

ANILISIS AKUIFER ANGGOTA BATUGAMPING LAM KABEU - PIDIE DENGAN METODE POROSITAS SEKUNDER

Arip Munawir¹³, Arif Jauhari¹³, M Oki Kurniawan², Andi Nur Muhammad²

¹Pusat Studi Manajemen Bencana (PSMB) dan Magister Manajemen Bencana (MMB) UPN 'Veteran' Yogyakarta

²LSM Kawasan Ekosistem Mangrove Pantai Sumatera (KEMPRA)

³Indonesian Speleological Society (ISS)

Email: ariefkomic@gmail.com

ABSTRAK

Aquifer karst berbeda dari aquifer nonkarst karena adanya jaringan pembuluh dengan bentuk tak beraturan yang saling berintegrasi. Anggota Batu Gamping Lam Kabeu (Qtzsl) menurut Peta Geologi Regional Lembar Banda Aceh Skala 1 : 250.000 tersusun dari batu gamping koral. Dan termasuk dalam cekungan air tanah (CAT) Sigli, dengan lapisan air tanah mengarah Utara dan Tenggara. Sebagai CAT yang tersusun batu gamping, ada kalanya didominasi oleh sistem conduit dan ada kalanya pula tidak terdapat lorong-lorong conduit tetapi lebih berkembang sistem diffuse, sehingga hanya mempunyai pengaruh yang sangat kecil terhadap sirkulasi air tanah. Porositas kawasan menjadi penentu terjadinya infiltrasi atau aliran kebawah tanah, rata-rata porositas sekunder batu gamping Lam Kabeu adalah 5% - 45%. Arah kelurusannya menunjukkan kearah puncak perbukitan yang memiliki sinkhole/dolina, dan semakin besar nilai ketebalannya menunjukan arah utara serta tenggara.

Kata Kunci : Anggota Batu Gamping Lam Kabeu, Akuifer Karst, Conduit, Diffuse, Porositas Sekunder, Sinkhole/Dolina, Pidie, Aceh.

PENDAHULUAN

Ford dan Williams (1989) menjelaskan karst sebagai bentang alam dengan kondisi hidrologi yang khas sebagai akibat dari batuan yang mudah larut dan mempunyai porositas sekunder yang berkembang baik. Karst ditandai terdapatnya cekungan tertutup dan atau lembah kering dalam berbagai ukuran dan bentuk, langkanya atau tidak terdapatnya pengatusan/sungai permukaan, dan terdapatnya goa dari sistem pengatusan bawah tanah. Karst bukan hanya terjadi di daerah berbatuan karbonat, tetapi bisa terjadi juga di batuan lain yang mudah larut dan mempunyai porositas sekunder (kekar dan sesar intensif), seperti batuan gipsium dan batugaram. Tapi demikian, karena batuan karbonat mempunyai sebaran yang paling luas, karst yang banyak ditemui adalah karst yang berkembang di batuan karbonat.

Kondisi hidrologi di daerah karst memiliki karakteristik yang sangat berbeda jika dibandingkan dengan kondisi hidrologi di daerah bukan karst. Perbedaan paling tampak adalah adanya perkembangan sungai bawah permukaan yang jauh lebih dominan daripada berkembangnya sungai permukaan. Hal tersebut terjadi karena proses geomorfologi yang mengontrol pembentukan karst adalah proses pelarutan (White;1993). Gillieson (1996) menjelaskan, goa-goa dan sungai bawah tanah ini disebut sebagai porositas lorong atau secara hidrogeologis dikenal sebagai porositas sekunder. Karena

sifatnya yang seperti tersebut, maka masyarakat di daerah karst pada umumnya terkesan kesulitan dalam menemukan sumber air untuk mencukupi kehidupan mereka sehari-hari, padahal di bawah sebenarnya terbentuk sungai bawah tanah yang terkadang memiliki debit bisa mencapai ribuan liter/detik.

Anggota Batugamping Lam Kabeu (Qtzsl) menurut Peta Geologi Regional Lembar Banda Aceh Skala 1 : 250.000 tersusun dari batu gamping koral. Dan termasuk dalam cekungan air tanah (CAT) Sigli, dengan lapisan air tanah mengarah Utara dan Tenggara. Anggota batu gamping Lam Kabeu berada di dua kecamatan, yaitu Kec.Muara Tiga dan Kec.Betee yang termasuk dalam Kabupaten Pidie – Provinsi Aceh. Sebagai CAT yang tersusun batu gamping, ada kalanya didominasi oleh sistem conduit dan ada kalanya pula tidak terdapat lorong-lorong conduit tetapi lebih berkembang sistem diffuse, sehingga hanya mempunyai pengaruh yang sangat kecil terhadap sirkulasi air tanah karst. Tetapi, pada umumnya suatu daerah karst yang berkembang baik mempunyai kombinasi dua element tersebut.

