

**STUDI GEOLOGI TEKNIK TAPAK PENYIMPANAN AKHIR LIMBAH
RADIOAKTIF (LRA) DEMO PLANT TIPE NSD KEDALAMAN MENENGAH DI
PUSPIPTEK, SERPONG**

**ENGINEERING GEOLOGY STUDY OF DEMO PLANT RADIOACTIVE WASTE FINAL
DISPOSAL SITE OF MEDIUM DEPTH NSD TYPE AT PUSPIPTEK, SERPONG**

Heri Syaeful⁽¹⁾, Sucipta⁽²⁾, Imam Achmad Sadisun⁽³⁾

⁽¹⁾Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir – BATAN

Jl. Lebak Bulus Raya No. 9, Ps. Jumat, Jakarta 12440

⁽²⁾Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN

Gedung 50, Kawasan Puspipstek Serpong, Tangerang Selatan 15310

⁽³⁾Jurusan Teknik Geologi – ITB

Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

E-mail: syaeful@batan.go.id

Naskah diterima: 28 Oktober 2013, direvisi: 18 Maret 2014, disetujui: 28 April 2014

ABSTRAK

Penyimpanan akhir limbah radioaktif bertujuan untuk menjaga agar zat radioaktif tidak terlepas ke lingkungan sampai aktivitas zat tersebut turun ke level yang aman. Konsep penyimpanan akhir limbah radioaktif (LRA) yang akan dikembangkan di area Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Puspipstek), Serpong adalah penyimpanan akhir limbah radioaktif dekat permukaan (*near surface disposal* - NSD). NSD berdasarkan kedalaman terbagi dua macam yaitu NSD dekat permukaan dan NSD kedalaman menengah. Konsep NSD pada penelitian ini adalah NSD kedalaman menengah, yaitu antara 30 – 300 meter. Pada saat konstruksi NSD di kedalaman menengah dibutuhkan pekerjaan ekskavasi bawah permukaan atau pembuatan terowongan. Analisis tegangan *in-situ* dan deformasi bawah permukaan dilakukan untuk mengetahui besaran dan distribusi tegangan yang terbentuk di dalam tanah/batuan serta deformasi yang terjadi pada saat dilakukan ekskavasi bawah permukaan. Berdasarkan analisis diketahui nilai tegangan dan sebaran tegangan tensional maupun kompresional berkisar antara -441 kPa sampai 4,028 kPa dengan nilai deformasi alami atau tanpa perkuatan antara 4.4 cm sampai 13.5 cm. Nilai deformasi yang cukup besar dimana mencapai 13.5 cm menunjukkan diperlukan rekayasa perkuatan pada saat ekskavasi. Desain rekayasa perkuatan pada setiap tahapan ekskavasi mengacu hasil pemodelan pola distribusi tegangan dan deformasi.

Kata kunci: geologi teknik, limbah radioaktif, *near surface disposal* (NSD), Puspipstek, Serpong

ABSTRACT

Final disposal of radioactive waste intended to keep radioactive substances does not released to the environment until the substance activity decreased to the safe level. Storage concept of radioactive waste (RAW) final disposal that will be developed at the area of

Puspipetek, Serpong is near surface disposal (NSD). Based on depth, NSD divided on two type, near surface NSD and medium depth NSD. Concept NSD in this research is medium depth NSD, which is between 30 – 300 meters. During NSD construction in medium-depth required the works of sub-surface excavation or tunneling. Analysis of in-situ stresses and sub-surface deformation performed to recognize the stress magnitude and its distribution that developed in soil/rock as well as the deformation occurred when sub-surface excavation takes place. Based on the analysis, acknowledged the magnitude of tensional and compression stress and its distribution that range from -441 kPa to 4,028 kPa with values of natural deformation or without reinforcement between 4.4 to 13.5 cm. A rather high deformation value which is achieved 13.5 cm leads to necessity of engineering reinforcement during excavation. The designs of engineering reinforcement on every excavation stage refer to the result of modeling analysis of stress and deformation distribution pattern.

