

Distribusi Vektor Aliran Air Tanah Dua Dimensi dalam Media Rekahan di Big Gossan, Tembagapura, Papua

Lambok M. Hutasoit

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha 10, Bandung - 40132, E-mail: lambok@gc.itb.ac.id

Mudrik R. Daryono

Geoteknologi LIPI, Jl. Sangkuriang, Bandung,
E-mail: van_mudrik@yahoo.com, mudr001@geotek.lipi.go.id

Lilik Eko Widodo

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi
Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung - 40132, E-mail: lew@mining.itb.ac.id

Toddy Syaifullah

PT. Freeport Indonesia, G & G Services Dept, Tembagapura, Papua,
E-mail: toddy_syaifullah@fmi.com

Abstrak

PT. Freeport Indonesia (PTFI) berencana membuka tambang bawah tanah baru di Big Gossan dengan metode stope mine, yang menuntut daerah yang akan ditambang berada dalam kondisi kering. Di beberapa lokasi uji, air tanah keluar dari beberapa lubang stope dengan debit yang cukup mengganggu, tetapi di beberapa lokasi lainnya lubang berada dalam kondisi kering. Pemodelan hidrogeologi terdahulu, yang mengasumsikan bahwa akifer adalah media antar butir, tidak dapat menjawab variasi keberadaan air tanah tersebut. Akifer di daerah ini disusun oleh rekahan-rekahan. Dalam penelitian ini, dilakukan kembali pemodelan hidrogeologi dengan penekanan bahwa akifer adalah media rekahan dan pada titik-titik perpotongan antara sesar dan sungai terjadi peresapan. Dalam pemodelan ini, pertama-tama dilakukan analisis geometri dan orientasi rekahan. Hasil analisis digunakan untuk menghitung distribusi muka air tanah dengan Metode Gale dan konduktivitas hidrolis akifer dengan Metode Oda dkk. Kedua parameter tersebut digunakan untuk melakukan pemodelan hidrogeologi dalam dua dimensi, untuk mengetahui distribusi vektor aliran air tanah. Dari penelitian ini diperoleh bahwa konduktivitas hidrolis di daerah ini adalah heterogen, bukan homogen, seperti asumsi dalam pemodelan terdahulu. Hasil pemodelan hidrogeologi menunjukkan bahwa aliran air tanah terkonsentrasi di sebelah barat laut dari Stope # 6.

Kata-kata Kunci: Media rekahan, Metode Gale, Metode Oda dkk., peresapan, vektor aliran air tanah.

Abstract

PT. Freeport Indonesia (PTFI) is planning to open a new underground mine at Big Gossan by using stop mine method which requires dry mining area. In some pilot areas, groundwater flowed from some stope holes significantly, while in other areas, some holes were dry. Previous hydrogeologic modeling, assuming that aquifers were intergranular media, cannot answer the variation of the groundwater occurrence. The aquifers in the study area are composed of fractures. In this research, hydrogeology of the area is remodeled, stressing that the aquifers are fractured media and recharge takes place at the intersections of faults and rivers. In this modeling, fracture geometry and orientation are analysed first. The results are used to calculate groundwater table distribution by using Gale Method and hydraulic conductivity by using Oda et.al. Method. Both parameters are used to construct two dimensional hydrogeological modeling, to know distribution of groundwater flow vector in the research area. This research reveals that hydraulic conductivity in this area is heterogeneous, not homogeneous, as was assumed in the previous modeling. The hydrogeologic model shows that groundwater flow is concentrated to the northwest of Stope # 6.

Keyword: Fracture media, Gale Method, groundwater flow vector, Oda et.al. Method, recharge.

1. Pendahuluan

PTFI berencana membuka tambang bawah tanah baru dengan metode *stope mine* di daerah Big Gossan, Tembagapura, Papua (Big Gossan Stope Mine) (Gambar 1). Tahap awal dari metode ini adalah pembuatan ekskavasi kecil dengan dimensi $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ yang memotong tubuh bijih yang disebut dengan uji *stope* dan pembuatan *access (stope access)*. Tahap awal ini menghasilkan data-data struktur geologi (rekahan, kekar, dan sesar), zona lemah, dan keberadaan air tanah. Tahap selanjutnya adalah pembukaan *stope mine* dengan dimensi sekitar $40 \times 40 \times 10 \text{ m}^3$ yang bertujuan untuk pengambilan bijih. Tahap terakhir adalah pengisian lubang *stope* dengan menggunakan campuran *cutting* dan semen. Tahap terakhir ini mengharuskan lubang dalam keadaan kering.

Dari hasil uji *stope* dan pembuatan *stope access*, diketahui bahwa di beberapa lokasi terdapat air tanah, sementara di beberapa lokasi lainnya lubang berada dalam kondisi kering. Dari lubang yang mengeluarkan air tanah, juga diketahui bahwa debit air tanah bervariasi dari beberapa ratus gpm sampai 1500 gpm. Debit air tanah tersebut juga dapat bervolume besar di awal pembukaan, kemudian berangsur mengecil, untuk selanjutnya tetap.

