BAB II

Hidrologi dan Hidrogeologi Karst

Oleh: M. Widyastuti, Ahmad Cahyadi, M. Haviz Damar Sasongko

2.1 Maksud dan Tujuan Instruksional

Kegiatan survei cepat ini bertujuan untuk mengumpulkan data-data mengenai kondisi hidrologi karst yang meliputi aspek kuantitas, kualitas dan sebaran spasial. Tujuan tersebut dapat dirinci sebagai berikut:

- 1. Mengetahui besarnya debit aliran sungai permukaan, sungai bawah permukaan, airtanah dan mata air;
- 2. Mengetahui kondisi kualitas fisik dan kimia air sungai permukaan, sungai bawah permukaan, airtanah dan mata air.
- 3. Mengetahui sistem jaringan sungai bawah tanah melalui metode penelusuran.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Hidrologi Karst

Sistem hidrologi karst dikontrol oleh sistem pelorongan yang dibentuk oleh proses pelarutan batuan, sehingga sangat berbeda dengan sistem hidrologi yang terdapat pada media porus yang dikontrol oleh ruang antar butir batuan. Karst sebagai suatu sistem mempunyai heterogenitas yang tinggi dan anisotropis (Atkinson, 1985; Goldscheider, 2005). Hal yang dapat dilihat secara jelas pada sistem karst yang sudah berkembang nampak bahwa sangat jarang/ tidak dijumpai sungai permukaan. Sistem yang lebih berkembang adalah loronglorong pelarutan seperti gua dan sungai bawah tanah. Sistem hidrologi bawah permukaan dalam tulisan ini selanjutnya disebut sebagai sistem airtanah.

Sistem aliran di kawasan karst oleh White (1988) dikelompokkan menjadi dua, yakni aliran yang didominasi oleh ruang antar butir batuan (diffuse) dan aliran yang didominasi oleh lorong-lorong pelarutan (conduit). Namun demikian, beberapa ahli menambahkan jenis aliran yang didominasi oleh sistem rekahan (fissure). Aliran diffuse memiliki sifat penyimpanan air yang baik, karena aliran pada ruang antar butir mengalir dengan lambat. Jenis aliran ini yang akan berkontribusi paling besar dalam mensuplai aliran pada mata air dan sungai bawah tanah pada musim kemarau. Aliran conduit memiliki kecepatan aliran yang tinggi, sehingga memiliki fungsi sebagai pengatus. Jenis aliran ini

adalah aliran yang berkontribusi besar pada kejadian banjir pada mata air dan sungai bawah tanah.

Porositas pada akuifer karst dibentuk oleh rekahan-rekahan batuan karena struktur geologi maupun pelarutan batuan. Porositas yang demikian kemudian selanjutnya disebut porositas sekunder dan rongga antar butir penyusun batuan yang disebut sebagai porositas primer. Porositas primer mempunyai sifat isotropik, sifat aliran laminer, dan mempunyai respon yang lambat. Porositas sekunder mempunyai sifat anisotropis dengan muka airtanah yang tidak teratur, sifat aliran laminer dengan respon yang menengah. Jenis porositas tersebut kemudian akan berpengaruh jenis aliran dan sifat khas masingmasing jenis aliran (Gillieson, 1996). Tabel 2.1. menunjukkan karakteristik masing-masing jenis aliran.

Tabel 2.1. Tipe Porositas, Jenis Aliran dan Karakteristik Akuifer Karst

Karakteristik	Aliran Diffuse (Porositas Primer)	Aliran Fissure (Porositas Sekunder)	Aliran Conduit (Porositas Sekunder)
Komponen	Rongga antar butir, celah mineral, dan vughs	Kekar dan retakan batuan, bidang lapisan batuan, celah mineral yang saling berhubungan	Saluran terbuka dan pipa dengan ukuran dan bentuk yang beragam
Keseragaman	Pada umumnya isotropik	Pada umumnya anisotropik sebagai akibat dari retakan, sering berorientasi pada arah tertentu	Anisotropik dan membentuk jaringan
Regim aliran	Laminer	Laminer – turbulen	Turbulen
Hukum Hidraulika	Darcy	Hagen-Poseuille	Darcy-Weisbach
Muka Air Tanah	Mudah ditentukan	Permukaan tidak merata	Sering menggantung di beberapa ketinggian
Respon terhadap imbuhan	Lambat	Sedang	Cepat

Sumber: Gillieson (1996)

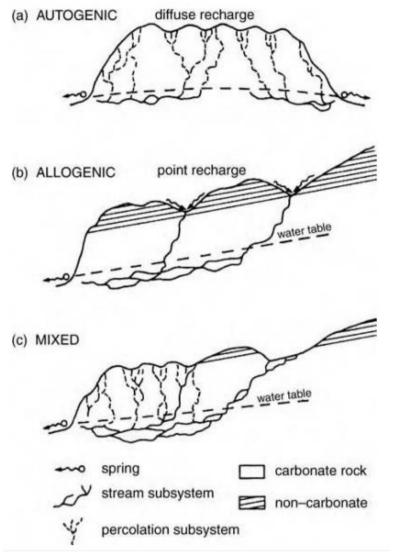
Sistem drainase kawasan karst menurut Ford dan Williams (2007) dapat dibedakan menjadi dua mintakat, yaitu mintakat epikarst dan mintakat endokarst. Mintakat epikarst merupakan bagian atas lapisan batuan di kawasan karst yang mengalami proses pelarutan intensif. Mintakat epikarst ini dapat dibedakan lagi menjadi dua bagian, yaitu (1) bagian bawah permukaan (*cutaneous zone*) serta (2) bagian regolith dan bagian yang mengalami pelebaran rekahan akibat pelarutan (*subcutaneous zone*). Mintakat endokarst dibedakan menjadi mintakat yang tidak jenuh (*vadose zone*) dan mintakat jenuh air (*phreatic zone*).

