

**PENENTUAN KOEFISIEN HIDRAULIK PADA TAPAK NSD, SERPONG,
BERDASARKAN METODA UJI PERMEABILITAS *IN-SITU****Heri Syaeful*⁽¹⁾, *Sucipta*⁽²⁾⁽¹⁾Pusat Pengembangan Geologi Nuklir-BATAN, ⁽²⁾Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATANEmail : syaeful@batan.go.id, scipta@batan.go.id**Masuk: 15 Januari 2013****Revisi: 15 Februari 2013****Diterima: 8 Maret 2013****ABSTRAK**

PENENTUAN KOEFISIEN HIDRAULIK TAPAK NSD SERPONG BERDASARKAN METODA UJI PERMEABILITAS *IN-SITU*. Sejalan dengan semakin meningkatnya jumlah limbah radioaktif maka PTLR-BATAN berencana untuk membangun fasilitas *Near Surface Disposal* (NSD), terutama pada tahap awal adalah fasilitas *Demo Plant* NSD. NSD merupakan suatu konsep penyimpanan limbah radioaktif tingkat rendah sampai dengan menengah. Aspek yang sangat penting dalam hal studi tapak untuk rencana NSD adalah aspek hidrogeologi terutama yang berkaitan dengan migrasi radionuklida ke lingkungan. Dalam studi migrasi radionuklida parameter awal yang harus diketahui adalah konduktivitas hidraulik. Nilai konduktivitas hidraulik tanah dan batuan di lokasi tapak dapat diperoleh dengan melakukan uji permeabilitas secara *in-situ*. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai konduktivitas tanah dan batuan yang berkisar antara 10^{-6} sampai 10^{-2} cm/det. Nilai terbesar konduktivitas hidraulik berada pada satuan tanah lanau kerikilan yang merupakan akuifer di tapak, dengan kedalaman antara 8-24 m, dan nilai konduktivitas hidraulik mencapai 10^{-2} cm/det.

Kata kunci: Konduktivitas hidraulik, NSD, hidrogeologi, uji permeabilitas**ABSTRACT**

DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY COEFFICIENT IN NSD SITE, SERPONG, BASED ON *IN-SITU* PERMEABILITY TEST METHOD. Inline with the increase of amount of radioactive waste, PTLR-BATAN plans to build the *Near Surface Disposal* (NSD) facility, especially in the preliminary stages is the *Demo Plant* of NSD facility. NSD is a low to medium level radioactive waste storage concept. Most important aspect in the site study for planning NSD is hydrogeological aspect especially related to the migration of radionuclides to the environment. In the study of radionuclide migration, a preliminary parameter which is required to know is the hydraulic conductivity in order to deliver the soil and rock hydraulic conductivity values in the site then conducted the *in-situ* permeability test. Based on the test, obtained soil and rock hydraulic conductivity values ranging from 10^{-6} to 10^{-2} cm/sec. The greatest hydraulic conductivity value located in the gravelly silt soil units which is in the site, constitute as aquifer, with depth ranging from 8-24 m, with hydraulic conductivity value reached 10^{-2} cm/sec.

Keywords: Hydraulic conductivity, NSD, hydrogeology, permeability test**PENDAHULUAN****Latar Belakang**

Kegiatan aplikasi iptek nuklir dalam bidang industri dan medis meningkat, maka jumlah limbah khususnya aktivitas rendah yang perlu dikelola akan bertambah banyak. Sebagai antisipasi kebutuhan jangka panjang, selain adanya instalasi pengolahan limbah dan tempat penyimpanan limbah sementara (*interim storage*), maka harus pula dimulai studi dan pembuatan tempat penyimpanan lestari limbah radioaktif aktivitas rendah. Seperti pada umumnya penyimpanan limbah lestari aktivitas rendah, maka konsep penyimpanan yang

digunakan adalah *Near Surface Disposal/NSD*^[1]. BATAN sebagai lembaga pemerintah penyedia fasilitas nasional pelayanan pengelolaan limbah radioaktif non PLTN, berkewajiban mengembangkan konsep desain NSD yang mempertimbangkan aspek keselamatan masyarakat dan lingkungan. Berdasarkan hal tersebut PTLR-BATAN berencana untuk membangun fasilitas NSD, dan dalam tahapan ini adalah fasilitas *Demo Plant* NSD. Sejalan dengan prinsip *co-location*, maka fasilitas *Demo Plant* NSD sebagai penyimpanan lestari yang merupakan bagian integral dari fasilitas pengolahan dan penyimpanan sementara di PPTN Serpong diasumsikan akan berada di kawasan yang sama.