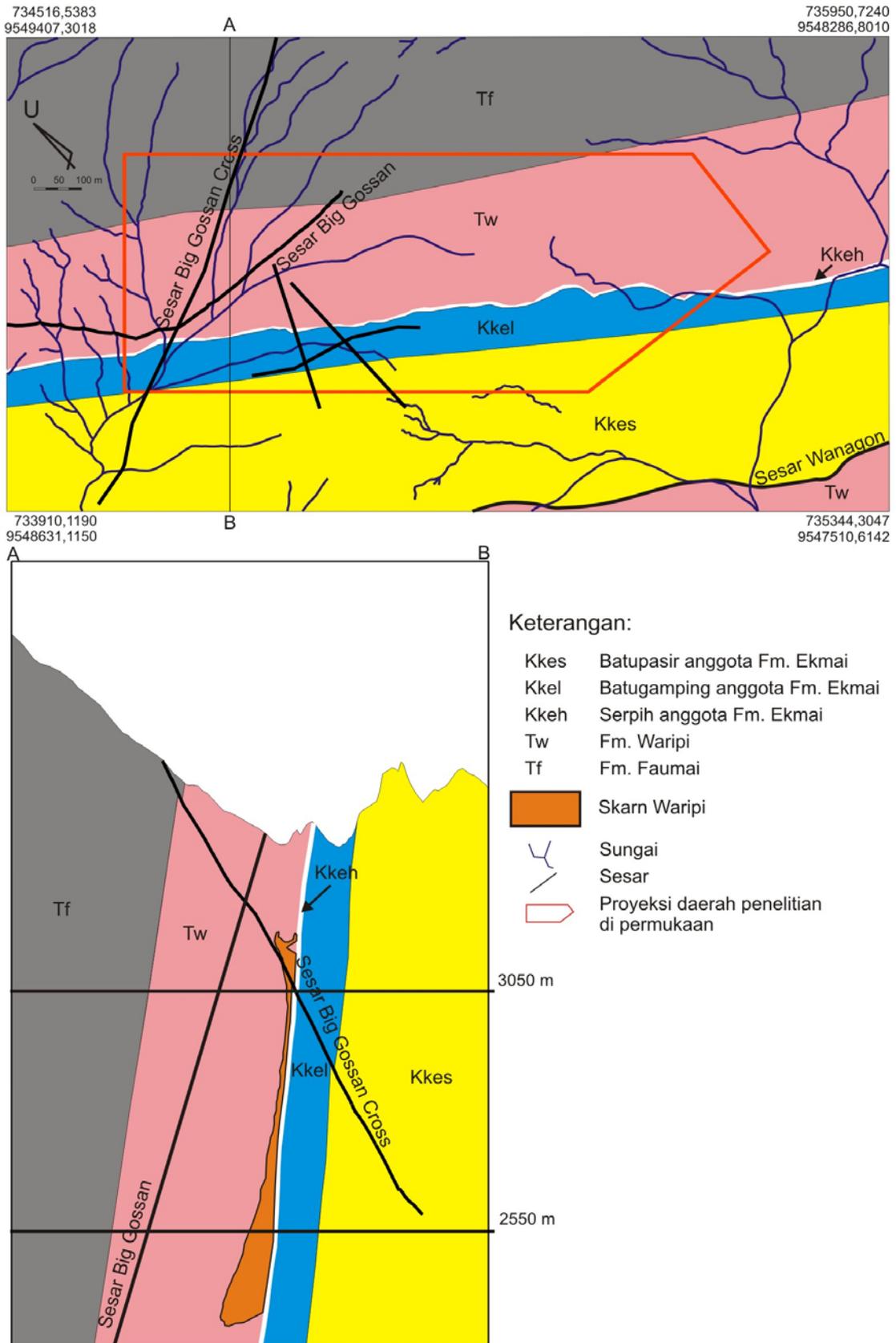
Pemodelan hidrogeologi terdahulu yang dilakukan oleh PTFI mengasumsikan bahwa akifer di daerah penelitian disusun oleh akifer antar butir. Dalam pemodelan ini, diasumsikan bahwa akifer tersebar di seluruh daerah penelitian dengan nilai konduktivitas hidrolik yang berbeda, tergantung dari jenis batuan penyusunnya, serta *recharge* diasumsikan berasal dari air hujan. Pemodelan ini tidak dapat menjawab permasalahan distribusi keberadaan air tanah seperti yang telah dijelaskan di atas.

Secara geologi (Gambar 2), daerah Big Gossan disusun oleh Formasi Ekmai (batu pasir, batu gamping, dan serpih), Formasi Waripi (dolomit), dan Formasi Faumai (batu gamping). Jurus dan kemiringan regional satuan-satuan batuan ini adalah $N 300^\circ E / 80^\circ$. Formasi Waripi diintrusi oleh monzodiorit, yang mengakibatkan terbentuknya *skarn* dan mineralisasi. Di daerah penelitian terdapat dua struktur geologi utama, yaitu Sesar Big Gossan dan Sesar Big Gossan Cross. Keberadaan kedua sesar ini diikuti oleh keberadaan rekahan yang intensif (Setiawan dan Syaifullah, 2004). Berdasarkan kondisi geologi tersebut, dapat dilihat bahwa pemodelan hidrogeologi yang dilakukan harus memodelkan air tanah di media rekahan, bukan di media antar butir seperti pemodelan sebelumnya. Rekahan-rekahan di permukaan berpotongan dengan beberapa sungai, dan pada titik-titik perpotongan ini terjadi peresapan ke dalam media rekahan.

Pemodelan hidrogeologi di media rekahan membutuhkan pengetahuan mengenai orientasi dan geometri rekahan. Pembukaan *stope mine* melalui pemboran geoteknik menghasilkan data *Rock Quality Designation (RQD)*. Data ini dapat digunakan untuk menganalisis hal tersebut. Selanjutnya, hasil analisis data rekahan tersebut digunakan untuk mengetahui parameter hidrolik berupa nilai konduktivitas hidrolik dan tinggi muka air tanah. Untuk menghitung tinggi muka air tanah digunakan Metode Gale (1990), sementara untuk menghitung nilai konduktivitas hidrolik digunakan Metode Oda dkk. (1996). Kedua parameter hidrolik tersebut kemudian digunakan untuk pemodelan hidrogeologi dua dimensi di daerah penelitian.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Big Gossan, Tembagapura, Papua



Gambar 2. Peta geologi permukaan dan penampang geologi daerah Big Gossan (PTFI, 2006)

2. Metode

2.1 Distribusi muka air tanah di rekahan: Metode Gale (1990)

Metode Gale (1990) digunakan untuk menghitung tinggi muka air tanah pada media rekahan. Dasar dari metode ini ditunjukkan pada **Gambar 3**, dimana diasumsikan bahwa material disekitar rekahan bersifat *impermeable*, *inert*, dan *incompressible*.

Dalam persamaan ini:

$$Q_{15} + Q_{25} + Q_{35} + Q_{45} = 0 \quad (1)$$

dimana Q adalah debit, yang nilainya di masing-masing titik dapat dihitung dengan:

$$Q_{ij} = C_{ij} (H_i - H_j) \quad (2)$$

Dalam Persamaan ini:

Q_{ij} = debit melalui rekahan yang menghubungkan titik i dan j dengan nilai positif untuk aliran ke titik j (m^3/s)

C_{ij} = konduktansi rekahan yang menghubungkan titik i dan j (m^2/s)

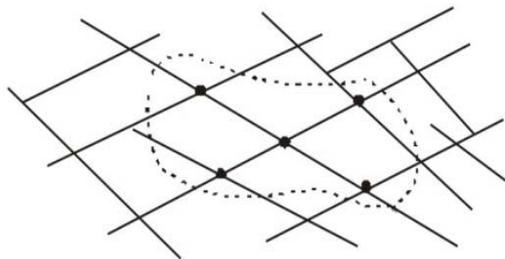
H = tinggi muka air tanah (m)

