**DISTRIBUSI KONDUKTIVITAS HIDRAULIK DARI
HASIL UJI AKUIFER – *CONSTANT HEAD* PERMEABILITAS PADA
BATUAN SEDIMEN SECARA HETEROGEN**

**Tedy Agung Cahyadi ¹⁾,
Sudarto Notosiswoyo ²⁾,
Lilik Eko Widodo ³⁾,
Irwan Iskandar ⁴⁾,
Suyono ⁵⁾**

1) Mahasiswa Pascasarjana, Rekayasa Pertambangan, ITB

2) 3) 4) Staff Pengajar Rekayasa Pertambangan, ITB

5) Staff Pengajar Teknik Pertambangan, UPN “Veteran” Yogyakarta

ABSTRAK

Hydraulic conductivity is the ability of a rock to drain ground water at a certain speed. Hydraulic conductivity in fractured rock has a complexity (the degree of heterogeneity and anisotropic) higher than the hydraulic conductivity in sedimentary rocks. Generally in modeling the distribution hidroulik distribution, sedimentary rocks studied in homogeneous and isotropic. With hidroulik conductivity distribution in heterogeneous sedimentary rocks, will provide an understanding that in the natural distribution of non-uniform distribution of sedimentary rocks, although in one layer. Hidroulik conductivity values obtained from the test aquifer with constant head permeability method on samples of core drilling. Simulator SGeMS using kriging interpolation method is able to explain the distribution of conductivity distribution hidroulik in sedimentary rocks. Validation of the model by using the correlation coefficient between the model results and field test data.

Keywords: Hydraulic conductivity, Constant Head Permeability Test, Kriging, Sedimentary rocks, Heterogeneous

Konduktivitas hidroulik merupakan kemampuan suatu batuan untuk mengalirkan airtanah pada kecepatan tertentu. Konduktivitas hidraulik pada batuan terkekarkan memiliki kompleksitas (derajat heterogenitas dan anisotrop) yang lebih tinggi dibandingkan dengan konduktivitas hidraulik pada batuan sedimen. Umumnya dalam pembuatan model distribusi sebaran hidroulik, batuan sedimen dikaji secara homogen dan isotrop. Dengan melakukan distribusi konduktivitas hidroulik batuan sedimen secara heterogen, akan memberikan pemahaman bahwa di alam distribusi sebaran batuan sedimen tidak seragam walaupun dalam satu lapisan. Nilai konduktivitas hidroulik didapatkan dari uji akuifer dengan metode *constant head* permeabilitas pada sampel hasil pemboran inti. Simulator SGeMS menggunakan metode interpolasi *kriging* mampu menjelaskan sebaran distribusi konduktivitas hidroulik pada batuan sedimen. Validasi model dilakukan dengan menggunakan koefisien korelasi antara hasil model dan data uji lapangan.

Kata Kunci : Konduktivitas Hidroulik, Uji Constan Head Permeabilitas, Kriging, Batuan Sedimen, Heterogen

1. LATAR BELAKANG

Komponen utama dalam pemodelan aliran air tanah adalah persebaran nilai konduktivitas hidraulik. Konduktivitas hidraulik merupakan kemampuan suatu batuan untuk mengalirkan airtanah pada kecepatan tertentu. Konduktivitas hidraulik pada batuan terkekarkan memiliki kompleksitas (derajat heterogenitas dan anisotrop) yang lebih tinggi dibandingkan dengan konduktivitas hidraulik pada batuan sedimen. Umumnya dalam pembuatan model aliran air tanah, untuk menyederhanakan kondisi lapangan yang cukup kompleks, parameter nilai konduktivitas hidraulik diasumsikan memiliki nilai yang sama dalam satu lapisan. Keadaan di lapangan, nilai konduktivitas hidraulik memiliki nilai yang berbeda – beda walaupun dalam satu lapisan batuan (heterogen). Hal itu bisa dibuktikan dari hasil pengujian akuifer dengan metode *constant head* permeabilitas. Penelitian ini merupakan data dari pengeboran inti sebanyak 7 lubang bor (Iskandar, 2007). Dari 7 lubang bor tersebut, dilakukan pengujian akuifer dengan metode *constant head* sebanyak 34 sampel. Kondisi litologi lokasi penelitian terdiri dari batuan sedimen (*mudstone dan limestone*), volcanic rock (*andesite*) dan quarter alluvial deposit. Data permeabilitas yang jumlahnya sangat terbatas dapat digunakan untuk menduga nilai konduktivitas hidraulik dengan cara interpolasi dengan metode *kriging* menggunakan *open source SGeMS (Stanford Geostatistic Modeling Software (Remy N et al, 2006))*. Metode tersebut telah terbukti untuk melakukan prediksi sebaran As berdasarkan pengaruh bobot, jarak, dan arah (Iskandar et al, 2007). Sebaran konduktivitas hidraulik yang beragam dikontrol dengan validasi model dan kondisi geologi. Hasil pemodelan konduktivitas hidraulik yang heterogen pada batuan sedimen tersebut dapat digunakan sebagai data masukan dalam input data permodelan aliran air tanah.

2. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menduga nilai konduktivitas hidraulik berdasarkan data uji *constant head* permeabilitas yang terbatas.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode penggabungan antara teori, data lapangan dan hasil pengujian di laboratorium, sehingga dari ketiganya dapat diperoleh kesimpulan. Adapun tahapan metode yang dilaksanakan meliputi studi literatur, hasil pengujian dari laboratorium, mengolah dan menganalisis hasil pengolahan data, serta mengambil kesimpulan.

4. STUDI KASUS

Lokasi penelitian berlokasi di daerah Sulawesi Utara. Litologi batuan yang ada di lokasi berupa batuan sedimen (*mudstone dan limestone*), batuan volcanic (*andesite*) dan *quarter alluvial deposit*. Sistem akuifer yang ada terdiri dari 2 jenis, akuifer dangkal yang terdiri dari deposit alluvial, lapisan lempung dan akuifer dalam yang terdiri dari batuan terkekarkan (*mudstone, limestone dan andesite*).

5. PELAKSANAAN PENELITIAN

5.1. Uji Akuifer – *Constant Head* Permeabilitas

Uji ini dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan batuan (kelulusan) material tanah atau batuan dalam meluluskan air dengan prinsip tekanan tetap. Sketsa alat pengujian *constant head* permeabilitas sebagai berikut :

Gambar 1
Sketsa Komponen Uji *Constan Head*

Keterangan :

1. Kompresor Udara
2. Tabung Air
3. Manometer Tekanan
4. Fitting
5. Tabung Sampel
6. Tabung Ukur Volume
7. Keran

Dengan menggunakan persamaan Darcy, pengujian *constant head* permeabilitas menghasilkan nilai konduktivitas hidraulik.

$$K = \frac{Q \times L}{H \times A}$$

K merupakan nilai konduktivitas hidraulik (cm/dtk), Q merupakan debit aliran (m³/dtk), H merupakan *head* (cm), A merupakan luas penampang sampel (cm²), L merupakan panjang sampel (cm).

Hasil yang diperoleh dari pengujian akuifer sebagai berikut :

Tabel 1
Hasil Pengujian *Constan Head* Permeabilitas

NO	BOR	X	Y	Z	Permeability (m/dtk)	log K
1	BOR 1	24300	-1200	-6,45	1.14E-05	-4.94310
2		24300	-1200	-12,50	5.08E-06	-5.29414
3		24300	-1200	-20,60	0.000277	-3.55752
4		24300	-1200	-28,05	1.81E-05	-4.74232
5		24300	-1200	-33,15	0.000547	-3.26201
6		24300	-1200	-35,55	1.82E-05	-4.73993
7	BOR 2	22500	-2300	-6,50	0.00011	-3.95787
8		22500	-2300	-16,70	2.55E-05	-4.59394