White (1988) menjelaskan sistem aliran internal pada akuifer karst, di bagian atas (permukaan tanah), diasumsikan memiliki tiga komponen daerah tangkapan air, yaitu: kawasan karst, kawasan non-karst yang berdekatan (aliran allogenic), dan masukan dari bagian atas kawasan karst (sungai masuk/tertelan) atau masukan langsung secara vertikal. Hujan yang jatuh di permukaan tanah kaawasan karst sebagian akan mengalami penguapan, dan sisanya akan masuk ke sistem akuifer karst sebagai allogenic runoff, internal runoff dan diffuse infiltration (Gambar 2.1). Hujan yang jatuh harus menjenuhkan tanah dan zona rekahan (epikarst) sebelum masuk ke zona aerasi. Sungai yang tertelan dan masuk melalui ponor pada doline/lembah biasanya langsung membentuk lorong (conduit) dan dapat berkembang menjadi saluran terbuka. Selain itu, air yang dialirkan dari daerah tangkapan hujan di atas kawasan karst akan menuju zona aerasi melalui lorong-lorong vertikal (luweng). Akhirnya, aliran tersebut bergabung dengan lorong conduit (sungai bawah tanah) dari masukan lain dan/atau ada juga yang menjadi mataair.

2.2.2 Mata Air Karst

Mata air adalah pemunculan airtanah ke permukaan Bumi karena suatu sebab. Proses pemunculan mata air karst disebabkan oleh beberapa hal, yaitu topografi, gravitasi dan struktur geologi. Sementara itu, mata air karst menurut White (1988) adalah air yang keluar dari akuifer karst terutama pada *cavities* hasil pelarutan di permukaan atau bawah permukaan Bumi.

Menurut Haryono dan Adji (2004), beberapa keunikan yang dijumpai pada mata air karst antara lain: (1) mata air dengan debit sama, bersuhu sama, kesadahan sama dapat dijumpai pada mataair karst yang lain; (2) mata air karst biasanya mempunyai debit yang besar; dan (3) karakteristik mata air karst sangat tergantung tingkat karstifikasi (perkembangan karst). Elevasi suatu mata air dapat semakin dalam menurut waktu, dan bila mencapai *local base level* maka mata air yang kecil akan hilang dan bergabung seiring dengan melebarnya konduit. Dengan kata lain, semakin sedikit jumlah mata air maka debitnya akan semakin besar.

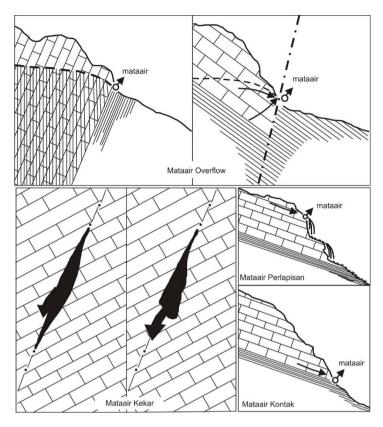


Gambar 2.1. Tiga Komponen Daerah Tangkapan Air Kawasan Karst (Ford dan Williams, 2007)

Klasifikasi mata air karst tidak jauh berbeda dengan mataair secara umum. White (1988) mengklasifikasikan mata air atas dasat periode pengalirannya, struktur geologi dan asal airtanah karst. Klasifikasi mata air berdasarkan periode pengalirannya: perennial, periodic, intermitent, dan episodic. Klasifikasi mata air atas dasar struktur geologi: bedding/contact, fracture, descending dan ascending. Atas dasar asal airtanah, mata air

diklasifikasikan: *emergence, resurgence, dan exurgence*. Karakteristik mata air tersebut dijelaskan sebagai berikut:

- 1. Klasifikasi mataair berdasarkan periode pengalirannya
 - a. *Perennial springs*: mata air karst yang mempunyai debit yang konsisten sepanjang tahun;
 - b. Periodic springs: mata air karst yang mengalir pada saat ada hujan saja;
 - c. *Intermitten springs*: mata air karst yang mengalir pada waktu musim hujan; dan
 - d. *Episodically flowing springs*: mata air karst yang mengalir pada saat-saat tertentu saja dan tidak berhubungan dengan musim atau hujan.
- 2. Klasifikasi mata air berdasarkan struktur geologi (Gambar 2.2)
 - a. *Bedding/contact springs*: mata air karst yang muncul pada bidang perselingan formasi batuan atau perubahan jenis batuan, misal jika akuifer gamping terletak di atas formasi breksi vulkanik;
 - b. *Fracture springs*: mata air karst yang keluar dari bukaan suatu *joint* atau kekar atau retakan di batuan karbonat:
 - c. *Descending springs*: mata air karst yang keluar jika ada lorong *conduit* dengan arah aliran menuju ke bawah; dan
 - d. *Ascending springs*: mata air karst yang keluar jika ada lorong conduit dengan arah aliran menuju ke atas. Jenia mata air ini apabila memiliki debit besar, maka sering disebut sebagai *vauclusian spring*.
- 3. Klasifikasi mataair berdasarkan asal airtanah
 - a. *Emergence springs*: mata air karst yang mempunyai debit besar tetapi tidak cukup bukti mengenai daerah tangkapannya;
 - b. *Resurgence springs*: mata air karst yang berasal dari sungai yang masuk kedalam tanah dan muncul lagi di permukaan; dan
 - c. Exurgence springs: mata air karst dengan debit kecil dan lebih berupa rembesan-rembesan (seepages).



Gambar 2.2. Klasifikasi Mataair Berdasarkan Struktur Geologi (White, 1988)

2.2.3 Kualitas Air

Peraturan Pemerintah (PP) Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 1990 menyebutkan bahwa kualitas air adalah sifat air dan kandungan makhluk hidup, zat, energy, atau komponen lain di dalam air. Pengertian ini nampaknya memiliki kesusuaian dengan pengertian hidrokimia air yang dikemukakan oleh Gilli *et.al.*, (2012). Menurutnya hidrokimia air adalah karakteristik fisik, kimia, isotopik dan mikrobiologi yang ada dalam air. Pembahasan terkait dengan kualitas air erat kaitannya dengan permasalahan degradasi air. Airtanah di kawasan karst memiliki kerentanan terhadap pencemaran yang tinggi. Menurut Goldscheider (2005), hal tersebut disebabkan oleh tipisnya lapisan tanah sebagai filter pencemar, konsentrasi aliran terdapat pada daerah epikarst (tempat terjadinya rekahan secara intensif dan lapisan karst dari akuifer karbonat), serta resapan air melalui ponor sehingga kontaminan dapat dengan mudah mencapai airtanah dan tersebar secara cepat di dalam saluran karst (*karst conduit*) mencapai jarak yang jauh. Oleh karenanya pemahaman mengenai kualitas air pada kawasan karst

menjadi penting baik terkait dengan faktor pencemar, sumber pencemar dan proses yang mempengaruhi.