1. Akuifer

Terminologi atau batasan terkait dengan perlapisan geologi dan memiliki peranan penting bagi ketersediaan airtanah adalah akuifer (*aquifer*), akiklud (*aquiclude*), dan akitard (*aquitard*) (Sudarmadji;2013). Akuifer adalah suatu unit geologi yang dapat menyimpan dan mendistribusikan air dalam jumlah yang cukup. Sementara itu, unit geologi yang tidak dapat dilalui air disebut *aquiclude*, sedangkan *aquitard* adalah unit geologi dengan permeabilitas rendah yang dapat menyimpan dan mendistribusikan air secara lambat.

Aquifer karst berbeda dari *aquifer* bukan karst karena memiliki jaringan pembuluh atau saluran-saluran seperti pipa dengan bentuk tak beraturan yang saling terintegrasi. *Aquifer* karst sangat unik karena di dalamnya terdapat tiga jenis porositas sekaligus, yakni porositas matriks (pori-pori antar butir), porositas retakan, dan porositas rongga (Kusumayudha;2004).

Domenico dan Schwartz (1990) membagi sifat aliran di karst menjadi dua, yaitu (1) aliran rembesan (*diffuse*) dan (2) aliran saluran/lorong (*conduit*). Aliran *diffuse* adalah aliran yang masuk ke sungai bawah tanah melalui proses infiltrasi yang terjadi perlahan-lahan melewati zona *epikarst* dan kemudian mengimbuh sungai bawah tanah berupa tetesan atau rembesan-rembesan, sedangkan aliran *conduit* adalah aliran yang mengimbuh sungai bawah tanah melalui ponor yang ada di permukaan, dan melewati rongga-rongga yang besar dengan kecepatan aliran yang cepat (Adji;2005).

2. Sinkholes/Dolina

Anggota batu gamping Lam Kabeu memiliki banyak fenomena Karst. Selain goa, *sinkholes* atau dolina sangat sering dijumpai pada batugamping yang segar maupun lapuk. Proses pembentukan *sinkholes* akan memicu terjadinya amblesan tanah. Amblesan tanah ini terjadi karena adanya proses pelarutan batuan bawah permukaan oleh air dan hal ini umum terjadi pada batuan karbonat (batugamping, dolomit), endapan garam dan gypsum.

Amblesan pada batugamping diakibatkan karena proses pelarutan batu gamping secara terus menerus sehingga celah berkembang menjadi rongga, dan apabila bagian atas dari rongga terlalu lemah, maka amblesan di permukaan dapat terjadi. Kejadian

amblesan di daerah karst terkait dengan proses pembentukan *sinkholes*. Proses pembentukan *sinkholes* dibagi menjadi enam jenis, yaitu: *solution sinkhole*, *collapse sinkhole*, *dropout sinkhole*, *buried sinkhole*, *caprock sinkhole*, dan *suffusion sinkhole* (Waltham dkk;2005).

Cekungan karst adalah suatu bentuk fitur karst permukaan yang menjadi indikator penting untuk karakterisasi tingkat perkembangan karst. Cekungan karst seperti *sinkhole* juga dapat digunakan sebagai dasar penilaian kondisi infiltrasi permukaan, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar penilaian kerentanan bentang alam karst. Meskipun berdasarkan kontur pada peta dolina memiliki bentuk lingkaran yang hampir konsentris namun ternyata dolina memiliki bentuk yang tidak selalu membundar (Haryono;2010).

Dolina dapat mendistribusikan air dari permukaan ke bawah permukaan, melalui pembuluh yang terlebar, atau melalui *soil* menuju ke sistem atau jaringan saluran bawah tanah (goa) dibawah permukaan (Kusumayudha;2004). Dolina yang terbentuk pada bentang alam karst dapat tertutupi oleh lapisan tanah (*overburden*) dengan ketebalan yang berbeda-beda. Diketahui bahwa pola garis aliran (liniasi) lembah-lembah karst di permukaan pada umumnya mempunyai tingkat kerumitan yang berbanding lurus dengan pola saluran yang ada dibawah permukaan.

3. Porositas

Porositas (α) atau kesarangan batuan adalah rasio antara volume pori-pori batuan (V_{pori}) dengan total volume batuan (V_{tot}), seperti yang ditotasikan pada rumus ini :

$$\alpha = \frac{V_{\text{pori}}}{V_{\text{tot}}} \dots\dots\dots(1)$$

Besar kecilnya porositas tergantung dari jenis dan matrik pada batuan itu sendiri. Berbicara mengenai besarnya porositas batuan karbonat pada daerah karst tidak hanya tergantung dari matrik batuan, tetapi lebih tergantung dari proses lanjutan setelah batuan itu terbentuk atau muncul di permukaan bumi. Secara umum porositas batuan dibedakan menjadi dua tipe yaitu:

Porositas primer, yaitu porositas yang tergantung dari matrik batuan itu sendiri; dan **Porositas sekunder**, yaitu porositas yang lebih tergantung pada proses sekunder seperti adanya rekahan ataupun lorong hasil proses solusional