Berdasarkan hal tersebut maka dilakukan studi karakterisasi akuifer untuk mendapatkan data yang berhubungan dengan aspek hidrogeologi daerah penelitian. Pekerjaan karakterisasi akuifer bertujuan terutama untuk mendapatkan data konduktivitas hidraulik yang sangat penting dalam hal analisis dan pemodelan migrasi radionuklida ke lingkungan^[2]. Ada beberapa metoda yang digunakan dalam uji permeabilitas *in-situ* untuk mendapatkan data koefisien hidraulik. Pemilihan metoda yang paling sesuai harus disesuaikan dengan kondisi bawah permukaan dan sebagaimana signifikan pemanfaatan nilai konduktivitas hidraulik yang akan didapatkan. Secara praktis di lapangan, konduktivitas hidraulik dapat diperkirakan dari jenis litologi, metoda ini juga dapat digunakan sebagai perkiraan awal dan juga penentuan jenis metoda uji permeabilitas yang akan dilakukan.

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan data konduktivitas hidraulik, dan selain itu akan didapatkan pula data muka air tanah dan nilai *Lugeon* dari lapisan batuan di calon tapak fasilitas *Demo Plant Near Surface Disposal* (NSD), PTLR, Serpong.

Lokasi

Lokasi kegiatan berada di lingkungan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, tepatnya di area sebelah Gedung 56, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) – BATAN, berdekatan dengan gedung 56 (Gambar 1).

TATA KERJA

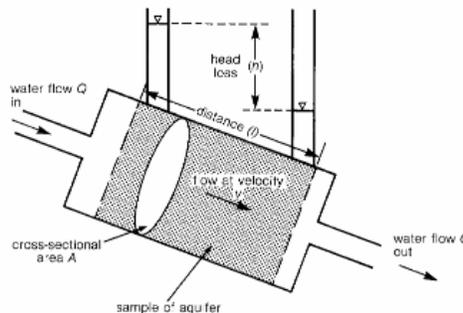
Metodologi

Uji permeabilitas *in-situ* bertujuan terutama untuk mendapatkan data konduktivitas hidraulik yang akan digunakan dalam analisis migrasi radionuklida ke lingkungan. Ada beberapa metoda yang digunakan dalam uji *in-situ* permeabilitas dalam mendapatkan konduktivitas hidraulik. Pemilihan metoda yang paling sesuai harus disesuaikan dengan kondisi bawah permukaan dan sebagaimana signifikan pemanfaatan nilai yang akan didapatkan. Secara praktis di lapangan, konduktivitas hidraulik dapat diperkirakan dari jenis litologi, metoda ini juga dapat digunakan sebagai perkiraan awal dan juga penentuan jenis metoda uji permeabilitas yang akan ditentukan.

Aliran air tanah di dalam akuifer dikontrol oleh adanya ketidaksetimbangan tekanan air atau ketinggian hidrolika (*hydraulic head*) yang berbeda. Perbedaan dalam level air tanah biasa disebut sebagai *head loss* (*h*) dan diekspresikan dalam satuan meter. Sedangkan kemiringan muka air tanah disebut sebagai *hydraulic gradient* (*h/l*), dan merupakan rasio antara ketinggian dan jarak (Gambar 2). Hubungan antara kecepatan aliran air tanah (*Q*) terhadap penampang akuifer (*A*) dan gradien hidraulik (*h/l*) dikenal sebagai Persamaan Darcy dengan formula^[3]:

$$-Q = KA \frac{h}{l}$$

Catatan: nilai negatif merupakan koreksi matematika, menunjukkan aliran air dalam arah ketinggian yang menurun, dalam kegiatan praktis dapat diabaikan



Gambar 2. Ilustrasi terminologi berdasarkan persamaan Darcy^[3].