Komposisi kimia air pada sistem hidrologi karst dipengaruhi oleh penggunaan lahan, mekanisme imbuhan (difus atau terkonsentrasi), kondisi iklim, batuan dan tipe aliran (difus atau konduit) (Goldscheider dan Drew, 2007). Beberapa proses penting yang mempengaruhi komposisi kimia airtanah menurut Appelo dan Postma (1993) meliputi evaporasi dan evapotranspirasi, pengambilan (*uptake*) ion secara selektif oleh vegetasi dan penimbunan dalam biomassa, pelapukan dan pelarutan, pengendapan mineral, reaksi pertukaran ion, percampuran dengan air yang berbeda kualitasnya, serta aktivitas manusia. Smart dan Hobbes (1986) menyebutkan secara khusus untuk daerah karst bahwa tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran ditentukan oleh faktor kondisi infiltrasi, kondisi epikarst, jaringan sungai bawah tanah, dan penutupan tanah. Revbar (2007) menjelaskan bahwa berbagai macam proses alami yaitu proses fisika, kimia maupun biologi akan berpengaruh terhadap kadar polutan selama pergerakannya pada zona tanah, zona tak jenuh dan sistem airtanah; serta perubahan kondisi fisik maupun bentuk kimia polutan.

White (1988) mengelompokkan beberapa sumber pencemar airtanah di daerah karst ke dalam beberapa kategori. Sumber-sumber polutan bagi airtanah tersebut adalah limbah domestik dan publik (*septic tank*, *outhouse*, *sewer*, tempat pembuangan sampah, ponor/luweng buangan), aktivitas pertanian (limbah ternak/organik, pupuk, insektisida dan herbisida), konstruksi (akumulasi garam (cuaca dingin), area parkir, material yang dipindahkan (dikeruk), dan ladang minyak) dan pertambangan, aktivitas industri (timbunan minyak, dan pendistribusian, *outlet* limbah, dan buangan kimia). Jenis zat pencemar, yaitu: radioaktif, logam (aluminium, arsenik, boron, kadmium, khromium, kuprum, nikel, merkuri), nutrien (ion atau campuran organik termasuk nitrogen dan phospor), zat inorganik (magnesium, natrium, karbonat, sulfat, klorida dan fluorida), zat organik (hidrokarbon aromatik yang mudah larut; benzene, toluene, ethylbenzene, paraxylene, campuran lain sering ada pada lokasi buangan limbah), dan biologi (bakteri patologis, virus atau parasit).

Goldscheider dan Drew (2007) menjelaskan secara rinci beberapa faktor yang mempengaruhi variasi parameter hidrokimia di kawasan karst seperti disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Faktor-faktor yang Mengontrol Variasi Hidrokimia

Hubungan	Parameter	Sumber	Jerapan		
Tanah-	CO ₂	Degradasi bahan	Pelarutan mineral		
Parameter		organik dan	karbonat		
		pernafasan akar			
	²²² Rn	Peluruhan radioaktif	Peluruhan radioaktif		
		²²⁶ Ra	waktu paruh 3,8 hari		
	DOC (Karbon	Dekomposisi seresah	Penyerapan mineral		
	organik terlarut)	dan humus	lempung, biodegradasi		
	NO ₃ -(1)	Pupuk sintetis dan	Denitrifikasi kondisi		
		organik, nitrifikasi	anaerob		
		NH ₄ ⁺ dari pupuk			
	NH ₄ ^{+ (1)}	Pupuk sintetis dan	Nitrifikasi, pertukaran		
		organik, dekomposisi	ion		
		bahan organik tanah			
	PO ₄ ^{3- (1)}	Pupuk sintetis dan	Penyerapan Fe		
		organik	hidroksida,		
			oengendapan dengan		
			Ca ⁺		
	Cl- (1)	Pupuk, hujan, garam	Konservatif		
	SO ₄ ²⁻⁽¹⁾	Pupuk	Konservatif kecuali		
			kondisi ekstrim		
	K ^{+ (1)}	Pupuk, pelarutan	Pertukaran ion		
		silikat			
	Kekeruhan	Partikel dari zone	Filtrasi		
		tanah, sedimen dalam			
		konduit			
Batuan	Ca ₂ ⁺	Pelarutan mineral	Pertukaran ion,		
karbonat-		karbonat	pengendapan mineral		
parameter			karbonat		
	$\mathrm{Mg_2}^+$	Pelarutan mineral	Pertukaran ion		
		karbonat			
	HCO ₃ -	Pelarutan mineral	pengendapan mineral		
		karbonat	karbonat		
	ỗ¹³C ke DIC	Pelarutan gas CO2			
		tanah, mineral			
		karbonat			

Lanjutan Tabel 2.2

Hubungan	Parameter	Sumber	Jerapan	
Parameter	SO ₄ ²⁻	Pelarutan gipsum dan	Konservatif kecuali	
yang terkait		anhydrite pada	dalam kondisi	
dengan		evaporit	penurunan	
batuan jenis	Sr ²⁺	Pelarutan celestite	Pertukaran ion	
lainnya	Variasi jejak	Pelarutan evaporit		
	logam			
senyawa	Logam	Pupuk, air permukaan	Adsorpsi,	
antropogenik		di jalan, polusi udara	pengendapan	
	Pestisida	Pertanian	Adsorpsi, transformasi	
	Senyawa organik	Tempat industri,	Penguapan,	
	yang mudah	tempat pembuangan	penyerapan,	
	menguap	sampah, lalu lintas	biodegradasi	

(1) sebagain berasal dari antropogenik

Sumber: Goldscheider dan Drew (2007)