Dalam hal ini, jika dikatakan bahwa batuan karbonat di daerah karst mempunyai porositas yang besar adalah lebih signifikan karena adanya pelorongan hasil pelarutan sehingga lebih dominan digolongkan sebagai porositas sekunder. Kesimpulannya, batuan gamping yang belum terkarstifikasi akan memiliki nilai porositas jauh lebih kecil dibandingkan dengan batuan gamping yang telah terkarstifikasi dengan baik. Batuan gamping dan juga dolomit yang belum terkarstifikasi memiliki kisaran nilai porositas yang sangat kecil (maksimal 10%). Sebaliknya, jika batuan gamping telah terkarstifikasi akan memiliki nilai porositas yang tinggi (mencapai 50%).

Pada bukit-bukit karst, porositas yang berkembang adalah porositas sekunder yang terjadi bukan karena sifat asli dari batugamping, tetapi lebih disebabkan proses sekunder berupa pelarutan batugamping pada rekahan yang membentuk rongga antar batuan dan akhirnya saling berhubungan (*protocave*). *Protocave* inilah yang sebenarnya merupakan bentukan awal dari sistem per-go-an yang berperan sebagai saluran pada sistem hidrologi karst. Riset dari Haryono, menyimpulkan bahwa proporsi pelarutan yang membentuk porositas batuan terbesar terjadi pada permukaan bukit-bukit termasuk zona tanah, dan semakin vertikal kebawah mengecil karena mengecilnya energi pelarutan. Daya larut yang semakin mengecil ini dikarenakan oleh bertambahnya tingkat kejenuhan (*saturation indices*) air terhadap mineral karbonat (CaCO_3) kearah bawah.

Terbentuknya rongga pelarutan juga terkonsentrasi pada permukaan bukit karst (*epikarst*) dan semakin berkurang jumlahnya ke arah bawah dan mencapai lapisan yang tidak tembus air (*impermeable*). Rongga-rongga tersebut terisi tanah yang juga memiliki porositas secara individual karena sifat fisiknya (tekstur, dll). Untuk menghitung porositas total bukit karst, dapat ditentukan dengan menghitung porositas rongga batuan, porositas tanah isian, serta porositas batuan itu sendiri yang secara bersama-sama mempunyai peranan penting sebagai media penyimpan air karst.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi kawasan karst seperti Lam Kabeu terbentuk oleh adanya proses karstifikasi yang terjadi dalam kurun waktu geologi. Proses karstifikasi dikontrol oleh beberapa hal seperti karakteristik batuan karbonat, curah hujan, dan ketinggian penyingkapan (Haryono dan Adjie;2004). Batuan karbonat yang kompak dan tebal dengan memiliki banyak celah lebih berpotensi mengalami proses karstifikasi. Proses karstifikasi tersebut selanjutnya ditentukan oleh curah hujan yang turun pada wilayah tersebut. Curah hujan yang tinggi lebih memungkinkan terjadinya pelarutan, terlebih jika air hujan tersebut banyak mengandung CO_2 .

Ketinggian singkapan mempengaruhi lamanya air bergerak dalam rekahan vertikal batuan karbonat. Semakin lama pergerakan air pada rekahan vertikal akan memperbesar peluang air tersebut melarutkan batuan karbonat. Kecepatan proses karstifikasi selanjutnya dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi penutup dan temperatur. Vegetasi penutup menghasilkan sersah yang lama-kelamaan akan hancur. Hancuran sersah tersebut merupakan sumber CO_2 yang bersama dengan air akan melarutkan batuan karbonat.