Metoda uji permeabilitas *in-situ* yang digunakan adalah *constant head* pada tanah dengan butiran kasar dan konduktivitas hidraulik yang besar, *falling head test* pada tanah berbutir halus dengan konduktivitas hidraulik rendah, dan *packer test* atau *pressure test* pada batuan.

| | | Permeability (m/s) | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--|--------------------|---|------------------|------------------|--|------------------|------------------|------------------|---|------------------|-------------------|-------------------|
| | | 10 ⁰ | 10 ⁻¹ | 10 ⁻² | 10 ⁻³ | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁷ | 10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁹ | 10 ⁻¹⁰ | 10 ⁻¹¹ |
| Drainage | | Good | | | | | Poor | | | Practically impervious | | | |
| Soil Types | | Clean gravel | Clean sands, clean sand & gravel mixtures | | | Very fine sands, organic & inorganic silts, mixtures of sand silt & clay, glacial till, stratified clay deposits, etc. | | | | Impervious soils e.g., homogeneous clays below zone of weathering | | | |
| | | | "Impervious" soils modified by effects of vegetation & weathering | | | | | | | | | | |

Gambar 3. Permeabilitas dan karakteristik drainase tanah^[4].

Uji Permeabilitas

Constant head

Metoda *constant head* merupakan metoda pengujian permeabilitas terbuka (*open end*), dimana infiltrasi air kedalam formasi tanah/batuan dilakukan tanpa tekanan atau bantuan pompa. Metoda ini dilakukan apabila tanah diperkirakan mempunyai konduktivitas hidraulik yang cukup besar, dan pada litologi yang tidak terkonsolidasi Prinsip utama dalam *constant head* adalah mempertahankan level air secara konstan sehingga dengan persamaan dapat dihitung nilai koefisien konduktivitas hidrauliknya.

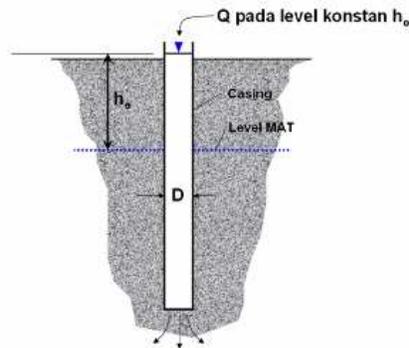
Prosedur pelaksanaan *constant head* dilakukan dengan cara memasukkan pipa lindung sampai batas atas atau sampai kedalaman tanah yang ingin diketahui permeabilitasnya, kemudian pipa lindung diisi penuh dengan air dan selanjutnya debit air yang ditambahkan secara konstan diukur (Gambar 4). Persyaratan penambahan air adalah debit tidak menyebabkan penurunan atau meluapnya level muka air. Pada kondisi tersebut maka konduktivitas hidraulik dapat dihitung dengan formula (BSN, 2006):

$$k = \frac{Q}{5.5rh}$$

k : koefisien kelulusan air (cm/det)
Q : debit air yang masuk (cm³/s)
r : jari-jari lubang bor (cm)
h : h₁ + h₂ (cm)

atau berdasarkan formula dari *US Bureau of Reclamation* pada tahun 1960^[4] :

$$k = \frac{Q}{2.75Dh_o}$$



Gambar 4. Metoda uji permeabilitas *constant head*.

Packer test

Packer test merupakan metoda pengujian permeabilitas dengan prinsip *close-end* atau tertutup. *Packer* merupakan suatu peralatan yang dapat digunakan untuk membentuk suatu sistem penyekat di dalam lubang bor, sehingga dapat membatasi bagian-bagian tanah/batuan yang akan diuji (Gambar 5). Syarat dapat dilakukannya *packer test* adalah lapisan yang diuji merupakan formasi batuan yang kompak dan padat.

Adapun tujuan dari metode pengujian ini adalah untuk memperoleh konduktivitas hidraulik dan nilai *Lugeon*. Beberapa pengertian yang berkaitan dengan metode pengujian ini :

- sifat lulus air batu atau tanah adalah kemampuan batu atau tanah mengalirkan air melalui rongga antar butir dan atau diskontinuitas;
- diskontinuitas adalah bidang atau celah yang menyebabkan batu bersifat tidak menerus, antara lain berupa perlapisan, kekar, dan sesar;

- c) koefisien kelulusan air (k) adalah angka yang menunjukkan kemampuan batu atau tanah mengalirkan air dan dinyatakan dalam satuan panjang dibagi satuan waktu (cm/detik);
- d) satu *Lugeon* (1 Lu) adalah banyaknya air dalam liter per menit yang masuk ke dalam batu atau tanah melalui lubang bor sepanjang satu meter dengan tekanan 10 bar (1 bar = 1,0197 kg/cm²).

