Hasil penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan metode COP yang diacu mengingat bahwa penilaian terhadap kondisi ponor bukan hanya berdasarkan jarak tetapi juga dapat ditambahkan dengan mempertimbangkan variabel baru jumlah dan kondisi ponor serta kondisi dolin.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian disertasi penulis di Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi dan Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dana hibah untuk melakukan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada seluruh asisten yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini, yaitu : Abdul Hafiedz, S.Si, Riki Ronald Parditus, S.Si., Iwan Agus Wijanarto, S.Si., Khoirul Anom, S.Si., I Made Kusmayadi, S.Si., M.Sc., Tri Rahayu, S.Si., Ika Widarti, D.P., S.Si., Elis Molidena, S.Si., Ajeng Wulandari, S.Si. dan Tommy Ardian Tivianto, S.Si., M.Sc, serta semua pihak yang telah membantu kelancaran pelaksanaan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T.N. 2009. Kajian Variasi Spasial-Temporal Hidrogeokimia dan Sifat Aliran untuk Karakterisasi Perilaku Sistem Karst Dinamis (SKD) Sepanjang

- Sungai Bawah Tanah (SBT) Bribin. *Disertasi*. Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta.
- Bahri, A.S, Santoso D, Kadir W.G.A., Puradimedja, D.D., Tofan R.M., Santos, F.M. 2008. Penerapan Metoda Very Low Frequency-vertical Gradient (VLF-EM-vGRAD) untuk Memetakan Sungai Bawah Permukaan di Daerah Karst. *Makalah Seminar* dalam Indonesian Scientific Karst Forum. Goenoeng Sewoe Karst Forum, Yogyakarta.
- Bakalowicz, M., 2005. Karst Groundwater: a Challenge for New Resources. *Hydrogeology Journal* 13 (1), 48 – 160. Springer, Jerman.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, C., Zwahlen, F. 2002. Main Concepts of “European Approach” for (Karst ) Groundwater Vulnerability Assesment and Mapping. *Hydrogeology Journal* 10 (2), 340 – 345. Springer, Jerman.
- Doerfliger, N., Zwahlen., F. 1998. *Practical Guide, Groundwater Vulnerability Mapping in Karst Region (EPIK)*. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern. ([http://www.acsadbgr.org/files/gw\\_vul\\_annex3\\_epik.pdf](http://www.acsadbgr.org/files/gw_vul_annex3_epik.pdf), 24 April 2006)
- Ford, D. and Williams, D.W. 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Chapman and Hall, London.
- Goldscheider, N., 2002. Hydrogeology and Vulnerability of Karst System: Examples from the Northern Alps and Swabian Alb. *Ph.D Thesis*. Karlsruhe.
- Goldscheider, N., 2005. Karst Groundwater Vulnerability Mapping: Application of New Method in Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal* 13 (4), 555 – 564. Springer, Jerman.
- Haryono, E. dan Adji, T.N. 2004. *Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Kelompok Studi Karst, Fakultas Geografi, UGM.
- MacDonald and Partners. 1984. Greater Yogyakarta – Groundwater Resources Study. *Vol 3: Main Report*. Directorate General of Water Resources Development Project (P2AT), Yogyakarta.
- Setyahadi, A., Suyono dan Haryono, E. 2004. Koefisien Limpasan Permukaan Kawasan Karst Gunung Sewu (Studi Kasus: di Daerah Tangkapan Air Sungai Bawah Tanah Bribin, Kabupaten Gunungkidul, Yogyakarta. Dalam Haryono, E. dan Adji, T.N. (ed), *Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Kelompok Studi Karst Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta.
- Summerfield, M.A. 1991. *Global Geomorphology*. John Wiley and Sons, New York.
- Surono, Toha, B., dan Sudarno, I. 1992, *Peta Geologi Lembar Surakarta-Girintontro, Jawa Tengah*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (P3G) Departemen Pertambangan dan Energi, Bandung.
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F. Vadillo, I., and Jiménez, P. 2006. Proposed Method for Groundwater Vulnerability Mapping in Carbonate (Karstic) Aquifer: The COP Method (Application in Two Pilot Sites in Southern Spain). *Hydrogeology Journal* 14 (6), 912-925. Springer, Jerman.
- Zwahlen F. (ed). 2003. Vulnerability and Risk Mapping for Protection of Carbonate (Karst) Aquifer. *Scope-Goal- Result*. European Commission COST Action 620. Directorate-General Science, Research and Development. (<http://www.bgr.bund.de>, 8 Februari 2006)
- White, W.B. 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrain*. Oxford University Press, Oxford.