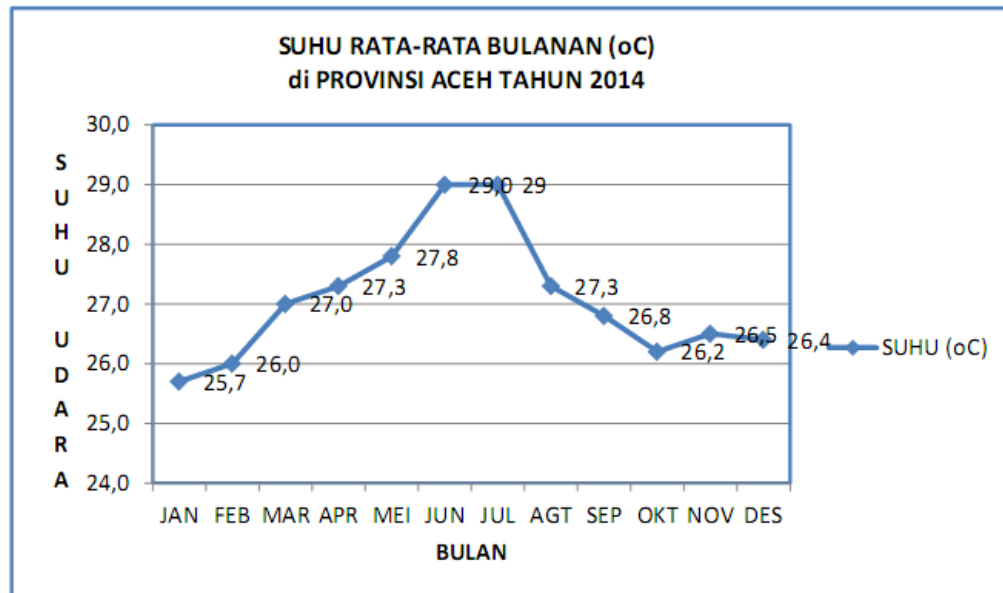
Curah hujan (ch) untuk Kabupaten Pidie dari 2008 – 2012 rata-rata adalah 1.854,6 mm/tahun dengan 118 hari hujan (hh) seperti ditunjukan pada Tabel 1. Nilai tertinggi dari curah hujan Kab.Pidie sendiri terjadi pada tahun 2008 dengan 3.183 mm, dan untuk hari hujan tertinggi terjadi pada tahun 2011 dengan 141 hari hujan. Bulan oktober – januari menjadi bulan dengan curah hujan dan hari hujan tertinggi disetiap tahunnya.

Tabel 1. Perkembangan curah hujan dan hari hujan menurut bulan di Kab.Pidie , 2008 – 2012 (Sumber: BPS - Kabupaten Pidie Dalam Angka;2014)

No.	Bulan/ month	2008		2009		2010		2011		2012	
		ch	hh	ch	hh	ch	hh	Ch	hh	ch	hh
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Januari	190	7	437	19	141	9	237	16	151	11
2	Februari	44	2	65	3	23	6	78	10	117	11
3	Maret	337	12	163	7	74	7	165	15	135	13
4	April	304	10	231	5	177	9	120	11	130	12
5	Mei	212	9	53	9	73	6	78	9	98	9
6	Juni	187	7	63	3	116	8	29	5	21	3
7	Juli	233	12	5	1	82	8	74	8	46	5
8	Agustus	345	11	75	8	46	3	104	11	82	7
9	September	238	7	54	6	210	11	111	10	112	9
10	Oktober	207	8	54	8	132	7	146	14	109	9
11	November	477	16	169	15	197	23	163	16	125	11
12	Desember	409	18	392	17	211	19	203	16	212	12
Jumlah Total		3183	119	1761	101	1482	116	1510	141	1337	112
Rata-rata		265,25	9,92	146,75	8,42	123,50	9,67	125,81	11,75	111,43	9,33

Data-data hasil analisis kualitas air hujan yang dilaksanakan oleh BMKG Stasiun Indrapuri Aceh untuk data bulan Januari, April, Oktober dan Desember 2014. Hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat keasaman (pH) air hujan di Indrapuri Aceh pada bulan-bulan tersebut berada dibawah Nilai Ambang Batas (NAB) pH air hujan normal sebesar 5,6. Kondisi ini menunjukkan bahwa hujan yang turun di Indrapuri Aceh bersifat asam. Menurut Turdgil (1985), keasaman tanah menjadi salah satu faktor karstifikasi pada proses pelarutan. Proses keasaman tanah dipengaruhi oleh hujan dan aktivitas biologi (pembusukan), maka air hujan yang asam dapat di netralisir oleh karst dan membantu proses pelarutan.

Suhu rata-rata bulanan di Provinsi Aceh dalam derajat celcius disajikan pada Gambar 2 suhu tertinggi terdapat di bulan Juni dan Juli dengan rata-rata 29° C dan suhu terendah pada pada bulan Januari dengan suhu rata-rata 25° C. Bulan Okober sampai dengan bulan Desember dimana sedang berlangsung musim hujan, suhu udara cenderung tetap di kisaran 26° C, sedangkan di musim kemarau pada bulan Maret sampai bulan Mei, suhu udara rata-rata pada kisaran 27° C (Laporan SLHD Provinsi Aceh;2014).



Gambar 1. Suhu rata-rata bulanan di Provinsi Aceh Tahun 2014
 (Laporan SLHD Provinsi Aceh;2014)

Temperatur mendorong proses karstifikasi terutama dalam kaitannya dengan aktivitas organisme. Daerah dengan temperatur hangat seperti di daerah tropis merupakan tempat yang ideal bagi perkembangan organisme yang selanjutnya menghasilkan CO₂ dalam tanah yang melimpah. Tutupan hutan juga merupakan faktor pendorong perkembangan karena hutan yang lebat akan mempunyai kandungan CO₂ dalam tanah yang melimpah akibat dari hasil perombakan sisa-sisa organik (dahan, ranting, daun, bangkai binatang) oleh mikro organisme.