NO	BOR	X	Y	Z	Permeability (m/dtk)	log K
9		22500	-2300	-21,50	3.88E-05	-4.41128
10		22500	-2300	-26,00	6.74E-05	-4.17114
11		22500	-2300	-30,50	2.35E-05	-4.62841
12		22500	-2300	-35,90	0.000104	-3.98186
13		22500	-2300	-39,50	5.65E-06	-5.24765
14	BOR 3	23200	-2000	-3,50	3.44E-05	-4.46404
15		23200	-2000	-12,50	0.000713	-3.14702
16		23200	-2000	-32,90	0.000127	-3.89582
17		23200	-2000	-40,30	0.000269	-3.57007
18	BOR 4	22700	-1300	-6,20	3.89E-05	-4.40954
19		22700	-1300	-13,40	2.67E-06	-5.57303
20		22700	-1300	-14,00	9.98E-05	-4.00065
21	BOR 5	23000	1000	-3,30	1.5E-05	-4.82257
22		23000	1000	-6,00	1.85E-05	-4.73239
23		23000	1000	-7,70	8.22E-05	-4.08526
24	BOR 6	23800	0	-12,40	2.89E-05	-4.53857
25		23800	0	-18,10	0.000339	-3.46965
26		23800	0	-24,40	7.29E-05	-4.13717
27		23800	0	-36,40	0.000125	-3.90309
28		23800	0	-39,40	0.000478	-3.32056
29	BOR 7	25000	-1100	-6,00	2.08E-05	-4.68124
30		25000	-1100	-11,10	3.24E-05	-4.48936
31		25000	-1100	-21,25	7.41E-05	-4.13033
32		25000	-1100	-23,20	1.85E-05	-4.73239
33		25000	-1100	-29,10	1.5E-06	-5.82257
34		25000	-1100	-47,10	2.08E-05	-4.68124

5.3. Pemodelan Sebaran Konduktivitas Hidraulik dengan *Kriging*

Model kriging mengestimasi nilai pada daerah tidak tersampel dengan melakukan perataan bobot sampel di sekitarnya berdasarkan jarak dan arah. Korelasi antar data yang berdekatan dimodelkan sebagai fungsi jarak geografis antar data pada area studi, didefinisikan sebagai variogram. *Kriging* sebagai teknik interpolasi telah diterapkan secara luas untuk memperkirakan variabel hidrogeologi di lokasi *unsampled* dari titik data pencar, seperti transmisivitas dan konduktivitas hidraulik (Fabbri, 1997) dan kontaminan (Iskandar, et al 2011). Variogram mencerminkan korelasi spasial pada sampel data di lapangan. Variogram didefinisikan sebagai berikut :

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2n(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{n(\mathbf{h})} (z_1(\mathbf{x}_i + \mathbf{h}) - z_1(\mathbf{x}_i))^2$$

$\mathbf{x}$ = koordinat/lokasi, $\mathbf{h}$ = jarak terpisah, $n(\mathbf{h})$ = jumlah sampel pasangan terhadap $\mathbf{h}$, z = bobot data

Jenis semivariogram yang digunakan tipe *spherical*. Setelah semivariogram dibentuk, kriging dapat mulai menaksir nilai parameter primer pada lokasi yang tidak tersampel dengan menggunakan bobot rata-rata.

$$z_0^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^{n1} \lambda_{1i} z_1(\mathbf{x}_i)$$

Dimana n adalah jumlah tetangga terdekat dari z_1 dan z_2 . Nilai bobot untuk masing-masing data didapat dengan memecahkan persamaan linier dengan meminimalkan nilai variansi *kriging*.

Dari 34 data inti bor yang telah dilakukan uji *constant head*, sebanyak 5 sampel diambil untuk tidak digunakan dalam proses pemodelan. Fungsi sampel yang diambil tersebut digunakan proses validasi, yaitu membandingkan hasil sebaran konduktivitas hidraulik berdasarkan hasil model dan data kondisi sebenarnya dari lapangan.

Dengan menggunakan semivariogram *spherical*, variogram yang diperoleh berdasarkan sebaran sampel 29 buah sebagai berikut :

Gambar 2
Sebaran Semivariogram

Distribusi semivariogram dibuat mulai dari azimuth 0, 45, 90, 135. Berdasarkan hasil interpretasi data, didapatkan nilai semivariogram yang sama pada semua arah. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lapisan batuan relative datar pada semua arah. Nilai *sill* pada semivariogram omnidirectional tercapai pada nilai 0,5, sedangkan *nugget effect* bernilai 0,27.