2.2.4 Pendugaan Sungai Bawah Tanah

Teknik water tracing dikenal secara luas sebagai salah satu metode yang dapat dipertanggungjawabkan untuk mencari hubungan antar gua atau sistem sungai bawah tanah di akuifer karst. Salah satu aplikasi metode ini di Indonesia misalnya pernah dilakukan oleh MacDonalds and Partners (1984) untuk melacak sistem sungai bawah tanah di kawasan karst Gunung Sewu, Daerah Istimewa Yogyakarta. Hasil pelacakan tersebut sampai sekarang masih digunakan oleh pihak-pihak yang berkepentingan terhadap pengembangan sumberdaya air karst di wilayah tersebut. Teknik ini secara sederhana adalah memasukkan atau menuang zat pelacak pada aliran air di swallow hole, sungai yang akan masuk ke gua, atau ponor/sinkhole dan kemudian menghadang atau menjemput pada suatu lokasi yang diperkirakan mempunyai hubungan dengan titik awal tempat zat tracer dituangkan. Jika zat tracer yang kita tuang "tertangkap" secara fisik ataupun dengan alat pengukur (Fluorometer), maka dapat dipastikan bahwa terdapat hubungan antara titik penuangan zat tracer dengan titik pengamatan.

2.3 Kebutuhan Data

Data yang dikumpulkan dalam survei cepat kondisi hidrologi kawasan karst ini berupa data pengamatan hidrologi berupa koordinat mata air, gua, ponor/sinkhole dan *swallow hole*, jenis mata air, kondisi aliran, serta penggunaan

sumber air. Selain itu, dilakukan pula pengambilan data debit dan kualitas sungai (permukaan dan bawah permukaan), dan mata air.

2.4 Metode Pengukuran Debit

Beberapa hal yang dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk pengukuran debit aliran adalah kondisi tempat dan jaringan stasiun pengukuran. Kondisi tempat mempertimbangkan dua hal yaitu ketelitian pengukuran dan kestabilan penampang sungai. Beberapa persyaratan yang ditentukan untuk melakukan pengukuran debit aliran adalah:

- 1. Dapat dipakai untuk mengukur aliran rendah sampai tinggi;
- 2. Pada bagian yang relatif lurus;
- 3. Penampang sungai reguler;
- 4. Penampang sungai stabil (tidak terjadi *scouring* atau sedimentasi);
- 5. Tidak ada pengaruh aliran balik (*back water* atau jauh dari cabang sungai atau muara);
- 6. Tidak ada tumbuhan air: dan
- 7. Perubahan tinggi muka air nyata.

Sedangkan pertimbangan jaringan stasiun aliran memperhatikan hal berupa tujuan penelitian, kerekayasaan, tipe stasiun (utama, sekunder, khusus), dan kepadatan stasiun aliran. Debit aliran sungai dapat diukur dengan berbagai cara tergantung dari kondisi aliran air, alur sungai dan ketersediaan alat.

2.4.1 Metode Volumetrik

Metode volumetrik adalah cara mengukur debit secara langsung dengan manampung aliran air dalam gelas ukur atau ember yang diketahui volumenya. Hal yang dilakukan dalam perhitungan debit aliran dengan metode ini adalah mengukur lama pengisian tampungan dalam waktu tertentu. Debit (Q) = volume air per waktu. Cara ini tidak dapat digunakan untuk aliran besar dan cocok untuk mengukur debit mataair atau rembesan.

2.4.2 Slope Area Method

Debit aliran dapat pula dihitung atas dasar pengukuran kecepatan aliran dengan rumus hidraulik yaitu rumus Manning atau rumus Chezy serta pengukuran penampang basah. Kemiringan muka air, kekasaran dasar, luas penampang dan "wetted perimeter" perlu diukur di lapangan. Perkiraan debit aliran saat banjir yang tidak terukur dapat dilakukan dengan memperhatikan bekas muka air yang ditinggalkan oleh kejadian banjir. Rumus Manning diterapkan juga untuk menghitung kapasitas alur sungai atau saluran irigasi atau

saluran drainase kota. Rumus yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{R}^{1/3} + \mathbf{S}^{1/1}}{2} \qquad (2.1)$$

$$Q = \frac{AR^{1/3} \cdot S^{1/1}}{n}$$
 (2.2)

keterangan:

v = Velocity (Spesific discharge) (m/lt)

Q = discharge

R = radius hydraulic (m); didapat dari R = A/P

A = luas penampang basah (m²)

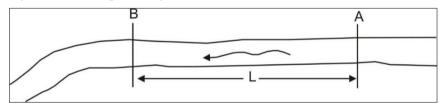
P = wetted perimeter

n = koefisien roughness Manning's (diantara 0,025 - 0,07 di saluran alami)

S = kemiringan sungai.

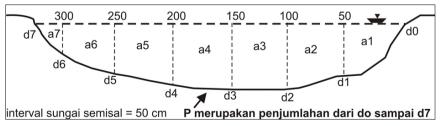
Langkah-langkah pengambilan data, sebagai berikut:

1. Pilih penggal sungai yang relatif lurus dengan lebar dan kedalaman yang relatif seragam, kemudian ukur panjang penggal sungai (L) yang akan digunakan untuk perhitungan debit (Gambar 2.3).



Gambar 2.3. Contoh Penentuan

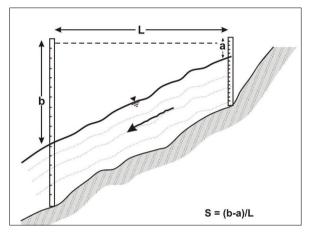
2. Buat Profil melintang dengan beberapa interval pada penggal sungai yang telah dipilih untuk mengetahui kedalaman dan jarak antar interval pengukuran kedalaman. Hasil pengukuran tersebut akan digunakan untuk menghitung luas penampang sungai dan panjang perimeter basah pada penggal yang dipilih.