Rumus yang digunakan dalam perhitungan koefisien kelulusan air (k) tergantung pada panjang bagian tanah atau batuan yang diuji (L), sebagai berikut

- untuk $L \geq 10r$ (r = jari-jari lubang bor), digunakan persamaan

$$k = \frac{Q}{2\pi Lh} \ln\left(\frac{L}{r}\right)$$

- untuk $10r > L \geq r$, digunakan persamaan

$$k = \frac{Q}{2\pi Lh} \sinh^{-1}\left(\frac{L}{2r}\right)$$

dengan:

- k : koefisien kelulusan air, (cm/detik);
 Q : debit air yang masuk, (cm³/detik);
 L : panjang lubang bor yang diuji, (cm);
 r : jari-jari lubang bor (cm);
 h : $h_p + h_s$, (cm);

- e) Penentuan nilai *Lugeon*

Perhitungan uji kelulusan air dengan menggunakan tekanan yang bervariasi dapat menghasilkan nilai *Lugeon* yang berbeda, tergantung pada kondisi aliran air yang terjadi dalam tanah atau batuan yang diuji. Grafik aliran air yang dibuat berdasarkan data hasil uji kelulusan air bertekanan yang merupakan hubungan tekanan p dan debit aliran air Q/L dimaksudkan antara lain untuk mengetahui:

- Perilaku tanah atau batuan yang diuji dengan cara injeksi air pada tekanan tertentu
- Kondisi aliran air yang terjadi dalam tanah atau batuan tersebut dapat berupa kondisi laminar, turbulen, dilasi, pengikisan dan penyumbatan.

Perhitungan nilai *Lugeon* dilakukan dengan formula sebagai berikut:

$$Lu = \frac{10Q}{pL} \text{ atau } Lu = \frac{10V}{pLt}$$

dengan:

Lu : nilai *Lugeon*;

Q : debit air yang masuk (liter/menit) melalui lubang bor berukuran NX yaitu berdiamater 75,7 mm;

p : tekanan uji, (kg/cm²);

(p = p_m+p_s dengan p_m adalah tekanan manometer dan p_s adalah h tinggi tekanan air yang telah dikonversikan ke dalam satuan kg/cm²);

L : panjang bagian yang diuji, (m);

V : volume air yang diinjeksikan, (liter) ke dalam lubang bor berukuran NX yaitu berdiamater 75,7 mm;

t : waktu (menit)

Dalam hal ini aliran air berupa aliran laminer bila nilai *Lugeon* dari setiap tahapan memberikan nilai yang mendekati sama. Aliran turbulen terjadi bila nilai *Lugeon* yang diperoleh pada tekanan puncak lebih kecil dari pada nilai *Lugeon* yang diperoleh dari kedua tahapan tekanan yang lebih rendah dan juga nilai *Lugeon* yang diperoleh pada setiap tahapan yang lebih rendah dari tekanan puncak baik tahapan peningkatan dan pada tahapan penurunan memperoleh nilai *Lugeon* yang hampir sama. Bila nilai *Lugeon* yang dilakukan pada tekanan puncak lebih tinggi dari nilai *Lugeon* pada kedua tekanan lebih rendah dan nilai *Lugeon* pada kedua tekanan yang lebih rendah ini memiliki nilai yang hampir sama, aliran ini disebut aliran dilasi. Nilai *Lugeon* yang dilakukan pada setiap tekanan dari kelima tahapan tekanan baik saat peningkatan tekanan maupun penurunan tekanan memberikan nilai *Lugeon* yang terus meningkat, pada tahap tekanan terakhir dengan tekanan yang terendah diperoleh nilai *Lugeon* yang terbesar, aliran ini disebut aliran pengikisan. Aliran penyumbatan terjadi pada suatu aliran dengan nilai *Lugeon* memberikan nilai yang bertambah kecil pada tahapan tekanan baik tahapan peningkatan maupun tahapan penurunan, sehingga nilai *Lugeon* diakhir pengujian diperoleh nilai *Lugeon* yang terkecil (Tabel 1).

