Serial Powerpoint Presentasi: KOMPONEN-KOMPONEN ALIRAN KARST

Tjahyo Nugroho Adji
Karst Research Group
Fak. Geografi UGM

SISTEM HIDROLOGI KARST

A. Pendahuluan

- Karst Gunung Sewu dikenal sebagai kawasan yang tandus, dan selalu menderita kekurangan air
- Apakah memang betul demikian??
- Terdapat beberapa SBT dengan debit yang besar (Bribin-1500 lt/dt, Seropan –400 lt/dt, Baron-8000 lt/dt, Ngobaran-150 lt/dt), ratusan mataair, dll
- Kontroversi tentang maraknya kegiatan² yang dianggap berpotensi mengancam SBT dan mataair, apakah memang benar berpengaruh? Atau tidak ada pengaruhnya?

C. Peranan Aliran *Diffuse* dan Bukit Karst

Komponen aliran karst dibedakan menjadi 2 tipe:

1. aliran *diffuse*
2. *aliran fissure*
3. aliran *conduit*

DIFFUSE FLOW SYSTEM

Approaches "Darcy" Flow

CONDUIT FLOW SYSTEM

Approaches Pipe Flow

Aliran *Diffuse*

- ❑ mengisi SBT secara seragam dan perlahan-lahan
- ❑ melalui retakan berukuran 10^{-3} - 10 mm
- ❑ sebagai aliran infiltrasi dari zone simpanannya di permukaan bukit karst
- ❑ air tetesan atau rembesan pada ornamen gua
- ❑ debit andalan saat kemarau (satu-satunya)

Aliran *Conduit*

- ❑ mengisi SBT dengan cepat
- ❑ berhubungan langsung dengan air permukaan
- ❑ melalui retakan berukuran 10^2 - 10^4 mm atau lebih
- ❑ dipasok ketika hujan dan mengakibatkan banjir pada SBT
- ❑ keruh dan bahan pencemar ikut masuk bersama aliran ini
- ❑ tidak ada saat kemarau

Aliran *Diffuse* disimpan di mana??

- ❑ Sebagai satu-satunya debit andalan saat musim kemarau
- ❑ permukaan dari bukit-bukit karst itulah yang berperan sebagai reservoir utama
- ❑ disebut sebagai zone epikarst / subcutaneous zone
- ❑ lapisan dimana terdapat konsentrasi air hasil infiltrasi air hujan
- ❑ zone teratas yang tersingkap dari batuan karst yang memiliki permeabilitas dan porositas paling tinggi dibanding lapisan² lain
- ❑ berperan sebagai media penyimpan yang baik
- ❑ berkontribusi sebagai penyedia aliran andalan di SBT bahkan pada periode kekeringan yang panjang

- *fissure flow*, komponen aliran pengisi sungai bawah tanah dari akuifer yang mengalir melalui retakan-retakan pada batuan gamping yang berukuran 10^{-10^2} mm (Bonacci, 1990)

D. Aktivitas Penambangan Batugamping di Daerah Tangkapan SBT Bribin

- ❑ gamping bertipe keprus/*chalky limestone*
- ❑ tepat berada di atas alur sungai utama Bribin
- ❑ lokasi sisa penambangan tanpa konservasi
- ❑ sekitar 50 buah bukit sudah, dan sedang ditambang (**data tahun 2007**)

Zona epikarst-cadangan air

Sebagian
besar tepat
diatas alur
SBT Bribin

Adakah Dampak Penambangan Terhadap Air SBT Bribin?

1. Terjadi degradasi jumlah air yang tersimpan sebagai komponen sungai Bribin karena hilangnya bukit karst.

- ❑ porositas sekundernya yang mencapai lebih dari 30% pada zone epikarst (bukit karst bagian atas) berperan sangat penting sebagai reservoir utama kawasan ini.
- ❑ porositas sebesar itu tergolong besar dan sangat berpotensi untuk menyimpan air dalam jumlah yang besar.
- ❑ SBT dengan sistemnya hanya berperan sebagai media pengumpul dan pengatus (*drainage*) yang menerima tetesan dan rembesan air dan membuangnya ke laut
- ❑ berapa jumlah kehilangan simpanan air yang akan timbul jika 1 (satu) buah bukit karst sebagai suatu media penyimpan utama air ditebas untuk keperluan penambangan??, berapa jika 10..., 20...100...500... bukit ditambang??, dst