Anggota batugamping Lam Kabeu berada pada perbukitan dengan ketinggian 70 – 110 MDPL (Meter Diatas Permukaan Laut) dengan kemiringan 5° – 40°. Perbukitan itu sendiri di timur berbatasan dengan laut, utara dan tenggara berbatasan dengan alluvium dengan ketinggian daratan <15 MDPL. Barat dan selatan sendiri berbatasan dengan perbukitan yang masuk dalam Formasi Seulimeum dengan penyusunnya batu pasir tuffan dan gampingan. Anggota batugamping Lam Kabeu memiliki permukaan yang terekspose tinggi dari muka air laut, dan hal diatas juga yang mempengaruhi aliran lepas air tanah kearah utara serta tenggara.

Walupun batugamping mempunyai lapisan tebal tetapi hanya terekspos beberapa meter di atas muka laut, karstifikasi tidak akan terjadi. Drainase vertikal akan terjadi apabila julat/jarak antara permukaan batugamping dengan muka air tanah atau batuan dasar dari batugamping semakin besar. Semakin tinggi permukaan batugamping terekspose, semakin besar julat antara permukaan batugamping dengan muka air tanah dan semakin baik sirkulasi air secara vertikal, serta semakin intensif proses karstifikasi.

1. Pembentukan dan bentuk *Sinkholes*/Dolina

Penentuan sampel *sinkholes*/dolina dilakukan dengan cara survey lapangan serta interpretasi data spasial. Dan ada 14 *sinkholes*/dolina yang dijadikan sampel (Tabel 2) dinilai dari proses pembentukannya serta berada pada ketinggian 80 – 110 MDPL. Sampel *sinkholes*/dolina tersebut ditentukan dengan karakteristik tertentu dimaksud

agar terlihat variasi bentukan yang ada. Serta pada ketinggian tertentu agar tampak pola akuifer pada permukaan batu gamping yang terekspose dari muka air laut.

Tabel 2. Sampel data *sinkholes*/dolina

Kode	Koordinat (Geografis)	Elevasi (MDPL)	Bentukan	Luas (Ha)
D1	5°27'38.44"N - 95°52'31.61"E	100	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.18
D2	5°27'35.55"N - 95°52'30.95"E	101	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.12
D3	5°27'53.57"N - 95°52'54.26"E	93	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.22
D4	5°27'54.06"N - 95°52'49.30"E	92	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.49
D5	5°28'5.03"N - 95°52'31.82"E	111	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.45
D6	5°28'5.92"N - 95°52'14.62"E	110	<i>Collapse sinkholes</i> <i>Doline asimetri</i> yang terkontrol oleh lapisan batuan	0.17
D7	5°28'14.44"N - 95°52'6.26"E	110	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.13
D8	5°28'23.82"N - 95°52'7.64"E	106	<i>Suffusion sinkholes</i> <i>Doline asimetri</i> yang terkontrol aliran permukaan	0.42
D9	5°28'31.05"N - 95°52'14.05"E	100	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	2.23
D10	5°28'35.79"N - 95°52'7.46"E	108	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.22
D11	5°28'59.00"N - 95°52'16.17"E	99	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	1.28
D12	5°29'5.12"N - 95°52'21.85"E	96	<i>Suffusion sinkholes</i> <i>Doline asimetri</i> yang terkontrol aliran permukaan	1.13
D13	5°29'9.97"N - 95°52'27.97"E	90	<i>Suffusion sinkholes</i> <i>Doline asimetri</i> yang terkontrol oleh lapisan batuan	0.12
D14	5°29'8.96"N - 95°52'31.00"E	82	<i>Buried sinkholes</i> <i>Doline simetri</i>	0.17

Sampel data *sinkholes*/dolina diatas menunjukkan 3 variasi dari proses pembentukannya dan 3 variasi dari bentuknya. Karakteristik *Buried sinkholes* ada 10 sampel, *Suffusion sinkholes* dengan 3 sampel, dan *Collapse sinkholes* berjumlah 1 sampel. Proses terjadinya *Buried sinkhole* terjadi karena adanya proses pembebanan dan kompaksi yang dialami oleh endapan penutup secara perlahan dan waktu yang lama. *Suffusion sinkholes* terjadi jika lapisan penutup tersusun atas endapan pasir, dan *collapse sinkhole* tidak memiliki litologi atau endapan penutup di atas batu gamping.

Berdasarkan bentuknya, *sinkholes*/dolina juga dapat dibedakan menjadi doline simetri dan doline asimetri. Doline simetri berbentuk bulat atau elips (oval) dengan kemiringan lereng ke segala arah yang hampir sama, sedangkan doline asimetri merupakan doline yang sisi satu dan lainnya mempunyai kemiringan lereng berbeda. Doline asimetri terbentuk karena perkembangan dolina terkontrol oleh aliran permukaan dan struktur atau karena lereng (Ford and Williams;1992). Doline simetri dari data ada 10 sampel, doline asimetri yang terkontrol aliran permukaan ada 2 sampel, dan doline asimetri yang terkontrol oleh lapisan batuan ada 2 sampel.