Interpretasi aliran air berdasarkan nilai *Lugeon* diantaranya adalah:

- dilasi : pelebaran rekahan sementara akibat tekanan tertentu pada saat pengujian kelulusan air bertekanan
- pengikisan : pelebaran rekahan akibat hilangnya material pengisi atau akibat kikisan pada saat pengujian kelulusan air bertekanan
- penyumbatan : pengisian/penyumbatan rekahan oleh material pada saat pengujian kelulusan air bertekanan

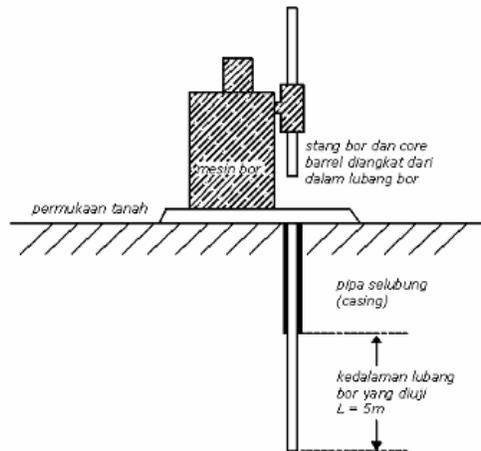
Tabel 1
Analisis jenis dan kondisi aliran berdasarkan data *Lugeon* [5].

| No | Urutan Pengaliran | Skala Tekanan | Skala Nilai Lugeon | Penentuan Jenis Aliran | Pemilihan Nilai Lugeon |
|----|---|---------------|--------------------|--|---|
| 1 | Airan I Airan II Airan III Airan IV Airan V | | | Nilai Lugeon yang hampir sama (Aliran Laminier) | Nilai rata-rata |
| 2 | Airan I Airan II Airan III Airan IV Airan V | | | Nilai Lugeon terkecil terjadi pada tekanan tertinggi (Aliran Turbulen) | Nilai Lugeon terkecil pada tekanan tertinggi |
| 3 | Airan I Airan II Airan III Airan IV Airan V | | | Nilai Lugeon yang tertinggi terjadi pada tekanan tertinggi (Aliran Dilasi) | Nilai Lugeon dari nilai Lugeon yang terkecil dan tekanan yang terendah |
| 4 | Airan I Airan II Airan III Airan IV Airan V | | | Nilai Lugeon meningkat sesuai dengan pengaliran (Aliran Pengikisan) | Nilai Lugeon yang tertinggi |
| 5 | Airan I Airan II Airan III Airan IV Airan V | | | Nilai Lugeon menurun sesuai dengan tahapan pengaliran (Aliran Penyumbatan) | Nilai Lugeon yang terkecil. Biasanya terjadi pada akhir pengaliran/aliran |

Constant head

Pekerjaan uji permeabilitas menggunakan metoda *constant head* dilakukan pada litologi tanah tidak terkonsolidasi ataupun batuan apabila dikhawatirkan uji permeabilitas dengan tekanan (*packer test*) akan membuka struktur batuan dan menjadikan keruntuhan pada dinding pemboran.

Uji permeabilitas dengan metoda *constant head* dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan pemboran sampai kedalaman yang diinginkan untuk uji permeabilitas. Sedangkan ujung pipa *casing* diturunkan sampai batas atas kedalaman lubang bor yang akan diuji. Pipa *casing* berguna untuk membatasi dan menutup lubang bor yang akan diuji. Setelah pemboran sampai kedalaman yang diinginkan, selanjutnya stang bor dan *core barrel* diangkat dari dalam lubang bor (Gambar 6).



Gambar 6. Skema uji permeabilitas metoda *constant head*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metoda uji permeabilitas *in-situ* yang digunakan pada suatu lapisan batuan ditentukan berdasarkan hasil pengamatan inti bor dan estimasi besaran konduktivitas hidraulik, yaitu:

- *constant head* pada tanah dengan butiran kasar dan konduktivitas hidraulik yang besar
- *falling head test* pada tanah berbutir halus dengan konduktivitas hidraulik rendah, dan
- *packer test* atau *pressure test* pada batuan.

Pengujian dengan metoda *constant head*

Sebelum pengujian dilakukan terlebih dahulu diukur level muka air tanah, dan jenis mata bor yang digunakan dicatat untuk perhitungan jari-jari lubang bor. Pada awal pengujian, air dimasukkan kedalam lubang bor sampai muka air rata dengan *casing*. Setelah air rata maka pengukuran *constant head* dimulai dengan mencatat debit air yang masuk dari *water meter* dan mempertahankan level air agar tetap konstan pada bibir *casing*. Pengukuran dilakukan selama setidaknya sepuluh menit dan debit yang masuk dicatat secara menerus (Gambar 7).