Areal Sampel	Karakteristik	Porositas (%)		
		Batuan	Rongga Pelarutan	Endapan Isian
Karst poligonal di Kec. Panggang	Batugamping terumbu yang keras dan dangkal, karren dan rongga pelarutan intensif, dijumpai banyak mataair	1,1-14,0	22,0-52,0	40,0-58,9
Karst Labirin di Kec. Saptosari dan Tepus	Batugamping terumbu yang keras dan dalam, karren dan rongga pelarutan intensif, jaringan lembah kering intensif, tidak terdapat mataair	13,0-16,6	22,0-52,0	36,6-40,2
Karst tower-cone di Kec. Ponjong bagian selatan	Batugamping berlapis, lunak dan dalam, karren tidak berkembang baik, bukit terpencar dengan dataran planasi, tidak diketemukan mataair	23,1-48,2	< 10,0	20,6-31,9
Sumber: Haryono (2001)				

2. Akan terjadi perubahan perilaku waktu tunda terhadap hujan puncak pada puncak debit mataair maupun SBT.

- ❑ Air yang tertampung di bukit karst pada zone epikarst akan teratus perlahan-lahan melalui celah-celah vadose, rekahan, dan selanjutnya mengisi aliran bawah tanah yang terus berkembang menjadi sungai bawah tanah.
- ❑ mata air ataupun sungai bawah tanah di DAS Bribin akan mempunyai waktu tunda setelah kejadian hujan selama beberapa saat
- ❑ berkurangnya zona epikarst pada permukaan bukit gamping akan merubah perilaku pengisian komponen *diffuse* yang menjadi komponen air andalan pada saat musim kemarau.
- ❑ Sebaliknya, waktu tunda puncak banjir bisa menjadi lebih cepat setelah kejadian hujan karena rusaknya fungsi **regulator** pada permukaan bukit karst (epikarst).

Nama gua	Waktu menuju puncak banjir (jam)	Waktu menuju aliran <i>diffuse</i> (jam)
Gua Gilap	1,5 – 5	7 – 192
Gua Bribin	2 – 9,5	5 – 192
Gua Ngreneng	2,5 – 7,5	9 – 240

3. Akan ada perubahan komposisi aliran dasar (*diffuse flow*) dibanding aliran total pada SBT

- persentase aliran dasar terhadap aliran total SBT otomatis akan berkurang.
- meningkatkan agresivitas airtanah
- proses pelarutan akan menjadi semakin cepat, perkembangan lorong-lorong pada akuifer karst akan semakin cepat, dan pelebaran lorong SBT akan semakin cepat.
- fungsi akuifer karst sebagai penahan air sebelum dilepaskan menuju SBT akan berkurang, sehingga akan lebih sulit mempertahankan jumlah debit andalan saat musim kemarau
- Dampak yang sangat tidak diharapkan adalah bertambahnya persentase aliran *conduit* saat musim hujan (banjir) tetapi berkurangnya persentase aliran *diffuse* saat musim kemarau.

NO	BULAN	PAD (%)			MUSIM
		GILAP	BRIBIN	NGRENENG	
1	Mei 2006	80,41	97,03	80,35	kemarau
2	Juni 2006	80,47	98,40	80,36	kemarau
3	Juli 2006	80,93	98,53	80,37	kemarau
4	Agustus 2006	81,66	98,64	80,38	kemarau
5	September 2006	81,77	98,70	80,38	kemarau
6	Oktober 2006	82,09	99,14	80,38	kemarau
7	November 2006	82,36	99,40	80,38	kemarau
8	Desember 2007	80,11	97,44	81,78	hujan
9	Januari 2007	84,86	98,87	82,93	hujan
10	Pebruari 2007	77,49	97,22	83,48	hujan
11	Maret 2007	82,94	97,07	82,41	hujan
12	April 2007	82,85	98,26	81,78	hujan

NO	GUA GILAP		GUA BRIBIN		GUA NGRENENG	
	WAKTU BANJIR	PAD (%)	WAKTU BANJIR	PAD (%)	WAKTU BANJIR	PAD (%)
1	13/12/06 jam 19:00	45,08	6/12/06 jam 22:30	98,38	13/12/06 jam 19:30	41,43
2	22/12/06 jam 15:30	55,52	7/12/06 jam 23:00	99,02	15/12/06 jam 18:30	44,68
3	31/12/06 jam 06:30	57,75	13/12/06 jam 19:30	86,16	18/12/06 jam 13:30	50,85
4	16/2/07 jam 16:30	57,25	29/12/06 jam 00:30	77,72	20/12/06 jam 18:30	43,88
5	24/2/07 jam 19:00	51,25	30/12/06 jam 17:00	82,69	22/12/06 jam 20:30	44,68
6	26/2/07 jam 18:00	58,55	16/2/07 jam 18:00	92,29	5/2/07 jam 17:00	45,68
7	6/3/07 jam 21:00	79,91	22/2/07 jam 21:00	81,81	19/2/07 jam 20:30	40,79
8	9/3/07 jam 19:00	78,18	23/2/07 jam 20:00	84,51	20/2/07 jam 20:00	59,77
9	14/3/07 jam 02:00	78,92	28/2/07 jam 01:30	89,91		
10	19/3/07 jam 00:00	72,75	7/3/07 jam 05:00	99,05		
11	21/3/07 jam 08:00	77,20	7/4/07 jam 22:00	95,50		
12	23/3/07 jam 08:00	50,88	27/4/07 jam 20:00	97,25		
13	7/4/07 jam 01:30	70,33				
14	10/4/07 jam 18:00	62,94				
15	11/4/07 jam 15:00	76,30				
16	16/4/07 jam 23:30	73,80				
Rerata		65,41	90,36		46,47	