Gambar 2.4. Contoh Profil Melintang Sungai

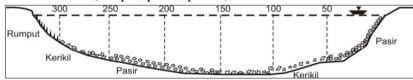
- 3. Ukur gradien hidraulik
 - a. Ukur jarak seksi (L)
 - b. Ukur beda tinggi muka air

$$S = \frac{b - a}{L} \qquad (2.3)$$



Gambar 2.5. Pengukuran Beda Tinggi Muka Air

- 4. Catat kondisi dasar saluran (untuk menetapkan nilai koefisien kekasaran manning (n)), perhatikan:
 - a. materi dasar sungai (lujmpur, pasir, gravel)
 - b. tumbuhan (rumput, perdu, pohon)



Gambar 2.6. Kondisi Dasar Sungai

2.4.3 Velocity Area Method

Debit aliran dapat pula dihitung atas dasar pengukuran kecepatan aliran dan luas penampang basah. Kecepatan aliran dapat diukur dengan *current meter* atau menggunakan metode apung (pelampung). Keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing dalam aplikasinya di lapangan.

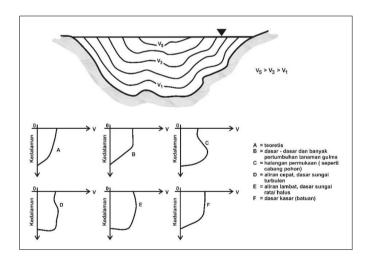
1. Pengukuran Kecepatan Aliran dengan Current Meter

Current meter (Gambar 2.7) adalah alat untuk mengukur kecepatan aliran. Setiap current meter mempunyai rumus kecepatan aliran. Persamaan umum yang ada misalnya $V_{air}=a+bn$, di mana a dan b adalah koefisien

regresi, sedangkan n adalah jumlah putaran baling dibagi dengan waktu. Pengukuran debit aliran dengan menggunakan *current meter* mencakup pengukuran kecepatan aliran dan pengukuran luas penampang basah. Mengingat bahwa distribusi kecepatan aliran baik arah horisontal dan vertikal tidak sama (Gambar 2.8), maka perlu teknik sampling pengukuran dan teknik perhitungannya. Contoh pengambilan sampel pengukuran kecepatan aliran ditunjukkan pada Gambar 2.9.

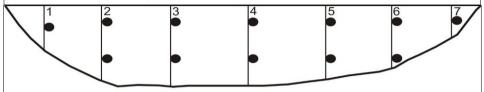


Gambar 2.7. Current Meter



Gambar 2.8. Distribusi kecepatan aliran sungai (Seyhan, 1990)

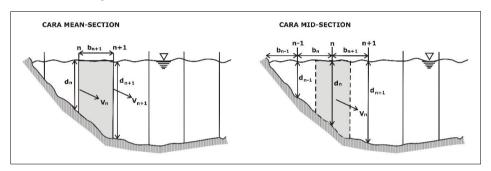
Pengukuran dibagi segmen-segmen (horizontal) 1,2 3, dst dengan jarak tertentu, dan pengukuran kecepatan arus vertikal dapat diukur dengan metode 1 atau 2 titik tergantung kedalaman segmen



Gambar 2.9. Contoh Sampling Pengukuran Kecepatan Aliran pada Suatu Penampang Sungai (Seyhan, 1990)

Perhitungan debit aliran dilakukan dengan mengalikan kecepatan aliran dengan luas penampang basah. Luas penampang basah dapat dihitung dengan beberapa cara seperti yang tersaji di Gambar 2.10. Beberapa cara tersebut meliputi:

- a. Mid section method
- b. Mean section method
- c. Graphical method



Gambar 2.10. Cara Menghitung Luas Penampang Basah (Soewarno, 2000)

Adapun langkah-langkah dalam melakukan pengambilan data dengan *current meter*, sebagai berikut:

- a. Pilih lokasi pengukuran debit dengan syarat-syarat sebagai berikut :
 - 1) penggal sungai terletak pada bagian yang relatif lurus;
 - 2) jauh dari pertemuan cabang sungai;
 - 3) dasar sungai relatif stabil;
 - 4) tidak ada gangguan dari tumbuh-tumbuhan air; dan
 - 5) aliran tidak melimpah melewati tebing sungai.
- b. Tentukan arah penampang melintang, harus t egak lurus arah aliran;
- c. Catat: tanggal pengukuran, nama sungai, lokasi pengukuran (koordinat dan administratif), nomor *current meter*, persamaan current meter yang digunakan dan sketsa pengukuran;
- d. Ukur lebar permukaan air sungai, temukan interval seksi (tidak boleh lebih besar dari 1/20 total lebar);

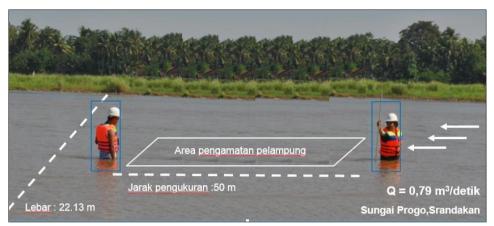
- e. Siapkan *current meter* (periksa jalannya putaran baling-baling dan bunyi "*siren horn*") serta cek apakah sudah terhubung dengan odometer sebagai pencatat banyaknya putaran;
- f. Siapkan stop watch untuk mengatur lamanya waktu pengukuran;
- g. Saat mulai pengukuran harap dicatat: waktu/jam, tinggi muka air (baca *staff gauge*), pengukuran dimulai dari tepi kanan atau kiri;
- h. Ukur jarak dari tepi air (titik nol) sampai dititik seksi tempat pengukuran kecepatan aliran (catat dalam kolom 1).
- i. Ukur kedalaman air pada seksi tersebut (d) dengan mistar ukur/stik *current meter* (catat dalam kolom 2); dan
- j. Pilih cara pengukuran kecepatan aliran, sesuai dengan point d (Tabel 2.3).