Gambar 2. Sebaran *sinkhole*/dolina di batugamping Lam Kabeu

Pola akuifer dari kenampakan *sinkholes*/dolina dari 14 sampel menunjukkan berkembangnya sistem *diffuse* diantara sistem *conduit*. Aliran *diffuse* mengisi sungai bawah tanah secara seragam dan perlahan-lahan melalui retakan-retakan yang berukuran 10^{-3} -10 mm (Ford and Williams;1992) sebagai aliran infiltrasi dari zone simpanannya di permukaan bukit karst. Contohnya adalah apa yang terjadi pada dolina dengan kode D1 dengan elevasi 100 MDPL dengan luas 0.18 Ha. Dolina D1 berada tepat diatas lorong selatan Goa Toknara yang masuk dalam Sistem Goa Tengku. Ketebalan yang dilewati antara dolina D1 dengan lorong selatan Goa Toknara adalah 35 meter. Perhitungan tersebut didapat dari elevasi lorong selatan hasil dari pemetaan adalah 65 MDPL.

Sementara aliran *conduit* dicontohkan pada *sinkholes*/dolina dengan kode D12 yang alirannya masuk kedalam Goa Kerungkung. Mulut 1 Goa Kerungkung yang berada pada elevasi 92 MDPL berarah lurus menerima aliran air dari D12 dengan elevasi 96 MDPL. *Sinkholes*/dolina D12 dengan luas 1.13 Ha menjadi tadah air hujan yang dialirkan secara langsung kedalam Goa Kerungkung. Akibatnya, jika ada masukan aliran yang besar melalui pelorongan ini, maka air di sungai bawah tanah akan cepat naik dan semua pencemar dapat ikut masuk kedalam.



Gambar 3. Goa Tengku dan dolina D2 (kiri) Goa Kerungkung dan dolina D12 (kanan)

2. Porositas sekunder Batu Gamping Lam Kabeu

Seperti telah dijelaskan, porositas adalah kesarangan batuan berdasarkan rumus volume batuan dengan volume pori-pori. Porositas sendiri terbagi dua jenis, yaitu porositas primer dan sekunder. Dalam tulisan ini akan dikedepankan porositas sekunder hasil dari pemetaan goa yang dilakukan pada 6 goa (Tabel 3) di perbukitan anggota batu gamping Lam Kabeu. Porositas sekunder yaitu porositas yang lebih tergantung pada adanya rekahan ataupun lorong hasil proses solusional.

Tabel 3. Porositas sekunder dan orientasi lorong goa di Batu Gamping Lam Kabeu

No.	Nama Goa	Jumlah Mulut Goa	Sistem Goa	Koordinat (Geografis)	Porositas Sekunder	Orientasi (Rose Diagram)
1	Goa Tengku	3	- Goa Tengku - Goa Rimung - Goa Toknara	5°27'37.48"N 95°52'38.01"E	5% - 19.8%	Tenggara N110° Radius 36.6 m Ketebalan 38.4 m
2	Goa Mie	3	- Goa Mie Vertikal - Goa Mie Horizontal - Goa Selimung	5°27'39.57"N 95°52'37.02"E	7.3% - 22%	Timur Laut N45° Radius 11 m Ketebalan 12.1 m
3	Goa Kerungkung	2		5°29'5.62"N 95°52'22.93"E	11.6% - 32.3%	Barat N275° Radius 9.1 m Ketebalan 5.8 m
4	Goa Gerundong	4	- Goa Gerundong - Goa Tempu	5°29'10.26"N 95°52'24.63"E	13% - 42.5%	Barat Laut N292° Radius 8.8 m Ketebalan 3.5 m
5	Goa Tujoh	Multi Aven		5°29'11.03"N 95°52'26.64"E	9.4% - 24.8%	Utara N350° Radius 66.1 m Ketebalan 30.7 m
6	Goa 9	1		5°29'13.86"N 95°52'27.81"E	16% - 44.6%	Selatan N190° Radius 6.1 m Ketebalan 9.6 m

Goa Kerungkung, Goa Mie dan Goa Tujoh merupakan goa-goa yang memiliki pola aliran *conduit*. Untuk Goa Kerungkung sudah dijelaskan bahwasannya menjadi tempat masuknya air hujan yang ditadah oleh dolina D12. Dan Goa Tujoh yang memiliki banyak jendela/pintu terdefiniskan menerima aliran air hujan yang ditadah

oleh dolina D13. Hal inilah yang menyebabkan pada stasiun 12h Goa Tujoh memiliki lorong vertikal yang tembus ke lapisan lorong bagian bawah (level 2).