Gua Gilap

Gua Bribin

4. Adanya degradasi atau kemungkinan pencemaran kualitas air

- salah satu hal yang paling dikhawatirkan adalah karena posisi penambangan adalah tepat diatas S. Bribin.
- penambangan bukit karst dapat memotong *vertical cavities* atau lorong vertikal sebagai penghubung zona permukaan dan sungai bawah tanah.
- tidak akan ada lagi filter atau saringan yang dapat menahan berbagai macam polutan dari permukaan (limbah, pemupukan, sampah, dll)

Parameters	Petung River	Tegoan River	Sumurup sinkhole	Suci Sinkhole	Bribin Cave	Baron
7 February 2005 (wet season)						
NO ₃	1.6	4.4	2.6	2	4.2	3
NO ₂	0	0	0	0	0	0
Cr ₆	0	0.401	0.46	0.042	0	0.46
Cu	0	0	0	0	0	0
Zn	0.003	0.02	0	0	0	0.04
Cd	0.01	0	0	0.01	0.01	0
Pb	0.22	0	0	0.21	0	0.12
BOD	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2
COD	2.8	2.3	2.1	1.8	1.8	3.1
Coli bacteria	> 2400	> 2400	> 2400	> 2400	>2400	>2400
25 May 2005 (dry season)						
NO ₃	3	2.4	2	3	2.2	0
NO ₂	0	0	0	0	0.01	0
Cr ₆	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-	-	-
Cd	-	-	-	-	-	-
Pb					-	-
BOD	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
COD	3.6	3.3	4.9	4.2	3.6	7.5
Coli bacteria	75	20	7	21	9	1100

5. Pengurangan fungsi karst sbg. penyerap karbon, pengkonsumsi karbon, dan penyeimbang siklus karbon

- ❑ Mengurangi efek rumah kaca dan pemanasan global
- ❑ rata-rata CaCO_3 “dimakan” oleh proses pelarutandi Gunung Sewu Karst adalah 185 mg/l

- ❑ tingkat denudation Gunung Sewu Karst diestimasi sebesar $50,91 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{th}$
- ❑ Setara 165.464 ton CaCO_3 /tahun
- ❑ Setara 72.804,16 ton karbondioksida/tahun

Spatial and temporal variation of CO₂ rest in the karst water after dissolving limestone

E.

Kesimpulan

- ❑ sebagai sebuah sistem, maka SBT Bribin-Baron mempunyai komponen-komponen yang terkait satu sama lain;
- ❑ mempunyai input, media penyimpan--proses, dan output;
- ❑ dapat berkurang simpanannya jika media penyimpanan (bagian dari siklus hidrologi) terganggu
- ❑ kegiatan bermotif ekonomi pada sistem ini harus dilakukan dengan penuh kehati-hatian, dibatasi peruntukannya;
- ❑ Jika rusak media penyimpanannya (sistem retakan), tidak mungkin dapat dipulihkan kembali dengan cara apapun.

Spatial and temporal variation of CO₂ rest in the karst water after dissolving limestone

Butuh monitoring perilaku aliran *diffuse*, yaitu aliran yang sifatnya lambat untuk mengetahui apakah potensi air karst berkurang atau tetap, terkait:

1. Persentasenya dibanding aliran *conduit*;
2. Responnya terhadap hujan yang turun di kawasan tangkapannya;
3. Kualitasnya