Tabel 2.3. Beberapa Cara Pengukuran Kecepatan Aliran dengan Menggunakan *Current Meter*

Tipe	Kedalaman Air (d)	Titik Pengamatan	Kecepatan rata-rata pada vertikal (V)	
Satu titik	0.3-0.6 m	0,6 dari permukaan	V = V	
Dua titik	0.6-3 m	0,2 dan 0,8 d	$V = \frac{1}{2}(V_2 + V_8)$	
Tiga titik	3-6 m	0,2; 0,6; 0,8 d	$V = \frac{1}{4} (V_2 + 2V_6 +$	
			V_8	
Lima titik	lebih 6 m	S; 0,2; 0,6; 0,8 dan B	$V = 1/10 (V_s + 3V_2 +$	
			$2V_6 + 3V_8 + V_b$	

2. Pengukuran Kecepatan Aliran dengan Pelampung

Bila kondisi aliran tidak memungkinkan diukur dengan *current meter*, kecepatan aliran dapat diukur dengan menggunakan pelampung. Perhitungan kecepatan aliran dengan pelampung dihitung dengan rumus Kecepatan aliran $(v_{air}) = k$ Vp. Di mana Vp adalah kecepatan pelampung yang diukur saat pengukuran dan k adalah koefisien koreksi dari pelampung yang digunakan. Gambar 2.11 menunjukkan cara pengukuran debit aliran dengan metode apung.



Gambar 2.11. Sketsa Pengukuran Metode Pelampung

Prinsip pengukuran dengan metode pelampung adalah kecepatan aliran diukur dengan menggunakan pelampung, luas penampang basah (A) ditetapkan berdasarkan pengukuran lebar permukaan air dan kedalaman air. Persamaan debit yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{A} \times \mathbf{k} \times \mathbf{U} \tag{2.4}$$

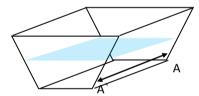
Keterangan

 $Q = debit aliran (m^3/dt)$

U = kecepatan pelampung (m/dt)

A = luas penampang basah (m²)

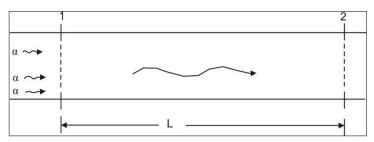
k = koefisien pelampung



Nilai k tergantung dari jenis pelampung yang digunakan, nilai tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Y.B. Francis) sebagai berikut :

$$k = 1-0,116 ((\sqrt{1-\alpha}) - 0,1)$$
 (2.5)

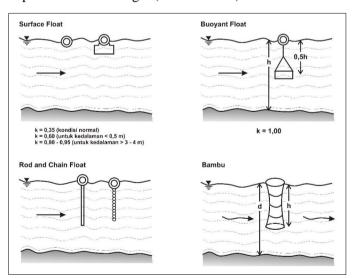
di mana : α = kedalaman tangkai (h) per kedalaman air (d), yaitu kedalaman bagian pelampung.



Gambar 2.12. Penggal Sungai yang Akan Digunakan untuk Pengukuran Debit Metode Apung

Langkah-langkah dalam metode pelampung, antara lain:

- a. Pilih lokasi pengukuran dengan syarat-syarat:
 - 1) Bagian sungai / saluran yang relatif lurus dan cukup panjang; dan
 - 2) Penampang sungai kurang lebih seragam.
- b. Tentukan 2 titik tempat pengamatan lintasan pelampung;
- c. Ukurlah lebar sungai (saluran);
- d. Ukurlah kedalaman sungai untuk beberapa tempat (plot di kertas grafik untuk menentukan luas penampang basah);
- e. Ukurlah kecepatan pelampung (minimal 3 kali pengukuran untuk mendapatkan hasil yang teliti), yaitu jarak tempuh pelampung (L) per satuan waktu; dan
- f. Tentukan koefisien pelampung dengan mengukur kedalaman pelampung yang basah per kedalaman sungai (Gambar 2.13).



Gambar 2.13. Tipe-Tipe Pelampung dan Penentuan Koefisien Pelampung (Seyhan, 1990)

2.4.4 Dillution Method

Debit aliran dihitung dengan mengunakan larutan yang mudah dideteksi dengan alat, misalnya dengan EC meter (biasanya digunakan larutan garam). Secara teknis, metode ini dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu: "continuous injection/ constant" dan "sudden injection". Metode ini baik digunakan untuk kondisi aliran turbulen, sungai dengan aliran kecil di pegunungan, atau jika penampang sungai tidak teratur. Rumus yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut:

1. Constant Injection

$$\mathbf{Q} = \mathbf{q} \frac{(\mathbf{c}\mathbf{2} - \mathbf{c}\mathbf{1})}{(\mathbf{c}\mathbf{1} - \mathbf{c}\mathbf{0})} \tag{2.6}$$

2. Sudden Injection

$$Q = \frac{v}{\tau} x \left(\frac{c2}{c1} \right) \tag{2.7}$$

Keterangan:

Q = debit aliran q = debit garam

 C_0 = konsentrasi garam di hulu C_1 = konsentrasi garam

di hilir

 C_2 = konsentrasi larutan garam yang dituang

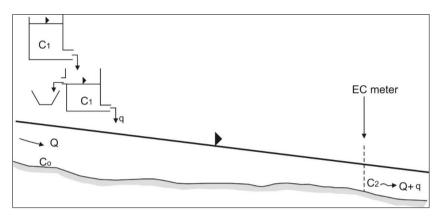
Langkah-langkah dalam pengambilan data, antara lain:

- Pilih lokasi pengukuran, yaitu lokasi injeksi dan lokasi pengukuran konsentrasi air campuran. Jarak kedua tempat supaya ditentukan yang representatif;
- 2. Siapkan larutan injeksi dan EC-meter (Gambar 2.14);



Gambar 2.14. EC Meter

3. Alirkan larutan secara konstan ke dalam aliran (Gambar 2.15). Ukur perubahan air sungai dengan EC-meter melalui daya hantar listriknya (DHL) dan catat setiap interval waktu tertentu. Pengukuran dilakukan sampai diperoleh DHL yang tetap. Langkah di atas digunakan untuk "Constant injection method". Untuk "sudden injection" dilakukan langkah pertama kemudian: lakukan langkah ke 4.



Gambar 2.15. Cara Penuangan Larutan ke Saluran pada *Constant Injection* (Asdak, 2007)

4. Siapkan larutan injeksi : ukur volumenya (V) dan konsentrasinya (C₁). Bila EC-meter telah siap, tuangkan larutan dengan tiba-tiba dan catat perubahan nilai DHLnya sampai nilainya kembali mendekati nilai DHL yang semula.