Gabungan dan pengaturan kembali **Persamaan (1)** dan **(2)** menghasilkan:

$$H_5 = \frac{C_{15}H_1 + C_{25}H_2 + C_{35}H_3 + C_{45}H_4}{C_{15} + C_{25} + C_{35} + C_{45}} \quad (3)$$

Secara umum, **Persamaan (3)** dapat dituliskan sebagai:

$$H_j = \frac{\sum_{i=1}^4 C_{ij} H_i}{\sum_{i=1}^4 C_{ij}} \quad (4)$$



Gambar 3. Lima node yang dihubungkan oleh rekahan

C dapat dihitung dengan *cubic law* dari Hoek dan Bray (1981) dengan Persamaan:

$$C = \frac{gbe_n^3}{12\nu l} \quad (5)$$

dimana:

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

b = lebar rekahan (m)

e_n = aperture rekahan (m)

ν = viskositas kinematis (m^2/s)

l = panjang rekahan (m)

Selanjutnya diperkenalkan besaran tanpa dimensi d, yang merupakan perbandingan antara konduktansi di satu titik dengan konduktansi total,

$$d_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{sj}} \quad (6)$$

dimana:

$$C_{sj} = \sum_{i=1}^4 C_{ij} \quad (7)$$

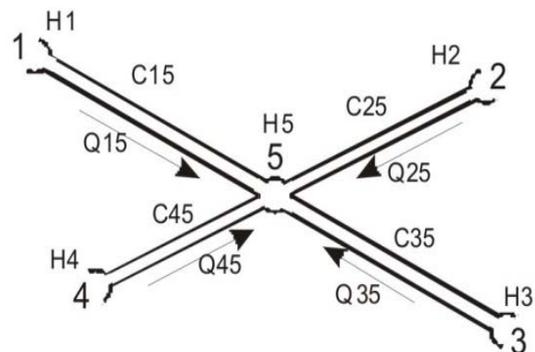
Gabungan **Persamaan (6)** dan **(4)** menghasilkan:

$$\left(\sum_{i=1}^4 d_{ij} + H_i \right) - H_j = 0 \quad (8)$$

Pada suatu daerah rekahan yang dibagi dalam sistem grid, aplikasi **Persamaan (8)** akan menghasilkan Persamaan linier simultan (Persamaan matriks), yang solusinya, yaitu tinggi muka air tanah di tiap titik pada grid, dapat dicari dengan metode solusi matriks.

2.2 Perhitungan konduktivitas hidrolik: Metode Oda dkk. (1996)

Oda (1985) memodelkan rekahan sebagai bidang tiga dimensi berbentuk *penny* (*penny shaped cracks*). Untuk kasus dua dimensi, Oda dkk. (1996)



memodelkan rekahan sebagai pasangan dua garis sejajar. Tensor permeabilitas dua dimensi dihitung dengan Persamaan sebagai berikut:

$$k_{ij} = \frac{\lambda \rho}{12} \sum_{m=1}^{m=nf} l_m e_m^3 (\delta_{ij} - N_{ij}) \quad (9)$$

dimana:

$$N_{ij} = \int_0^{2\pi} n_i n_j E(n) d\Omega \quad (10)$$

$$\lambda = 1 - \frac{c_1}{F_o} - \frac{c_2}{1 - A^{(F)}} \quad (11)$$

k_{ij} : permeabilitas (m²)

λ : fungsi densitas rekahan

ρ : jumlah rekahan per unit luasan sel (m⁻²)

nf : jumlah rekahan

l : panjang rekahan (m)

e : aperture rekahan (m)

δ : delta Kronecker

Ω : orientasi rekahan (rad)

n_i, n_j : unit normal arah x dan y

$E(n)$: probabilitas fungsi densitas

c_1, c_2 : konstanta empiris bernilai 3,5 dan 0,052

F_o : *spherical index; invariant* tensor rekahan = $F_{11} + F_{22} = \rho l^2$

$A^{(F)}$: derajat anisotrop (Oda, 1986) dengan nilai 0 = isotropik dan 1 = anisotropik

Persamaan (9) dapat digunakan langsung untuk menghitung konduktivitas hidrolis rekahan jika parameter-parameter yang dibutuhkan tersedia. Parameter-parameter ini didapatkan dari hasil analisis RQD.

2.3 Simulasi numerik sebaran vektor aliran air tanah: MODFLOW

Dari Metode Gale (1990) diperoleh sebaran tinggi muka air tanah, sementara dari Metode Oda dkk. (1996) diperoleh konduktivitas hidrolis dalam arah x dan y. Kedua parameter ini digunakan sebagai input dalam simulasi numerik yang bertujuan untuk mengetahui sebaran vektor aliran air tanah. Dengan mengetahui hal ini, maka dapat diketahui daerah-daerah tempat air tanah terkonsentrasi.

Simulasi numerik dilakukan dengan bantuan piranti lunak MODFLOW yang dikembangkan oleh Waterloo Hydrogeologic Inc. (1996). Metode yang digunakan

dalam piranti lunak ini adalah metode beda hingga (*finite difference*).

3. Hasil dan Diskusi

Berdasarkan ketersediaan data, analisis dilakukan secara dua dimensi pada sayatan horisontal dengan elevasi 3050 m.

3.1 Distribusi muka air tanah di rekahan

Parameter yang diperlukan untuk melakukan analisis dengan Metode Gale (1990) adalah:

1. Sebaran sesar utama
2. Sebaran sungai
3. Sebaran rekahan yang mengeluarkan air
4. Nilai konduktansi.

Seperti dijelaskan sebelumnya, untuk dapat menyelesaikan Persamaan linier simultan yang dilakukan dengan Metode Gale (1990) diperlukan informasi mengenai *boundary condition*. Dari analisis hidrogeologi, diketahui bahwa *boundary* ini adalah perpotongan antara sungai dengan rekahan di permukaan, dimana sungai berfungsi sebagai *constant head boundary* dan *recharge* untuk akifer sistem rekahan di daerah ini. Elevasi sungai di titik-titik *boundary* adalah tinggi muka air tanah pada titik-titik tersebut. Hasil analisis yang berupa tinggi muka air tanah di tujuh rekahan yang mengeluarkan air dengan debit tercatat di daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Parameter dimensi sesar yang digunakan untuk menghitung konduktansi hidrolis dengan *Cubic Law* ditunjukkan pada **Tabel 1**. Lokasi titik-titik rekahan dalam tabel ini dapat dilihat pada **Gambar 5**. Konduktansi ini diperlukan untuk menghitung distribusi muka air tanah seperti ditunjukkan pada **Persamaan (8)**. Contoh Persamaan perhitungan tinggi muka air tanah di Titik 57 (**Gambar 5**) adalah sebagai berikut:

$$d_{39,57}H_{39} + d_{58,57}H_{58} + d_{55,57}H_{55} + d_{62,57}H_{62} + H_{57} = 0 \quad (12)$$

Di lokasi penelitian terdapat delapan titik yang tidak diketahui nilai muka air tanahnya (**Gambar 5**) karena debit air yang keluar tidak tercatat. Perhitungan muka air tanah dengan Metode Gale (1990) di titik-titik tersebut menghasilkan delapan Persamaan linear simultan. Persamaan tersebut saling berkaitan satu sama lain sehingga dapat diselesaikan dengan solusi matriks.