Kombinasi jenis aliran untuk penentuan perkembangan karst

Karstification degree	Groundwater flow sub-regimes type	Characteristic recession curve equation	Characteristics of recession-curve parameters	Characteristics of karstification degree
0.5 1.0	Single laminar sub-regime, lower values of α_1	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t}$	$\alpha_1 < 0.001$ $\alpha_1 = 0.001-0.0025$	Usually tectonic faults and shear zones filled with crushed material, with high buffering capability in relation to discharge. Mainly deeper groundwater circulation
2.0 2.3	Single laminar sub-regime, higher values of α_1		$\alpha_1 = 0.0025-0.007$ $\alpha_1 > 0.007$	Tectonic faults filled with crushed material with higher permeability and lower buffering capability in relation to discharge. In some cases deeper groundwater circulation
2.5 2.7 3.0	Combination of two or more sub-regimes with merely laminar flow characterised by different discharge coefficients, lower values of α_1 and α_2	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t}$	$\alpha_1 < 0.0024$ and $\alpha_2 < 0.033$ $\alpha_1 < 0.0024$ or $\alpha_2 < 0.033$ $\alpha_1 = 0.0024-0.0045$; $\alpha_2 = 0.033-0.067$	Aquifer with dense, prevailingly regular fissure network, with majority of micro-fissures and small fissures. Increase of values α_1 and α_2 accompanies increasing permeability and also higher heterogeneity of fissured rock environment
3.5 3.7 4.0	Combination of two or more sub-regimes with merely laminar flow characterised by different discharge coefficients, higher values of α_1 and α_2		$\alpha_1 = 0.0024-0.0043$ and $\alpha_2 = 0.060-0.16$ $\alpha_1 > 0.0043$ and $\alpha_2 < 0.060$ $\alpha_1 = 0.0041-0.018$ and $\alpha_2 = 0.055-0.16$	Aquifer with irregularly developed fissure network, with majority of open macrofissures, also with possible presence of karst conduits of limited extent. In extreme cases, even short-term turbulent flow might occur in this type of rock environment
4.3 4.7 5.0	Discharge hydrogram is composed of a sub-regime with turbulent flow and a sub-regime with laminar flow. Substantial role in groundwater discharge plays the sub-regime with laminar flow	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{04}(1 - \beta_1 t)$	$\alpha_1 > 0.018$ or $\alpha_2 > 0.16$ $\alpha_1 > 0.018$ and $\alpha_2 > 0.16$ β and α low values	Aquifer with anticipated existence of crushed water-bearing zone (e.g., fault zone) or by dense network of open small fissures in combination with simple, partly (or occasionally) phreatic conduit system of considerable extent (e.g., with open karstified fault in the vadose zone)
5.5	Complex discharge regime, a combination of one sub-regime with turbulent flow and two sub-regimes with laminar groundwater flow. Discharge sub-regime with turbulent flow is of short-term influence in comparison with overall groundwater discharge	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + Q_{04}(1 - \beta_1 t)$	$\alpha_1 > 0$ and $\alpha_2 > 0$ and $\beta_1 > 0$	Extensive disruption and disintegration of rock environment, with majority of open, medium size, both not karstified and karstified fissures in the phreatic zone of the fissure karst aquifer (according to α_1) and with smaller influence of connected conduits (groundwater of large karstic channels, according to β_1)
6.0	Very complex discharge regime, a combination of two sub-regimes with turbulent flow and two sub-regimes with laminar groundwater flow. Discharge sub-regimes with turbulent flow are of short-term influence in comparison with overall groundwater discharge	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + Q_{04}(1 - \beta_1 t) + Q_{05}(1 - \beta_2 t)$	β_2 , β_1 and α_1 , α_2 high values	Extensive disruption and disintegration of rock environment, with majority of open, medium size, both not karstified and karstified fissures in the phreatic zone of the fissure karst aquifer (according to α_1) and with smaller influence of connected conduits (groundwater of large karstic channels, according to β_1 and β_2)