1.4.5. Metode Tracer

Langkah-langkah yang dilakukan dalam mempersiapkan uji tracer ini adalah:

- 1. Mensetting logger fluorometer, dengan konfigurasi sebagai berikut :
 - a. **SR** merupakan interval waktu perekaman yang diinginkan, dengan ketentuan sebagai berikut :

display	0	1	2	3	4	5	6	7
second	2 sec	3 sec	10	30	1	2	5	15
			sec	sec	min	min	min	min

- b. **ST** merupakan perintah untuk mulai dan berhenti melakukan perekaman, dengan ketentuan kode "0" untuk mulai akuisisi data, dan "1" untuk perintah stop.
- c. **Number 1** merupakan kode zat pelacak yang digunakan. Untuk uranin kode "1"

- d. **Number 2** diisikan kode "0" ketika perekaman tidak terhubung dengan laptop, atau kode "1" ketika perekaman terhubung dengan laptop.
- e. **Number 3** diisikan kode "0" untuk menampilkan millivolt, dan kode "1" untuk menampilkan ppb di layar LCD.
- f. **Number 4 d**iisikan kode "0" untuk amplifikasi 1x, dan kode "1" untuk amplifikasi 10x.
- 2. Membuka kedua katup pada instrument air fluorometer, kemudian menutup salah satu katup dengan penutup karet.
- 3. Memasang kabel yang menghubungkan logger dengan instrument air fluorometer.
- 4. Mencelupkan atau memasang instrument air fluorometer di air, dengan sensor atau katup yang terbuka menghadap arah aliran.
- 5. Menyalakan logger dengan cara menghubungkan secara parallel dengan battery 12 Volt.
- 6. Melakukan penuangan zat pelacak di titik injeksi. Adapun kuantitas zat pelacak yang diperlukan mengacu pada rumus yang dikemukakan oleh Goldscheider (2007), yakni:

$$M = L X k X B$$
(2.8)

keterangan M = kuantitas zat pelacak yang diperlukan (kg), L = jarak dari titik injeksi dengan titik observasi (km), k = koefisin zat pelacak yang digunakan. Untuk uranine koefisiennya "1", B = faktor kondisi hidrogeologi, untuk daerah karst nilainya sebesar 0.1 - 0.9.

2.5 Pengambilan Sampel Air

2.5.1 Tipe Sampel Air yang Diambil

Hadi (2007) menyebutkan bahwa tipe sampel air dibedakan menjadi tiga, yaitu (1) Sampel Sesaat (*grab sample* atau *discrete sample*), (2) sampel gabungan (*composite sample*) dan (3) sampel terpadu (*integrated sample*). Sampel Sesaat adalah sampel yang diambil pada satu waktu tertentu. Hasil analisis dengan pengambilan sampel ini hanya akan menggambarkan kondisi kualitas air pada sesaat pengambilan sampel air dilakukan.

Sampel gabungan merupakan campuran dua atau lebih sampel sesaat ke dalam sebuah wadah untuk dilakukan uji di laboratorium. Pengambilan dengan metode ini memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode pengambilan sesaat karena menggambarkan rerata konsentrasi parameter uji selama periode pengambilan sampel air. Selain itu, metode sampel gabungan memiliki kelebihan berupa biaya yang lebih murah dibandingkan dengan biaya uji beberapa sampel sesaat yang diambil pada periode yang sama. Sampel

gabungan dibagi menjadi dua, yaitu sampel gabungan waktu (*time composite sample*) dan sampel gabungan waktu (*location composite sample*). Sampel gabungan waktu adalah campuran beberapa sampel sesaat yang diambil pada titik yang sama dengan volume dan interval waktu yang sama dam dikumpulkan dalam satu wadah untuk diuji di laboratorium. Sampel gabungan tempat adalah sampel yang diambil pada beberapa tempat untuk menghasilkan dalam satu waktu untuk menghasilkan nilai rata-rata suatu parameter pada wilayah kajian.

Tipe sampel yang terakhir adalah tipe sampel terpadu. Sampel terpadu adalah penggabungan beberapa sampel gabungan tempat dan gabungan waktu (Permen Lingkungan Hidup Nomor 01 Tahun 2010 Tentang Tata Laksana Pengendalian Pencemaran Air). Pengambilan dilakukan pada beberapa titik pada suatu penampang sungai pada suatu waktu yang hampir bersamaan. Pengambilan dilakukan dengan penggabungan sampel air yang diambil pada beberapa kedalaman secara bersamaan (*deep integrated sample*) serta pada beberapa bagian dari penampang. Hasil pengambilan sampel kemudian digabungkan untuk mendapatkan nilai rerata parameter yang dikaji. Hasil metode ini akan mencerminkan nilai suatu parameter pada setiap bagian penampang yang diambil sampelnya dan nilai parameter pada berbagai kedalaman pada penampang amatan. Metode ini adalah metode yang akan dilakukan dalam penelitian ini, mengingat metode ini relatif lebih representatif untuk pengambilan sampel suatu wilayah dengan waktu yang relatif singkat, murah dan mudah dalam pengulangannya di masa mendatang.