Solusi matriks dilakukan dengan metode iterasi, dimana tebakan awal nilai muka air tanah adalah 3050 m. Solusi matriks diperoleh pada iterasi ke 27, dan hasilnya juga ditunjukkan pada **Gambar 5**. Arah aliran air tanah juga ditunjukkan pada gambar ini. Kecepatan aliran air tanah tidak dapat diketahui dengan mengaplikasikan Metode Gale (1990) dan

dianalisis dengan menggunakan simulasi numerik seperti dibahas pada bagian simulasi numerik di bawah.

3.2 Perhitungan konduktivitas hidrolis

Seperti dijelaskan sebelumnya, nilai konduktivitas hidrolis diperlukan untuk melakukan simulasi numerik yang tujuan akhirnya untuk mengetahui sebaran vektor kecepatan aliran air tanah. Perhitungan konduktivitas hidrolis dengan Metode Oda dkk. (1996) membutuhkan parameter-parameter sebagai berikut:

1. Korelasi sebaran RQD sebagai sebaran densitas rekahan
2. Data struktur geologi
3. Korelasi nilai RQD dengan besaran densitas rekahan dengan menggunakan korelasi Priest dan Hudson (1976).

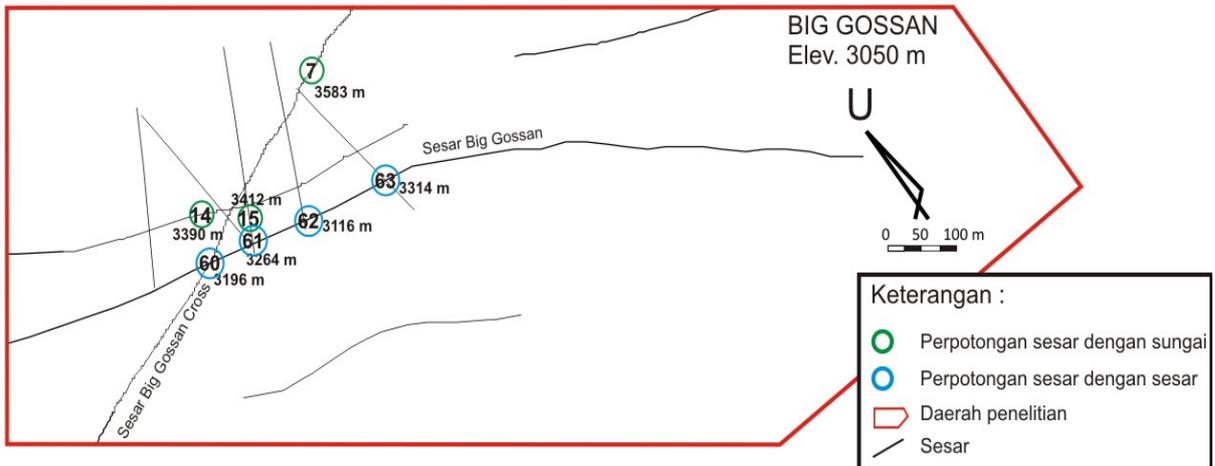
Priest dan Hudson (1976) meneliti jumlah rekahan per meter dengan dua Persamaan dalam garis kurva. Untuk jumlah rekahan per meter antara 6 – 16, digunakan Persamaan linier, sementara diluar jumlah

tersebut digunakan kurva teoritis. Setelah didapatkan densitas rekahan per meter, kemudian dilakukan konversi ke densitas rekahan per satuan luas. Dalam konsep dasarnya, Priest dan Hudson (1976) menyatakan bahwa dalam sebuah balok terdapat rekahan yang selalu menerus. Jika rekahan ini ditembus oleh suatu pemboran, maka akan menghasilkan garis potong AB (**Gambar 6**). Berdasarkan hal ini, dapat diasumsikan bahwa suatu kubus dengan sisi 10 m akan mempunyai densitas rekahan per meter dan per satuan luas yang sama. Rekahan per satuan luas ini kemudian dikorelasikan dengan nilai RQD seperti ditunjukkan pada **Tabel 2**.

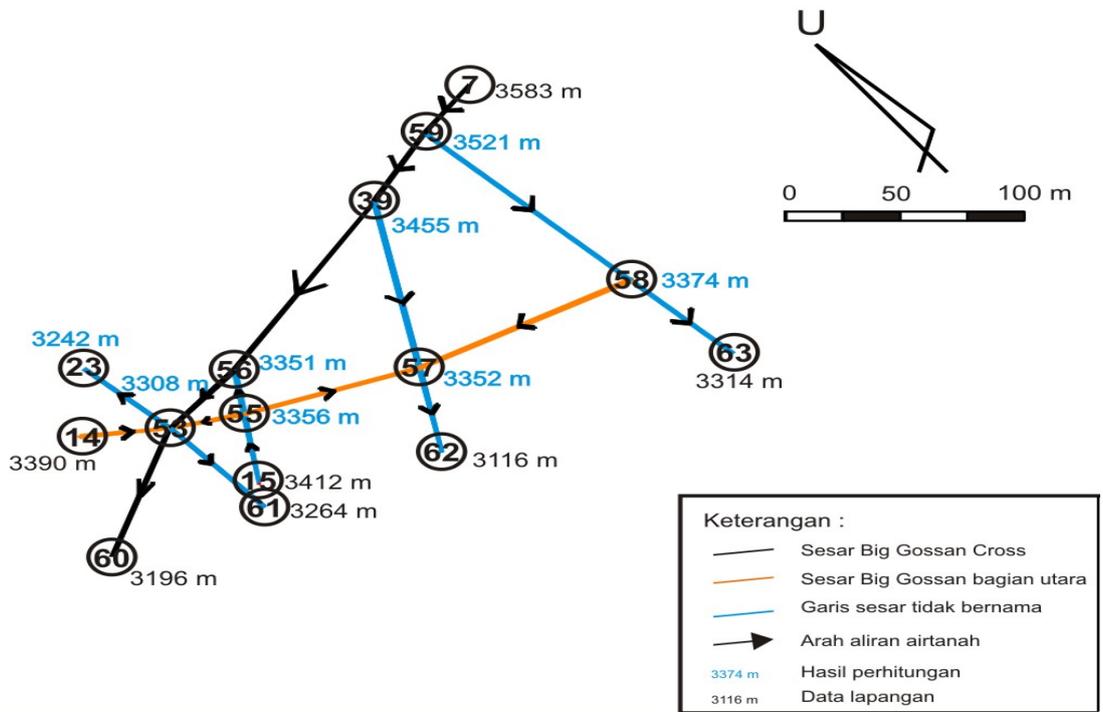
Pada sayatan di ketinggian 3050 m, berdasarkan diagram blok sebaran nilai RQD dan sebaran struktur geologi, parameter struktur geologi dapat dikelompokkan berdasarkan sebaran nilai RQD (**Gambar 7**). Pengelompokan data ini ditunjukkan pada **Tabel 3**. Secara umum, data struktur geologi sudah lengkap, tetapi tidak disertai dengan data panjang rekahan minimal dan *aperture*. Untuk kedua parameter tersebut dilakukan pendekatan. Hasil pendekatan ini ditunjukkan juga pada **Tabel 3**.