Keywords: *engineering geology, radioactive waste, near surface disposal (NSD), Puspipetek, Serpong*

PENDAHULUAN

Penyimpanan limbah radioaktif bertujuan untuk menjaga agar zat radioaktif tidak terlepas ke lingkungan sampai zat tersebut mempunyai aktivitas yang aman untuk lingkungan. Penurunan aktivitas zat radioaktif terjadi akibat adanya proses peluruhan isotop menuju level stabil dengan memancarkan energi radiasi. Waktu yang diperlukan untuk menurunkan aktivitas limbah radioaktif level rendah sampai menengah mencapai waktu ratusan tahun, menyebabkan proses studi dan analisis tapak harus dapat memberikan jaminan bahwa suatu tapak penyimpanan limbah dalam kondisi yang stabil sampai zat radioaktif yang berada di dalamnya aman untuk lingkungan^[1]. NSD telah diaplikasikan di banyak negara, dengan berbagai variasi dari tapak dalam hal tipe dan jumlah limbah, termasuk perencanaan fasilitas. Dengan studi tapak, desain, dan konstruksi yang tepat, maka penyimpanan limbah dekat permukaan akan memberikan kondisi penyimpanan limbah radioaktif yang efektif dalam hal biaya dan aman^[2]. Sebagai antisipasi dari

kegiatan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir yang telah berjalan cukup lama, telah cukup banyak limbah radioaktif yang ditimbulkannya baik limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) sebagai Instansi yang bertanggung jawab dalam pengelolaan limbah radioaktif memulai studi dan perencanaan pembuatan disposal. Dalam tahap awal PTLR berencana akan membangun fasilitas *Near Surface Disposal* (NSD) yang bersifat “Demo Plant”. Diharapkan dengan dibangunnya fasilitas “Demo Plant” ini selain berfungsi sebagai disposal limbah radioaktif juga dapat berfungsi sebagai fasilitas ruang peraga yang mempertunjukkan kepada masyarakat tentang kehandalan sistem disposal limbah radioaktif^[3].

Tipe NSD Bawah Permukaan

Dengan mempertimbangkan jenis/tipe penyimpanan dan kebutuhan adanya sistem penghalang rekayasa (*engineering barrier system/EBS*), maka dapat dibuat kriteria opsi

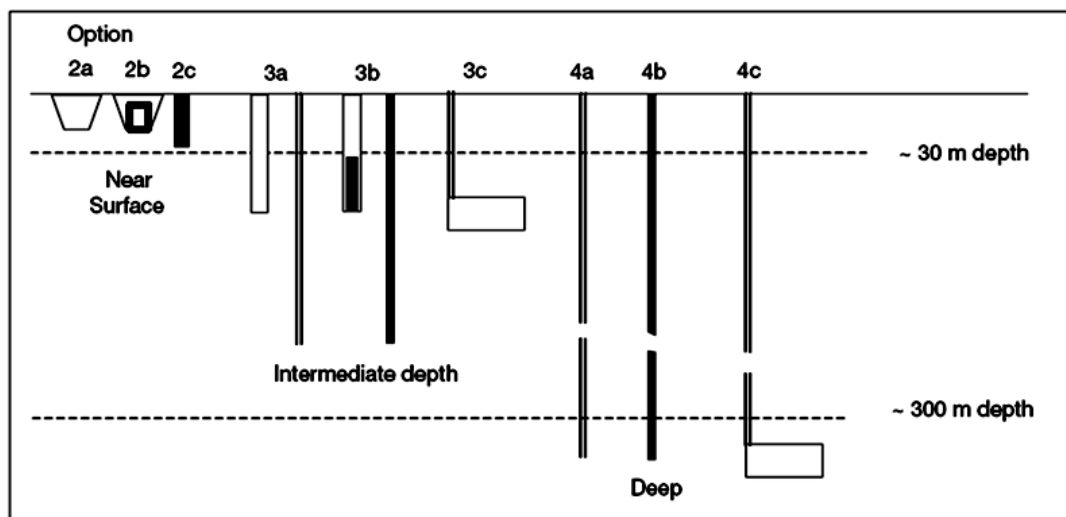
penyimpanan limbah radioaktif sebagai berikut (Gambar 1):