Pendugaan konduktivitas hidraulik dengan metode *kriging* dibuat dalam area dengan dimensi $2700 \text{ m} \times 5500 \text{ m} \times 4700 \text{ m}$. Untuk melihat hasil pendugaan konduktivitas hidraulik dengan metode *kriging* ini secara lebih detail, hasil direpresentasikan dalam bentuk *fence diagram* atau *slice* dalam arah X, Y, Z. Hasil estimasi pada daerah penelitian dapat dilihat.

Gambar 3
3 D Sebaran Konduktivitas Hidraulik

6. PEMBAHASAN

6.1. Hasil Uji Permeabilitas

Hasil pengujian nilai konduktivitas hidraulik berdasarkan uji *constant head*, menunjukkan rentangan nilai dari $1,5 \times 10^{-6} \text{ m/dtk}$ – $0,7 \times 10^{-3} \text{ m/dtk}$. Nilai tersebut merupakan representasi dari litologi berupa lapisan aluvial, batuan sedimen, serta batuan terkekarkan. Apabila sebaran nilai konduktivitas hidraulik tersebut diproyeksikan dalam bentuk histogram, akan menghasilkan sebaran data yang cenderung miring ke kiri (*skewnes kiri*). Hal ini digunakan untuk melihat sebaran data yang dihasilkan pada saat pemodelan konduktivitas hidraulik. Nilai sebaran konduktivitas hidraulik dikonversikan dalam bentuk $\log K$. Nilai konduktivitas hidraulik $\log -5$, mempunyai arti nilai tersebut adalah 10^{-5} m/dtk .

<i>log K</i>	<i>Jumlah Sampel</i>
-5	4
-4.5	11
-4	9
-3.5	6
More	4

Gambar 4
Persebaran Data Awal sebelum Dilakukan Pemodelan

6.2. Hasil Pemodelan Distribusi Konduktivitas Hidraulik

Berdasarkan hasil penentuan konduktivitas hidraulik dengan menggunakan metoda *kriging*, dari jumlah 29 buah data menghasilkan 44.415 nilai konduktivitas hidraulik, yang memiliki nilai yang berbeda antara titik blok model yang satu dengan yang lainnya. Untuk melihat sebaran data yang dihasilkan dari model tersebut perlu dibuat histogram. Sebaran data menghasilkan pola yang mirip dengan kondisi data awal, yaitu sebaran data yang cenderung terdistribusi miring ke kiri (*skewnes kiri*).

Gambar 5
Persebaran Data Awal setelah Dilakukan Pemodelan

Histogram tersebut memberikan gambaran, bahwa nilai permeabilitas batuan yang ada di alam dari titik yang satu ke titik yang lainnya memiliki nilai yang berbeda (heterogen). Sehingga dalam satu lapisan litologi, nilai konduktivitas hidraulik akan bervariasi.

Hasil variogram menunjukkan bahwa, dengan azimuth 0, 45, 90, dan 135 memberikan sebaran yang relative sama pada range 2.500 m. Gambar dibawah ini menunjukkan perbedaan lapisan batuan ditunjukkan oleh perbedaan warna dominan biru dan kuning ke merah. Sehingga hal itu menunjukkan bahwa walau dalam satu lapisan litologi yang sama, memberikan distribusi sebaran nilai konduktivitas hidraulik yang relative heterogen.

Gambar 6
Lapisan Batuan Sedimen dan Batuan Terkekarkan

Nilai konduktivitas hidraulik pada warna biru merupakan representasi dari lapisan lempung yang relative impermeabel, sehingga mencerminkan nilai konduktivitas hidraulik yang kecil. Lapisan pasir pada model ditunjukkan pada warna kuning yang menunjukkan lapisan akuifer pada kondisi yang dangkal. Nilai permeabilitas yang besar dijumpai pada lokasi penelitian di arah utara. Warna merah tersebut merupakan representasi akuifer dalam yang berada pada batuan terkekarkan, yaitu batugamping.