Perhitungan konduktivitas hidraulik dilakukan dengan menggunakan rumus $k = \frac{Q}{5,5.r.h}$, untuk setiap debit dalam satuan menit. Selanjutnya nilai konduktivitas hidraulik dihitung berdasarkan nilai rata-rata dari konduktivitas hidraulik yang didapat dari perhitungan setiap menit.

Pengujian dengan metoda *packer test*

Packer test merupakan metoda pengujian permeabilitas dengan prinsip *close end* atau tertutup. *Packer* merupakan suatu peralatan yang dapat digunakan untuk membentuk suatu sistem *seal* di dalam lubang bor, sehingga dapat membatasi bagian-bagian tanah/batuan yang akan diuji. *Packer* yang digunakan di lapangan terdiri dari dua macam yaitu *packer* udara dan *packer* mekanik. *Packer* udara merupakan karet yang dapat mengembang apabila dimasukkan udara bertekanan.

Syarat dapat dilakukannya *packer test* adalah lapisan yang diuji merupakan formasi batuan yang solid. Pengujian *packer test* dilakukan dengan metoda *single packer*, dimana pengujian dilaksanakan bersamaan dengan kemajuan pemboran setiap kedalaman 5 meter pada litologi batuan yang solid, dalam hal ini di lapangan ditemukan batulempung.

Sebelum pelaksanaan, peralatan *packer* udara dicoba terlebih dahulu dipermukaan. Uji coba bertujuan untuk melihat efek tekanan udara pada sifat mengembang *packer*. *Packer* yang

digunakan di lapangan merupakan *packer built-up*, penggunaan *packer* lokal dihindarkan karena sangat rawan terhadap kebocoran pada saat diberikan tekanan air tertentu pada *packer*. Selain itu sifat mengembang *packer built-up* dapat jauh lebih besar bahkan lebih dari 8 kali diameter awalnya. Kondisi tersebut sangat ideal karena akan memberikan tekanan lateral yang jauh lebih besar dan dapat mencegah terjadinya kebocoran.

Pada awal pengujian setelah keseluruhan stang bor dan *core barrel* diangkat dari dalam lubang bor, segera dilakukan pengukuran muka air tanah. Selanjutnya peralatan *packer* dimasukkan kedalam lubang bor (Gambar 8). Apabila digunakan *packer* udara maka selang udara dimasukkan dan diikat secara hati-hati pada pipa pengantar. Pada ujung pipa pengantar dipasang pipa dengan *nozzle* untuk mengalirkan air ke dalam lubang yang diuji.

Setelah peralatan terpasang, selanjutnya dilakukan pengujian kelulusan air bertekanan. Kebocoran dapat dihindari dengan cara, tekanan udara pada *packer* dijaga konstan agar tetap pada kisaran 70 psi. Air yang masuk kedalam formasi batuan diusahakan memberikan tekanan sebesar mungkin, minimal lebih besar dari pada tekanan air statik (p_s). Aliran air bertekanan dilakukan sebanyak 5 tahap, dengan selang waktu 10 menit. Berdasarkan debit air yang masuk dan tekanan yang tercatat, maka dapat dihitung konduktivitas hidraulik dan nilai *Lugeon*. Dikarenakan panjang lubang yang diuji lebih besar dari 10 kali jari-jari lubang bor, maka

rumus yang digunakan untuk menghitung konduktivitas hidraulik adalah $k = \frac{Q}{2\pi Lh} \ln\left(\frac{L}{r}\right)$,

sedangkan perhitungan nilai *Lugeon* menggunakan formula $Lu = \frac{10 \cdot Q}{p \cdot L}$. Nilai konduktivitas

hidraulik yang didapat dari setiap tahapan selanjutnya dirata-ratakan, dan didapatkan suatu nilai konduktivitas hidraulik yang mewakili panjang lubang yang diuji.

Selain nilai konduktivitas hidraulik dilakukan juga interpretasi nilai *Lugeon* untuk mendapatkan gambaran kondisi aliran dalam batuan pada saat terjadi tekanan. *Lugeon* adalah angka yang menunjukkan kemampuan tanah atau batuan mengalirkan air. Satu *Lugeon* merupakan banyaknya air dalam liter per menit yang masuk ke dalam tanah atau batuan melalui lubang bor berukuran NX ($\varnothing 75,7$ mm) sepanjang satu meter dengan tekanan 10 bar (1 bar = 1,0197 kg/cm²).