Tabel 1. Parameter input rekahan

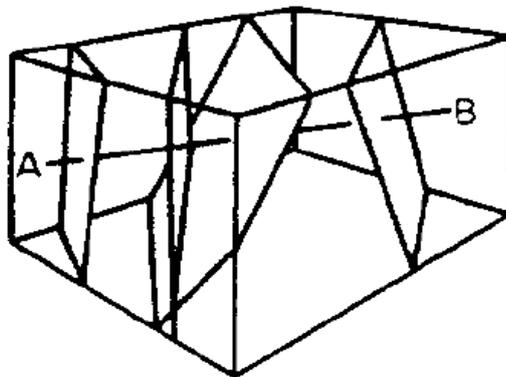
Titik Saluran		Lebar (b)	Aperture	Panjang Rekahan	Konduktansi
Mulai	Ujung	m	mm	m	M2/s
7	59	2,5	1	27,6	7,64669E-05
59	39	2,5	1	35,5	5,75117E-05
59	58	0,82	1	97,5	6,88838E-06
58	57	0,82	1	83,2	8,04888E-06
58	63	0,82	1	48,2	1,38995E-05
39	57	0,65	1	39,2	1,35417E-05
57	62	0,65	1	77,2	6,87608E-06
39	56	2,5	1	90,4	2,25848E-05
57	55	0,82	1	64,1	1,04472E-05
56	55	1	1	20,5	3,98874E-05
15	55	1	1	31,4	2,60085E-05
15	61	1	1	11,4	7,16374E-05
56	53	2,5	1	34,6	5,90077E-05
55	53	0,82	1	26,2	2,55598E-05
61	53	0,82	1	40,5	0,000016535
53	23	0,82	1	40,2	1,66584E-05
53	60	2,5	1	61,4	3,32519E-05
53	14	0,82	1	30,8	2,17424E-05



Gambar 4. Tinggi muka air tanah di tujuh titik di daerah penelitian



Gambar 5. Tinggi muka air tanah hasil perhitungan (Metode Gale) pada delapan titik di daerah penelitian



Gambar 6. Ilustrasi balok dengan sebaran rekahan yang ditembus oleh bor AB.

Sebaran nilai RQD pada **Gambar 7** tidak menunjukkan pengelompokan dalam satuan-satuan batuan pada sayatan ketinggian ini, yang ditunjukkan dalam peta geologi pada **Gambar 8**. Sebagai akibatnya, nilai konduktivitas hidrolik pada satuan-satuan batuan tersebut menunjukkan kondisi heterogen. Hal ini berbeda dengan asumsi sebelumnya (PTFI, 2006) yang menganggap bahwa setiap satuan batuan tersebut mempunyai konduktivitas hidrolik yang seragam, atau kondisi homogen.

Untuk menentukan sebaran arah umum rekahan, dilakukan analisis dengan menggunakan Diagram Roset. Sebaran arah ini juga digunakan untuk menentukan besar batasan input dalam penentuan nilai *random*. Pembagian batasan ini didasarkan pada frekwensi data dan sebarannya. Setiap zonasi dapat memiliki lebih dari satu batas *random*. Sebagai contoh, batas nilai RQD 0 – 5% memiliki satu batas *random*, sementara nilai RQD 20 – 50% memiliki tiga batas *random*. Nilai batas *random* ini juga ditunjukkan pada **Tabel 3**.

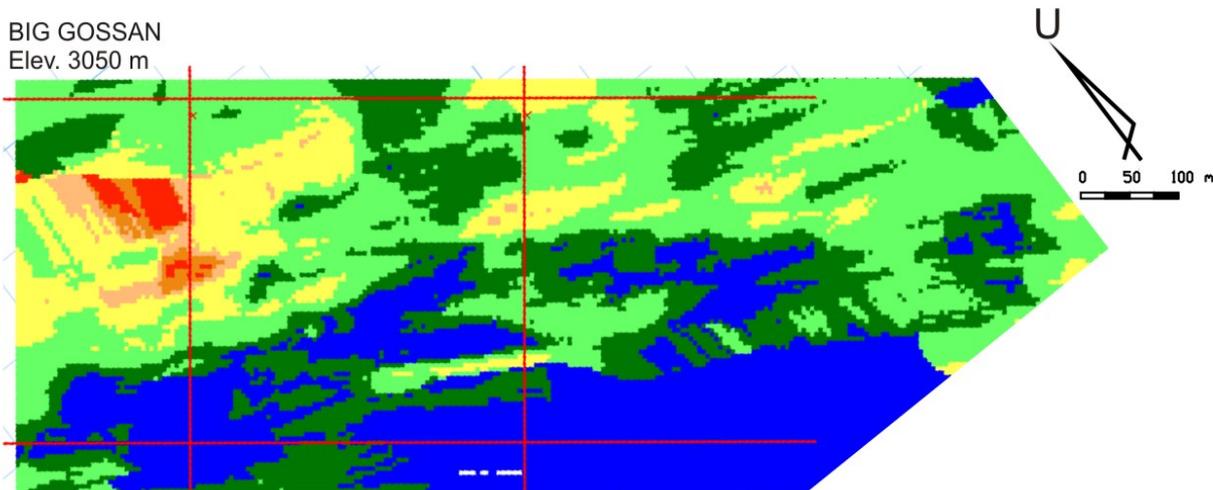
Dari parameter-parameter di atas, yaitu jumlah rekahan, arah rekahan, *aperture* rekahan, dan panjang