Untuk mengukur ketepatan estimasi nilai konduktivitas hidraulik di daerah penelitian, metode yang digunakan adalah *cross-validation*. Lima (5) sampel yang tidak digunakan sebagai data masukan model berfungsi untuk membandingkan hasil distribusi sebaran konduktivitas hidraulik berdasarkan metoda *kriging*. Perbandingan hasil nilai K dari model dan data uji akuifer disajikan pada tabel berikut :

Tabel 2
Perbandingan Hasil Konduktivitas Hidraulik Model dan Uji *Constan Head* Permeabilitas

x	y	z	log K obs	Log K prediksi
24300	-1200	-2805	-4.7423214	-4.824351
22500	-2300	-2600	-4.1711395	-3.916717
23200	-2000	-3290	-3.8958228	-3.601869
23800	0	-2440	-4.1371732	-3.424596
25000	-1100	-2320	-4.7323938	-4.813883

Gambar 7
Hubungan Data Konduktivitas Hidraulik Model dan Uji *Constan Head* Permeabilitas

Verifikasi model dilakukan dengan tujuan agar pemodelan yang dibuat sesuai dengan kondisi lapangan yang sebenarnya. Hasil pemodelan dari SeGMS dibandingkan hasil 5 sampel uji yang tidak digunakan dalam data masukan model. Sesuai atau tidaknya model matematis tersebut dengan data yang digunakan dapat ditunjukkan dengan mengetahui besarnya nilai r^2 atau juga yang disebut sebagai koefisien determinasi (*coefficient of determination*).

Koefisien determinasi dalam statistika dapat diinterpretasikan sebagai proporsi dari variasi yang ada dalam nilai y dan dijelaskan oleh model persamaan regresi. Dengan kata lain, koefisien determinasi menunjukkan seberapa jauh kesalahan dalam memprakirakan besarnya y dapat direduksi dengan menggunakan informasi yang dimiliki variabel x .

Model persamaan dianggap sempurna apabila nilai $r^2 = 1$. Sebaliknya, apabila variasi yang ada pada nilai y tidak ada yang bisa dijelaskan oleh model persamaan regresi yang diajukan, maka nilai $r^2 = 0$. Dengan demikian, model persamaan regresi dikatakan semakin baik apabila besarnya r^2 mendekati 1 (Ating, S. 2006).

Hasil r^2 pada pemodelan tersebut menghasilkan nilai sebesar 0,89. Angka tersebut menunjukkan bahwa antara data hasil pemodelan dengan nilai konduktivitas hidrolik yang sebenarnya menghasilkan hubungan angka cukup signifikan. Sehingga dengan hasil distribusi sebaran nilai K dengan cara *kriging* mencerminkan bahwa batuan sedimen yang ada di alam memiliki nilai K yang heterogen.

7. KESIMPULAN

Distribusi sebaran konduktivitas hidrolik berdasarkan hasil uji akuifer *constan head* permeabilitas dengan metode *kriging* mampu menjelaskan keberadaan nilai K di batuan sedimen yang relative heterogen. Heterogenitas nilai K sangat mempengaruhi suatu aliran air pada media airtanah. Metode *kriging* terbukti mampu menduga nilai konduktivitas hidrolik pada daerah yang tidak memiliki data.

8. DAFTAR PUSTAKA

- Remy N., Boucher A., Wu J. (2006) : SGeMS User Guide.
Iskandar I., Koike K, (2011) : Distinguishing potential sources of arsenic released to groundwater around a fault zone containing a minesite.
Fabbri, P., (1997) : Transmissivity in the geothermal Euganean basin: a geostatistical analysis. Ground Water 35 (5), 881 – 887.
Ating, S., (2006) : Aplikasi Statistika dalam Penelitian, Pustaka Setia, Bandung.

9. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada segenap rekan – rekan Prodi Rekayasa Pertambangan dan Teknik Air Tanah - ITB. Selain itu juga penulis mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Hidrogeologi Tambang-ITB, Aris Arnanto, Odus Natan, Novita Douw, Indra Bagus, dkk yang telah memberikan bantuan sehingga makalah ini dapat dipresentasikan.