Nilai Konduktivitas Hidraulik dan *Lugeon* pada Tanah/Batuan

Hasil uji permeabilitas pada setiap lubang bor baik menggunakan metoda *constant head* maupun *packer test* digabungkan dalam suatu grafik konduktivitas hidraulik berdasarkan kedalaman lubang bor. Sebagai referensi ditampilkan juga log litologi untuk mendapatkan gambaran kesesuaian antara konduktivitas hidraulik dengan jenis litologi. Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 9 sampai Gambar 13.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian permeabilitas tersebut di atas, diketahui bahwa kisaran konduktivitas hidraulik untuk satuan tanah/batuan dilokasi penelitian terdapat suatu pola yang baik. Pada tanah lempung dan lempung lanauan yang merupakan tanah pelapukan, nilai konduktivitas hidraulik berada pada kisaran 10^{-4} sampai 10^{-2} cm/det atau berada di bawah nilai konduktivitas hidraulik batuan asalnya. Lanau kerikilan merupakan litologi yang sangat penting untuk dikenali, karena merupakan litologi yang mengontrol hampir keseluruhan aliran air tanah yang berada di lokasi penelitian. Pada litologi tersebut nilai konduktivitas hidraulik tertinggi adalah 4.63×10^{-2} cm/det, didasarkan pengujian pada lubang bor DH-02. Pengujian pada lubang bor DH-01 mendapatkan nilai 4.24×10^{-2} , atau relatif sama dengan lubang bor DH-02. Pada lubang bor DH-03 nilai yang hampir sama didapatkan, sedangkan pada lubang bor lain nilai yang didapatkan lebih kecil mencapai lebih kecil dari setengah nilai yang didapatkan pada DH-02 dan DH-01.

Tabel 2

Kisaran konduktivitas hidraulik berdasarkan pengujian lapangan.

| No | Satuan Tanah/Batuan | Konduktivitas Hidraulik (cm/det) |
|----|---------------------|----------------------------------|
| 1 | Lempung | $10^{-4}-10^{-3}$ |
| 2 | Lempung lanauan | $10^{-3}-10^{-2}$ |
| 3 | Lanau kerikilan | 10^{-2} |
| 4 | Batulanau | $10^{-6}-10^{-3}$ |
| 5 | Batupasir | 10^{-4} |

Kondisi aliran air di dalam tanah dianalisa berdasarkan variasi nilai *Lugeon* pada saat pengujian. Kondisi aliran hanya diketahui untuk lapisan batuan karena pada tanah metoda pengujian yang dilakukan *constant head*. Berdasarkan pengujian pada lubang bor DH-02 kedalaman 30 sampai 50 meter pada litologi batulanau, diketahui bahwa aliran air secara umum adalah dilasi atau pembukaan rekahan sementara akibat tekanan. Aliran dilasi dicirikan dengan nilai *Lugeon* tertinggi pada tekanan air yang tertinggi. Pada kedalaman 40-45 meter terjadi aliran penyumbatan. Aliran penyumbatan dicirikan dengan makin kecilnya nilai *Lugeon*.

Hasil interpretasi nilai *Lugeon* tersebut hampir serupa dengan pengamatan secara visual-manual berdasarkan data inti bor dan progres pekerjaan pemboran. Berdasarkan pengamatan visual-manual dapat terlihat kekar-kekar pada batuan yang apabila mendapat tekanan air akan terbuka untuk sementara, namun dikarenakan banyak material lempung dan lanau yang diperkirakan mempunyai potensi mengembang, maka rekahan tersebut kembali tertutup. Kemajuan pemboran pada DH-02 juga banyak menemukan kendala pada litologi batulanau ini dikarenakan lubang bor yang selalu menutup kembali setelah selang waktu tertentu, terutama apabila terjadi pergantian hari maka lubang bor dapat menutup sampai mencapai lebih dari 10 meter.

Pada lubang bor DH-05 nilai *Lugeon* mencerminkan kondisi aliran dilasi dan laminar pada litologi batulanau dan batugamping. Litologi batulanau dan batugamping berdasarkan pengamatan visual manual terlihat heterogen, dimana terdapat perselingan lanau dan gamping dengan ketebalan sentimetrik. Pada batulanau juga banyak ditemukan nodul-nodul gamping.