Karstification degree	Groundwater flow sub-regimes type	Characteristic recession curve equation	Characteristics of recession-curve parameters	Characteristics of karstification degree
7.0	Discharge regime is a combination of one sub-regime with laminar flow with two to three sub-regimes with turbulent flow. Substantial role in groundwater discharge plays the sub-regime with laminar flow	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{04}(1 - \beta_1 t) + Q_{05}(1 - \beta_2 t) + Q_{06}(1 - \beta_3 t)$	$\beta_3, \beta_2, \beta_1$ and α high values, $\beta_1 > \beta_2$	Developed karstification of the aquifer, formed by large open tectonic faults and karstic channels, as well as by significant portion of karstified and non-karstified fissures and micro-fissures in rock blocks, generating phreatic zone with karstic groundwater table
8.0	Discharge regime is a combination of a sub-regime with laminar flow with two to three sub-regimes with turbulent flow. Substantial role in groundwater discharge is played by sub-regimes with turbulent flow. Sub-regime with laminar flow is less significant		$\beta_3, \beta_2, \beta_1$ and α high values	Highly developed karstification of the aquifer, formed by large open conduits (karst channels). Presence of open active small fissures and micro-fissures is reduced. Circulation of substantial part of groundwater is mainly via preferred pathways of channel systems. Phreatic zone is missing or its role is insignificant
8.5	Groundwater flow regime is represented merely by turbulent flow, with only one turbulent flow sub-regime present, which represents turbulent circulation in channel systems (conduits) without hydraulic connection to the groundwater in adjacent rock blocks. Groundwater circulation is mostly connected to vadose zone	$Q_t = Q_{04}(1 - \beta_1 t)$	$\alpha_1; \alpha_2 = 0$ and $\beta_1 > 0$	Karstic aquifer with well-developed conduit system, without any significant connection to open phreatic fissure systems in adjacent rock blocks. Extensively developed conduit system can ensure permanent groundwater replenishment
9.0	Groundwater flow regime is represented merely by turbulent flow, consisting of two turbulent flow sub-regimes. These represent turbulent circulation in channel systems (conduits) without hydraulic connection to the groundwater in adjacent rock blocks. Groundwater circulation is mostly connected to vadose zone	$Q_t = Q_{04}(1 - \beta_1 t) + Q_{05}(1 - \beta_2 t)$	β_1, β_2 low values	Karstic aquifer with well-developed conduit systems of karstic groundwater pathways, without any significant connection to open phreatic fissure systems in adjacent rock blocks. Replenishment of groundwater resources can still be ensured by extensively developed conduit system
10.0	Complex turbulent flow regime of groundwater discharge, consisting of three different turbulent flow sub-regimes. Probability of a very complex groundwater circulation by occasional flows in the vadose zone. Documented only in perennial flows	$Q_t = Q_{04}(1 - \beta_1 t) + Q_{05}(1 - \beta_2 t) + Q_{06}(1 - \beta_3 t)$	β_1, β_2 and β_3 high values	Karstic aquifer with extensive conduit system, without any significant connection to open phreatic fissure systems in adjacent rock blocks. In its spatial extent, the conduit system is bound only to the vadose zone, without enabling permanent groundwater replenishment

Banjir 30 Desember 2006

Jika karst sudah berkembang (G. Bribin)

15 April 2014

Jika karst dewasa (G. Ngerong-Tuban)

Banjir 10 Februari 2014

Jika karst muda (Mataair Petoyan)

2 komponen utama airtanah karst

Ford & Williams, 1992

Conduit Flow

Tipe aliran	Karakteristik	Kondisi Daerah Tangkapan	Simpanan
Conduit	<ul style="list-style-type: none"> • Perpipaan (streamsink) • Sangat cepat dan sensitif terhadap hujan 	<ul style="list-style-type: none"> • Banyak luweng dengan sinkhole dan ponor 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendah dan hanya pada saat musim hujan
Fissure	<ul style="list-style-type: none"> • Percelahan • Respon sedang terhadap hujan 	<ul style="list-style-type: none"> • Fracture • Joint 	<ul style="list-style-type: none"> • Sedang dan perenial musiman
Diffuse	<ul style="list-style-type: none"> • Menyebar • Respon lambat terhadap hujan 	<ul style="list-style-type: none"> • Fracture • Intergranuler 	<ul style="list-style-type: none"> • Besar dan sepanjang tahun

Smart & Hobbes (1986); Gillieson (1996)

Flood hydrograph

DEBIT BULANAN

SELONJONO (lt/dt)
Tinggi tempat 475 m dpal
Tipe terdrainase bebas
Perenial
Jernih di musim penghujan

GREMENG (m3/dt)
Tinggi tempat 250 m dpal
Tipe resurgence
Perenial
Keruh dimusim penghujan

TELENG (lt/dt)
Tinggi tempat 250 m dpal
Tipe terbendung
Perenial
Jernih di musim penghujan

PONJONG (lt/dt)
Tinggi tempat 225 m dpal
Tipe terbendung
Perenial
Jernih di musim penghujan

BENDUNGAN (m3/dt)
Tinggi tempat 437,5 m dpal
Tipe terbendung
Perenial
Jernih di musim penghujan

GEDAREN (lt/dt)
Tinggi tempat 250 m dpal
Tipe terbendung
Perenial
Jernih di musim penghujan

Epikarst sebagai tandon utama

DIFFUSE FLOW SYSTEM

Approaches "Darcy" Flow

CONDUIT FLOW SYSTEM

Approaches Pipe Flow