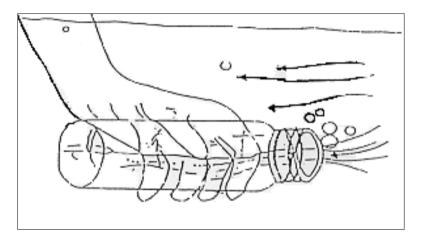
2.5.2 Jumlah Sampel Air yang Diambil dalam Satu Penggal Sungai

Banyaknya sampel air pada suatu penggal sungai ditentukan berdasarkan pada debit aliran suatu sungai. Hal ini sesuai dengan yang dikemukakan Effendi (2003) dan metode yang disarankan pada SNI 6989.57:2008 tentang Metoda Pengambilan Contoh Air Permukaan. Banyaknya sampel berdasarkan debit aliran sungai ditentukan sebagai berikut:

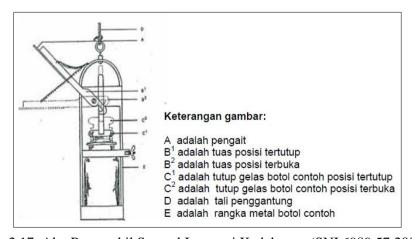
- 1. Pada sungai dengan debit kurang dari 5 m³/detik, sampel air diambil pada satu titik di tengah sungai pada o,5 x kedalaman sungai;
- 2. Pada sungai dengan debit antara 5 150 m³/detik, sampel diambil pada dua titik, masing-masing pada jarak 1/3 dan 2/3 lebar sungai pada 0,5 x kedalaman sungai;
- 3. Pada sungai dengan debit lebih dari 150 m³/detik, sampel air diambil minimum pada enam titik, masing-masing pada jarak ¼, ½, dan ¾ lebar sungai pada kedalaman 0,2 x kedalaman dan 0,8 kedalaman sungai.

2.5.3 Teknik Pengambilam Sampel Air

Teknik pengambilan sampel air pada lokasi amatan dilakukan dengan prosedur yang disarankan pada SNI 6989.57:2008 tentang Metoda Pengambilan Contoh Air Permukaan. Pengambilan langsung akan dilakukan dengan dua cara, yakni pengambilan langsung dengan botol sampel polietilen (Gambar 2.16) dan pengambilan menggunakan pengambil alat dengan integrasi kedalaman (Gambar 2.17). Pengambilan langsung dengan botol sampel polietilen dilakukan pada sungai dengan kedalaman yang dangkal, sedangkan pengambilan menggunakan pengambil alat dengan integrasi kedalaman dilakukan untuk sungai dengan kedalaman yang tidak memungkinkan dilakukannya pengambilan sampel secara langsung.



Gambar 2.16. Pengambilan Sampel Air Langsung Menggunakan Botol Sampel Polietilen (SNI 6989.57:2008)



Gambar 2.17. Alat Pengambil Sampel Integrasi Kedalaman (SNI 6989.57:2008)

2.5.4. Teknik Pengambilam Sampel Air untuk Uji Isotop

Pengambilan sampel air untuk uji isotope memerlukan metode khusus dibandingkan dengan pengambilan sampel air biasa. Pengambilan sampel air untuk uji isotope dilakukan dengan menggunakan botol sampel khusus seperti yang nampak pada Gambar 2.18. Pengambilan sampel dilakukan seperti pada pengambilan sampel air, yakni dengan mencelupkan seluruh tubuh botol ke dalam air hingga penuh. Penutupan botol dilakukan di dalam air. Pengambilan sampel air untuk uji isotope berhasil jika tidak terdapat gelembung udara sedikitpun di dalam botol sampel yang telah ditutup. Sampel isotop yang akan dianalisis harus segera disimpan dalam *Ice Box* atau di dalam kulkas penyimpan sampel.



Gambar 2.18. Botol Sampel Air untuk Uji Isotop (https://www.immunochemistry.com/products/necrosis-vs-apoptosis-assay-kit-1129.html)

Daftar Pustaka

- Appelo, C.A.J. dan Postma, D. 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Asdak, C. 2007. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Edisi IV*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Atkinson, T.C. 1985. Present and Future Directions in Karst Hydrogeology. Annal. Soc. Geol. Belgique, 108: 193-296.
- Effendi, H. 2003. Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan. Yogyakarta: Penerbit Kanisius.
- Fardiaz, S. 1992. Polusi Air dan Udara. Yogyakarta: Penerbit Kanisius.
- Ford, D. dan Williams, P. 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chicester, West Sussex: John Wiley and Sons, Ltd.
- Gilli, E.; Mangan, C. Dan Murdy, J. 2012. *Hydrogeology: Objectives, Methods, Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Gillieson, D. 1996. Caves: Processes, Development and Management. Oxford: Blackwell.
- Goldscheider, N. 2005. Karst Groundwater Vulnerability Mapping- Application of a New Method in The Swabian Aib, Germany. *Hydrogeology Journal*, 13(4): 555-564.
- Goldscheider, N. dan Drew, D. 2007. Methods in Karst Hydrology. London: Taylor and Francis.
- Hadi, A. 2007. *Prinsip Pengelolaan Pengambilan Sampel Lingkungan*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Haryono, E. dan Adji, T, N. 2004. Geomorfologi dan Hidrologi Karst. Yogyakarta: Kelompok Studi Karst Fakultas Geografi UGM
- MacDonalds And Partners. 1984. *Greater Yogyakarta: Groundwater Resources Study. Vol. 3c: Cave Survey.* Yogyakarta: P2AT.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.
- Permen Lingkungan Hidup Nomor 01 Tahun 2010 Tentang Tata Laksana Pengendalian Pencemaran Air.
- Ravbar, N. 2007. The Protection of Karst Water. Postojna: ZRC Publishing.
- Seyhan, E. 1990. *Dasar-Dasar Hidrologi (terjemahan Sentot Subagyo)*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Smart, P.L. dan Hobbes, S.L. 1986. Characteristics of Carbonate Aquifers: A Conceptual Basis. In *Proceedings Environmental Problem in Karst Terrains and Their Solution*. Bowling Green, KY: National Well Water Assosiation, 1-4.
- SNI 6989.57: 2008 tentang Metoda Pengambilan Contoh Air Permukaan.
- Soewarno. 2000. *Hidrologi Operasional Jilid Kesatu*. Bandung: PT Citra Aditya Bakti.
- White, W.B. 1988. *Geomorphology and Hydrology of* Karst *Terrains*. New York, Oxford: Oxford University Press.

Saran Sitasi:

Widyastuti, M.; Cahyadi, A. dan Sasongko, M.H.D. 2016. Hidrologi dan Hidrogeologi Karst. dalam Haryono, E. (Editor) 2016. *Pedoman Praktis Survei Terintegrasi Kawasan Karst*. Yogyakarta: Badan Penerbit Fakultas Geografi (BPFG) Universitas Gadjah Mada. Halaman: 20-43.