Korelasi Nilai Konduktivitas hidraulik

Hasil pengujian dan perhitungan permeabilitas pada batuan Formasi Bojongmanik diketahui nilainya sangat bervariasi pada kisaran 10^{-3} – 10^{-6} cm/det. Hal tersebut disebabkan batuan yang tidak homogen, secara umum batulanau berselingan dengan batulempung, batupasir, dan batugamping. Batuan yang relatif homogen diketahui pada lubang bor DH-02 pada kedalaman antara 40–65 meter dengan konduktivitas hidraulik antara 10^{-4} sampai 10^{-6} cm/det, dan pada lubang bor DH-04 kedalaman 25 sampai 50 meter dengan konduktivitas hidraulik antara 10^{-2} sampai 10^{-3} . Nilai konduktivitas hidraulik batuan pada zona tersebut juga sangat dipengaruhi oleh keberadaan kekar pada batuan yang cukup intensif.

Penampang permeabilitas antara sumur pemboran menggambarkan kondisi permeabilitas secara lateral. Permeabilitas sangat tinggi dan membentuk kontras pada kedalaman 0–20 meter, dengan nilai tertinggi pada lubang bor DH-02 (Gambar 16). Pada korelasi antara sumur DH-03 dan DH-04 terdapat variasi permeabilitas yang lebih intensif, terutama pada lubang bor DH-04 (Gambar 17). Dari pengamatan litologi terlihat pada batulanau terdapat butiran feldspar putih lunak berukuran halus. Diperkirakan butiran feldspar tersebut merubah sifat fisik batulanau menjadi agak pasiran, atau menjadikan pori-pori batuan semakin besar dan menjadikan nilai konduktivitas hidraulik lebih besar dari nilai secara teoritis untuk batulanau.

Diagram pagar (*fence diagram*) menggambarkan sebaran nilai konduktivitas hidrolik dengan sudut pandang relatif ke arah barat laut atau di lapangan berarah lokasi penelitian ke arah lereng (Gambar 18). Nilai konduktivitas hidrolik tanah permukaan disekitar DH-01 dan DH-02 rendah, dan meninggi ke arah barat daya atau ke arah lereng. Pada tanah lanau kerikilan di kedalaman sekitar 10–25 m, nilai konduktivitas hidrolik tinggi pada daerah barat laut dan mengecil ke arah barat daya. Sedangkan pada kedalaman antara 25–70 meter, nilai konduktivitas hidrolik terbesar berada pada sumur DH-04.

KESIMPULAN

1. Nilai konduktivitas hidraulik satuan tanah dan batuan di lokasi calon tapak NSD berkisar antara 10^{-6} sampai 10^{-2} cm/det. Tanah lempung mempunyai nilai konduktivitas hidraulik antara 10^{-4} - 10^{-3} cm/det, tanah lempung lanauan antara 10^{-3} - 10^{-2} cm/det, tanah lanau kerikilan 10^{-2} cm/det, batulanau antara 10^{-6} - 10^{-3} cm/det, dan batupasir 10^{-4} cm/det.
2. Nilai terbesar konduktivitas hidraulik berada pada satuan tanah lanau kerikilan yang merupakan akuifer di lokasi penelitian berada pada kedalaman 8–24 m, dengan besaran mencapai 10^{-2} cm/det.
3. Secara umum nilai *Lugeon* mencerminkan kondisi aliran dilasi dan laminar pada litologi batulanau dan batugamping. Secara khusus pada sumur DH-02 kedalaman 40-45 meter yang merupakan litologi batulanau terjadi aliran penyumbatan. Aliran tersebut diperkirakan berhubungan dengan sifat mengembang material lempung di dalam batulanau.

DAFTAR PUSTAKA

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Disposal Option for Disused Radioactive Sources”, Technical Reports Series No. 436, Vienna, 2005
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Characterization of Groundwater Flow for Near Surface Disposal Facilities”, IAEA-TECDOC-1199, Vienna, 2001
3. BRASSINGTON, R, “Field Hydrogeology”, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2007.
4. CORNFORTH, D. H., “Landslide in Practice”, John Wiley and Sons, 2005
5. STANDAR NASIONAL INDONESIA - REVISI SNI 03-2411-1991, “Cara Uji Kelulusan Air Bertekanan di Lapangan”, Badan Standarisasi Nasional, 2006