Namun walaupun Goa Kerungkung dan Goa Tujoh alirannya bertipe *conduit*, pada lantai-lantai goa-nya ditemukan sedimen lempung yang cukup tebal. Dan sebagaimana diketahui bahwa lempung bersifat kedap air, *top soil* lantai goa memiliki ketebalan 5-7cm, gamping pasir 20-30cm dan lempung 30-45cm. Artinya ketika aliran air hujan masuk kedalam lorong goa, maka proses *diffuse* terjadi dilorong-lorong goa. Penyebab tidak ditemukannya sungai bawah tanah di lorong goa dimungkinkan karena air masuk dalam kantong-kantong air dilapisan *permeabilitas* lantai goa. Sehingga terjadi proses *diffuse* didalam goa yang membuat sungai bawah tanah ada dibawah lapisan goa.

Bukti yang ditemukan di lorong Goa Mie mengindikasikan bahwa pernah ada aliran *conduit* yang masuk dan mengalir menjadi sungai bawah tanah. Terdapatnya bangkai kepiting di celah lorong bawah Goa Mie mengindikasikan jauhnya sistem sungai bawah tanah. Kepiting sendiri memiliki daya jelajah yang jauh, sementara di perbukitan tidak ditemukan sungai permukaan. Tipe aliran Goa Mie adalah *conduit* dikarenakan memiliki mulut goa vertikal dan mulut goa *slope* serta ditemukan banyak sampah yang tersangkut pada lorong aliran. Lantai lorong aliran memiliki ketebalan sedimentasi seperti di Goa Tujoh, yaitu terdiri dari *top soil*, gamping pasir dan lempung. Sehingga terjadi proses *diffuse* dilorong goa hingga mengering di musim kemarau.



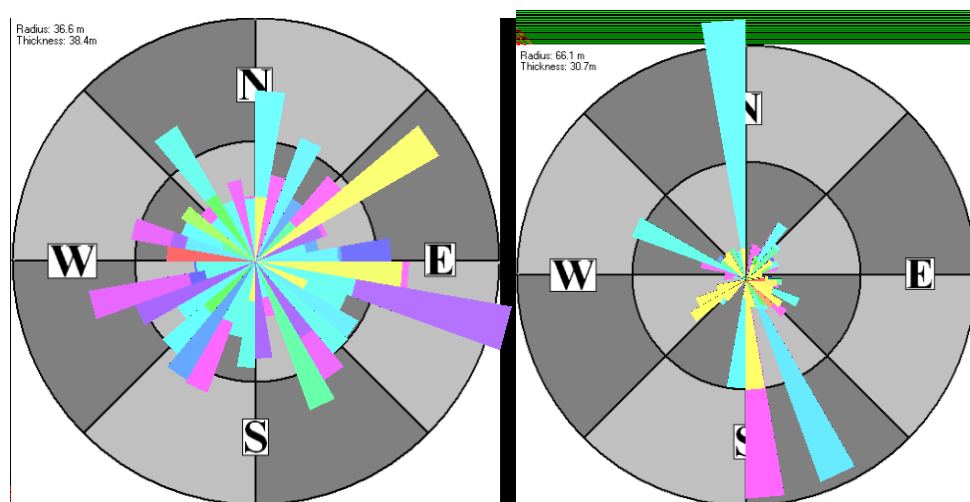
Gambar 4. Sedimen lempung dilantai Goa Tujoh (kiri) dan Bangkai kepiting lorong Goa Mie (kanan)

Porositas Goa Kerungkung adalah 11% - 32%, Goa Tujoh adalah 9% - 24%, dan Goa Mie adalah 7% - 22%. Batuan gamping yang belum terkarstifikasi akan mempunyai nilai porositas yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan batuan gamping yang telah terkarstifikasi dengan baik. Batuan gamping dan juga dolomit yang belum terkarstifikasi mempunyai kisaran nilai porositas yang sangat kecil (0%-10%). Sebaliknya, jika batuan gamping telah terkarstifikasi akan mempunyai nilai porositas yang tinggi (5%-50%) (Haryono;2010).

Orientasi hasil dari *rose diagram* menunjukkan adanya pola akuifer yang dipengaruhi kelurusan baik oleh sesar maupun kekar (Ford and Williams;1992). Goa Tengku memiliki arah orientasi tenggara (N110°) dan Goa Mie memiliki arah orientasi timur laut (N45°). Goa Tengku dan Goa Mie yang berada pada satu kompleks

dengan masing-masing sistemnya memiliki arah yang berbeda. Namun arah dari keduanya menunjukkan ke puncak perbukitan yang memiliki *sinkhole*/dolina dengan tipe aliran *diffuse*.

Begitupun Goa Kerungkung memiliki arah orientasi barat (N275°), Goa Gerundong memiliki arah orientasi barat laut (N292°), dan Goa Tujoh memiliki arah orientasi utara (N350°). Sementara Goa 9 arah orientasinya berlawanan yaitu menuju selatan (N190°), namun arah kelurusannya menunjukkan kepuncak perbukitan yang memiliki aliran *diffuse*. Dan semakin tinggi nilai radius serta ketebalannya, maka pola kelurusannya menunjukkan arah utara dan tenggara sama seperti arah lepasan air tanah CAT Sigli.