rekahan, dilakukan perhitungan konduktivitas hidrolik seperti tercantum dalam **Persamaan (9)**. Sebagai catatan, parameter-parameter tersebut didapatkan dari suatu model kubus dengan panjang sisi 10 m. Model dari arah, jumlah, dan panjang rekahan ditunjukkan pada **Gambar 9**. Dalam gambar tersebut dapat dilihat bahwa RQD 0 – 5% (zona merah) mempunyai kerapatan rekahan yang tinggi dan berangsur jarang ke arah nilai RQD yang lebih tinggi. Perhitungan dengan Metode Oda dkk. (1996) mensyaratkan bahwa *spherical index* harus lebih besar dari 6,5. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa hanya nilai RQD 90 – 100% (zona biru) yang memiliki nilai *spherical index* yang lebih kecil dari 6,5, yaitu 4,7. Hasil perhitungan konduktivitas hidrolik dengan Metode Oda dkk. (1996) untuk tiap interval nilai RQD ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Dengan mengaplikasikan **Persamaan (9)**, tensor permeabilitas dapat diketahui. Hasil perhitungan tensor ini disajikan dalam bentuk grafik seperti ditunjukkan pada **Gambar 10**. Tensor ini mempunyai satuan Darcy dan dapat dikonversikan kedalam konduktivitas hidrolik dengan cara membaginya dengan $1,04 \times 10^5$ (Domenico dan Schwartz, 1990).

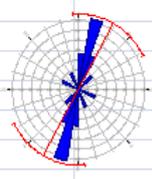
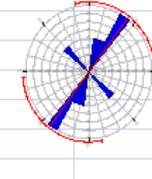
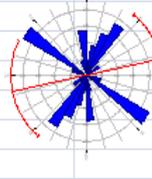
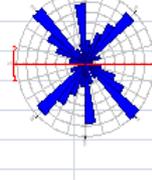
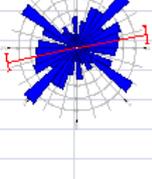
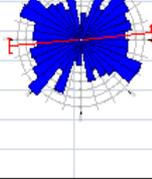
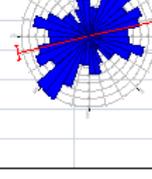
Tabel 2. Korelasi nilai RQD dengan jumlah rekahan per satuan luas

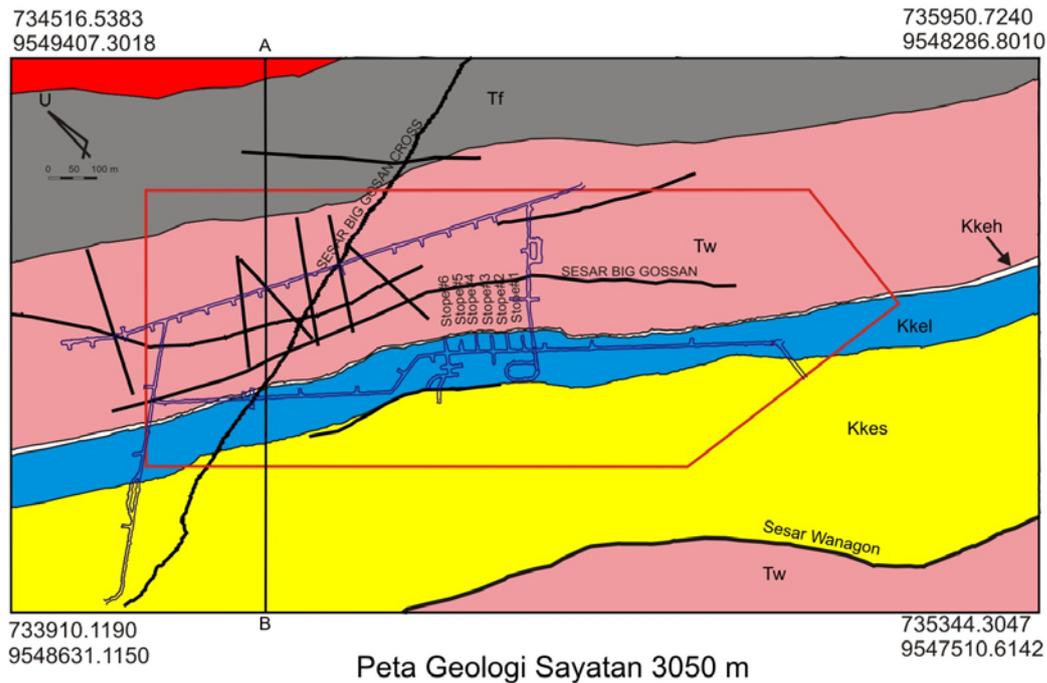
No.	RQD	RQD rata-rata %	Densitas Rekah (Priest dan Hudson, 1976) /meter	Asumsi Densitas Rekah (Priest dan Hudson, 1976) /meter ²	Luas Area m ²	Dimensi Kubus m	Jumlah Rekahan N
1	0-5	2,5	55,940	55,940	100	10	559
2	5-10	7,5	42,360	42,360	100	10	424
3	10-20	15	33,780	33,780	100	10	338
4	20-50	35	22,130	22,130	100	10	221
5	50-75	62,5	13,016	26,463	100	10	130
6	75-90	82,5	7,582	27,940	100	10	76
7	90-100	95	3,550	3,550	100	10	36