Gambar 5. Rose Diagram Goa Tengku (kiri) dan Goa Tujoh (kanan)

KESIMPULAN

Tingkat Karstifikasi berperan penting di dalam pembentukan struktur bawah tanah dari daerah karst. Hal tersebut diakibatkan adanya pelarutan batu gamping oleh kandungan CO₂ yang dihasilkan oleh air yang meresap dari permukaan ke sungai bawah tanah. Perbukitan batu gamping Lam Kabeu memiliki keanekaragaman *sinkhole*/dolina baik dari proses pembentukannya maupun bentuknya. Namun lebih banyak jenis pembentukan *Buried sinkholes* dan dari bentuknya *Doline simetris*, hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi proses pembebanan dan kompaksi pada endapan penutup dengan waktu yang lama.

Secara definitif, air pada sungai bawah tanah di daerah karst boleh disebut sebagai air tanah merujuk definisi air tanah oleh Todd (1980) bahwa air tanah merupakan air yang mengisi celah atau pori-pori/rongga antar batuan dan bersifat dinamis. Porositas kawasan menjadi penentu terjadinya infiltrasi atau aliran kebawah tanah, rata-rata porositas sekunder batu gamping Lam Kabeu adalah 5% - 45%. Arah kelurusannya menunjukkan kearah puncak perbukitan yang memiliki *sinkhole*/dolina, dan semakin besar nilai ketebalannya menunjukkan arah utara serta tenggara.

Anggota Batu Gamping Lam Kabeu (Qtzsl) sebagai Cekungan Air Tanah (CAT) memiliki gabungan dari sistem aliran *conduit* dan *diffuse* maka karakteristik akuifer-nya adalah :

- a. *Sinkhole*/dolina terdapat di puncak perbukitan dengan pembebanan serta kompaksi yang kuat karena telah terjadi infiltrasi air permukaan kedalam rongga batuan dibawahnya dalam jangka waktu yang lama. Sistem aliran *diffuse* berkembang baik menjadi indikasi nilai infiltrasi air yang baik dari pencemaran permukaan, dan adanya proses karstifikasi dibawah permukaan pada rongga bumi.
- b. Nilai porositas sekunder di Batu Gamping Lam Kabeu menunjukkan batu gamping terkarstifikasi, dan berkembang sistem aliran *conduit* pada Goa Mie, Goa Kerungkung, dan Goa Tujoh. Sedimentasi pada lantai lorong menandakan telah terjadi proses penggenangan diwaktu yang lama, sehingga aliran *conduit* berubah menjadi aliran *diffuse* didalam goa.
- c. Epikarst Batu Gamping Lam Kabeu menjadi kantong-kantong air yang besar dan terdistribusi pada kelurusan arah Utara serta Tenggara. Karakteristik akuifer Batu Gamping Lam Kabeu menjadi imbuhan yang baik bagi CAT Sigli, melalui sistem aliran *conduit* maupun *diffuse*.

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, Tjhayo Nugroho, 2005, *Kondisi Daerah Tangkapan Sungai Bawah Tanah Karst Gunung Sewu Dan Kemungkinan Dampak Lingkungannya Terhadap Sumber Daya Air (Hidrologis) Karena Aktifitas Manusia*, Yogyakarta:Kelompok Studi Karst UGM.
- BPS Pidie. 2015. *Kabupaten Pidie Dalam Angka, 2014*. Kantor Badan Pusat Statistik Kab.Pidie.
- DLHK Aceh. 2015. *Laporan Status Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Aceh, 2014*. Dinas Lingkungan Hidup Propinsi Aceh.
- Ford, D. and Williams, P. 1992. *Karst Geomorphology and Hydrology*, Chapman and Hall, London.
- Haryono, E. Dan T. N. Adji. 2010. *Geomorfologi dan hidrologi karst : Buku Ajar*. Kelompok Studi Karst. Fakultas Geografi. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Kusumayudha, Sari B, 2005, *Hidrogeologi Karst Dan Geometri Fraktal di Daerah Gunung Sewu*, Yogyakarta:Adicita Karya Nusa.
- Kusumayudha, Sari B. 2004. *Mengenal Hidrogeologi Karst*. Yogyakarta: Pusat Studi Karst Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, UPN "Veteran" Yogyakarta.
- Sudarmadji, 2013. *Mata Air: Perspektif Hidrologis dan Lingkungan*. Sekolah Pascasarjana, UGM, Yogyakarta.
- Suprianto, Agung, 2012, *Pendataan Sungai Bawah Tanah Di Gua Bagus-Jebrot Untuk Sumber Daya Air Kawasan Karst*, Malang:Universitas Negeri Malang.
- Waltham, T., Bell, F., and Culshaw, M., 2005, *Sinkholes and Subsidence:Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*, Berlin, Springer, 382 p.