Gambar 7. Sebaran nilai RQD di daerah penelitian

Tabel 3. Parameter struktur geologi berdasarkan zonasi RQD

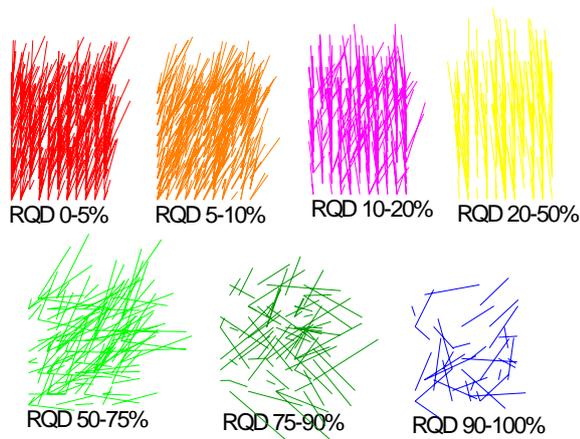
Statistik	dip	dipdir	Orientasi	Aperture (mm)		Panjang (m)		Diagram Roset	random 1	random 2	random 3
				Data	Desain	Data	Desain				
RQD 0-5%											
MIN	45.00	25.00	5.00	0.00	0.05	6.00	0.01		0		
MAX	85.00	295.00	330.00	0.00	5.00	6.00	6.00		30		
MEAN	64.55	144.55	120.00	0.00		6.00					
MEDIAN	70.00	105.00	45.00	0.00		6.00					
RQD 5-10%											
MIN	50.00	40.00	10.00	0.00	0.05	6.00	0.01		10		
MAX	65.00	300.00	310.00	0.00	5.00	6.00	6.00		40		
MEAN	65.00	300.00	310.00	0.00		6.00					
MEDIAN	60.00	110.00	30.00	0.00		6.00					
RQD 10-20%											
MIN	25.00	10.00	0.00	0.00	0.05	6.00	0.01		350	20	120
MAX	80.00	305.00	355.00	0.00	5.00	6.00	6.00		360	40	140
MEAN	62.05	35.00	171.27	0.00		6.00					
MEDIAN	60.00	112.50	185.00	0.00		6.00					
RQD 20-50%											
MIN	25.00	0.00	0.00	0.00	0.05	6.00	0.01		350	20	138
MAX	85.00	350.00	355.00	2.00	5.00	8.00	8.00		360	50	140
MEAN	68.38	123.17	186.80	0.16		6.05					
MEDIAN	75.00	110.00	210.00	0.00		6.00					
RQD 50-75%											
MIN	15.00	0.00	10.00	0.00	0.05	0.00	0.01		18	110	
MAX	87.00	355.00	355.00	1.00	5.00	8.00	8.00		100	130	
MEAN	63.16	158.61	158.61	0.02		5.96					
MEDIAN	70.00	150.00	127.50	0.00		6.00					
RQD 75-90%											
MIN	15.00	0.00	5.00	0.00	0.05	0.00	0.01		20		
MAX	90.00	356.00	356.00	3.00	5.00	8.00	8.00		150		
MEAN	62.25	162.02	165.70	0.06		6.00					
MEDIAN	66.00	157.00	140.00	0.00		6.00					
RQD 90-100%											
MIN	15.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01		330		
MAX	90.00	355.00	355.00	10.00	5.00	15.00	6.00		135		
MEAN	64.06	154.10	163.71	0.13		6.07					
MEDIAN	67.00	141.00	155.00	0.00		6.00					



Keterangan:

- Kkes Batupasir anggota Fm. Ekmai
- Kkel Batugamping anggota Fm. Ekmai
- Kkeh Serpih anggota Fm. Ekmai
- Tw Fm. Waripi
- Tf Fm. Faumai
- Monzodiorit
- Terowongan
- Daerah Penelitian
- Sesar

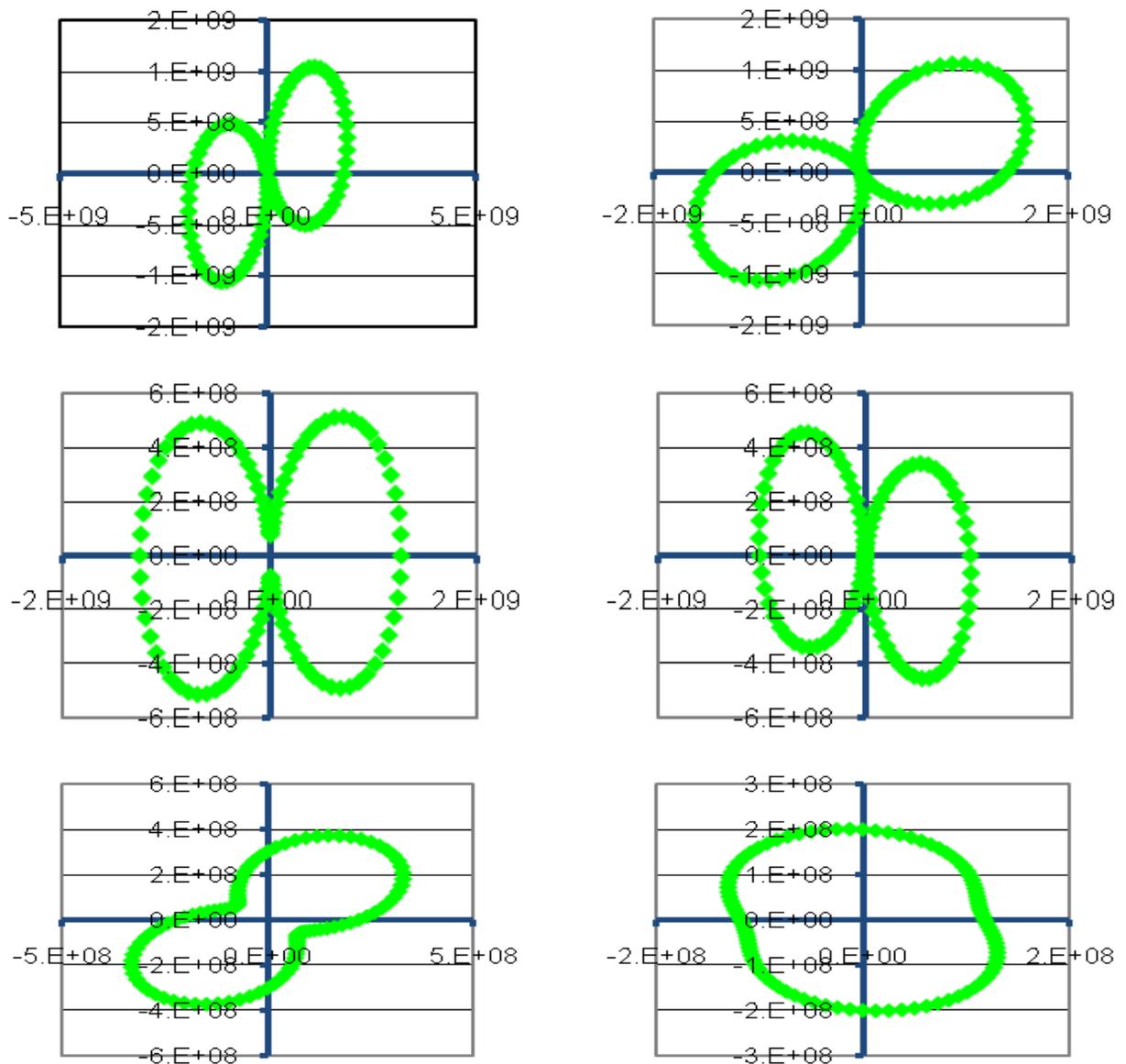
Gambar 8. Peta geologi sayatan 3050 m daerah Big Gossan (PTFI, 2006)



Gambar 9. Panjang, arah, dan jumlah rekahan hasil model

Tabel 4. Nilai konduktivitas hidrolik per zonasi RQD

No.	RQD%	Konduktivitas Hidrolik (m/s)		
		Ij=xx	Ij=yy	Ij=xy
1	0-5	6,595	6,63E-06	1,77E-05
2	5-10	4,71E-05	1,26E-05	2,26E-05
3	10-20	4,71E-05	2,77E-06	4,62E-07
4	20-50	3,60E-05	3,59E-07	-2,98E-06
5	50-75	8,225-06	1,32E-05	8,00E-06
6	75-90	4,22E-06	6,14E-06	-2,00E-06



Gambar 10. Grafik tensor permeabilitas absolut teoritik pada zonasi RQD : 0-5% (a), 5-10% (b), 10-20% (c), 20-50% (d), 50-75% (e), dan 75-90% (f)



Gambar 11. Distribusi vektor aliran air tanah di daerah penelitian

3.3 Simulasi numerik vektor aliran air tanah: MODFLOW

Kedua parameter yang dihasilkan dari analisis dengan Metode Gale (1990) dan Metode Oda dkk. (1996) digunakan sebagai input dalam simulasi numerik yang bertujuan untuk mengetahui sebaran vektor aliran air tanah. Dalam melakukan simulasi numerik, distribusi muka air tanah dari sistem rekahan utama dijadikan sebagai *constant head boundary*. Kemudian, daerah pemodelan dianalogikan sebagai media intergranular dengan nilai konduktivitas hidrolis yang didapatkan dari analisis dengan menggunakan Metode Oda dkk. (1996) (Tabel 4). Hasil simulasi numerik ditunjukkan pada Gambar 11 dimana dapat dilihat ketidakseragaman panjang vektor aliran air tanah di daerah penelitian. Nilai-nilai terbesar terdapat di bagian barat laut daerah penelitian, atau di sebelah barat laut Stope #6. Di bagian timur dan barat daya panjang vektor sangat kecil sehingga tidak terlihat pada gambar ini. Implikasi dari hasil simulasi ini adalah bahwa penambangan di daerah barat laut perlu memperhatikan faktor air tanah yang dapat mengganggu, tidak seperti di bagian timur dan barat daya, yang relatif kering.

3.4 Diskusi

Penerapan Metode Gale (1990) dan Metode Oda dkk. (1996) dalam pertambangan telah dapat menjawab sebagian permasalahan yang dihadapi oleh PTFI di daerah Big Gossan. Dalam penerapan ini data yang digunakan adalah data struktur geologi dan mekanika batuan, sehingga tidak diperlukan data hidrogeologi khusus. Kumpulan data yang dimiliki oleh PTFI secara umum sudah memadai, namun untuk penelitian selanjutnya perlu dilengkapi dengan data parameter media rekahan, yaitu panjang rekahan dan *aperture*. Pemodelan hidrogeologi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dalam dua dimensi, terkait dengan ketersediaan data. Bersamaan dengan kemajuan penambangan pada lokasi-lokasi yang lebih dalam akan diperoleh data dalam arah vertikal, sehingga dapat dilakukan pemodelan tiga dimensi, yang akan memberikan gambaran lebih lengkap tentang distribusi aliran air tanah di daerah Big Gossan. Pengetahuan ini sangat diperlukan dalam perencanaan penirisan (*dewatering*) lokasi penambangan baru, yaitu di mana dan dengan teknik apa penirisan perlu dilakukan.

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Akifer di daerah penelitian disusun oleh media rekahan dimana resapan terjadi pada perpotongan sungai dengan rekahan di permukaan.
2. Sebaran konduktivitas hidrolis dan RQD menunjukkan kondisi akifer yang heterogen.
3. Hasil simulasi dapat menerangkan variasi keberadaan air tanah di daerah Big Gossan, yang terutama terdapat di bagian barat laut.

5. Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Freeport Indonesia yang telah mengizinkan penggunaan data untuk menyusun makalah ini.

Daftar Pustaka

- Domenico, P.A. dan Schwartz, F.W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*, New York: John Wiley dan Sons, 824h.
- Gale, J., 1990. Hydraulic Behaviour of Rock Joints. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, Loen, Norway: N. Barton and O. Stephansson (eds), Rotterdam: Balkema, h. 351 – 362.
- Hoek, E. dan Bray, J., 1981. *Rock Slope Engineering*. London: The Institution of Mining and Metallurgy, 358h.
- Oda, M., 1985. Permeability Tensor for Discontinuous Rock Masses. *Geotechnique, Geotechnical Society*, Vol. 35, No.4, h. 483-495.
- Oda, M., 1986. An Equivalent Continuum Model for Coupled Stress and Fluid Flow Analysis in Jointed Rock Masses. *Water Resources Research, American Geophysical Union*, Vol. 22. No.1 3. h.1845-1856.
- Oda, M., Kanamaru, M., dan Iwashita, K., 1996. The Effect of Crack Geometry on Hydrodynamic Dispersation in Cracked Media. *Soils And Foundations, Japanese Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 2, h. 69-80.
- Priest, S.D., dan Hudson, J., 1976. Discontinuity spacing in rock. *Int. Journal Rock Mechanics, Minerals Sciences and Geomechanics*. Great Britain: Pergamon Press, Vol. 13, h. 135-148.
- PT. Freeport Indonesia (PTFI), 2006. *Hydrogeologic Model and Groundwater Flow Modeling of Big Gossan Mine*. Laporan internal, PT. Freeport Indonesia, tidak dipublikasikan, 14h.
- Setiawan, I. dan Syaifullah, T., 2004. Dewatering and Identification of Groundwater Resources at DOZ block cave mine PT. Freeport Indonesia. Palembang: *Prosiding PERHAPI XIII*,
- Waterloo Hydrogeologic Inc., 1996. *Reference Manual: The Official USGS MODFLOW, A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model*, Virginia: Waterloo Hydrogeologic Inc.