1. Opsi 1: meluruh dalam kontainer
2. Opsi 2a: fasilitas sederhana dekat permukaan
3. Opsi 2b: fasilitas dekat permukaan dengan rekayasa
4. Opsi 2c: fasilitas lubang bor atau lorong dekat permukaan
5. Opsi 3a: lubang bor atau lorong pada kedalaman menengah tanpa sistem penghalang rekayasa
6. Opsi 3b: lubang bor atau lorong pada kedalaman menengah dengan sistem penghalang rekayasa
7. Opsi 3c: repositori pada kedalaman menengah
8. Opsi 4a: lubang bor dalam tanpa sistem penghalang rekayasa

9. Opsi 4b: lubang bor dalam dengan sistem penghalang rekayasa

10. Opsi 4c: repositori tambang geologi

Selain NSD dekat permukaan, dimana terutama tipe 2b atau fasilitas dekat permukaan dengan rekayasa yang saat ini menjadi pertimbangan utama untuk dibangun, alternatif lain perlu dikaji berdasarkan pertimbangan keamanan penyimpanan LRA. Secara prinsip penyimpanan LRA, kedalaman dari permukaan akan menambah keamanan dilihat dari segi akses yang lebih terbatas. Alternatif yang akan dikaji tersebut yaitu NSD pada kedalaman menengah. Berdasarkan pertimbangan dua kepentingan yaitu sebagai tempat penyimpanan dan fasilitas “demo” maka NSD kedalaman menengah yang dipilih adalah berupa repositori atau ruang penyimpanan (opsi 3c).



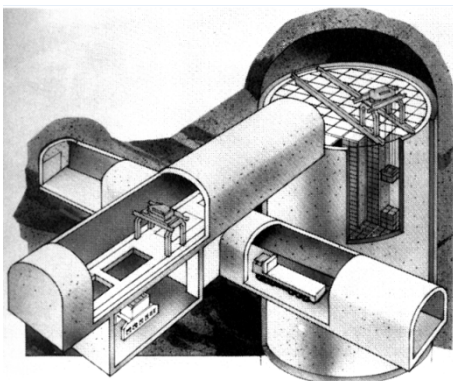
Gambar 1. Pilihan konseptual dalam penyimpanan limbah radioaktif^[4].

NSD bawah permukaan tidak mempunyai banyak alternatif tipe pilihan dibandingkan NSD pada zona *vadose*, dan masih jarang diaplikasikan di negara-negara lain. NSD bawah permukaan dibangun di bawah level muka airtanah, menggunakan

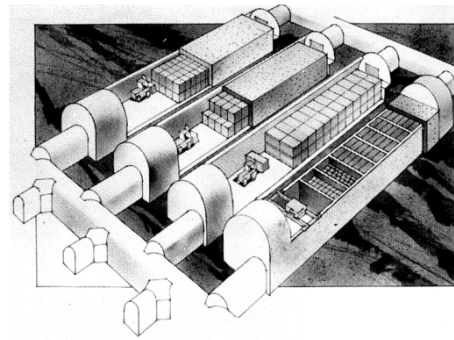
sistem tambahan pelindung rekayasa (*engineering barrier*) yang terbuat dari beton dan lapisan kedap air seperti lempung bentonit. Secara umum desain NSD bawah permukaan lebih mendekati desain jenis penyimpanan *geologic disposal*. Tipe NSD

yang diadaptasi untuk diaplikasikan adalah penyimpanan limbah lestari Swedia (*Swedish Final Repository – SFR*) untuk limbah level menengah dan rendah. NSD SFR tersebut pertamakali dioperasikan pada 1988, mempunyai kapasitas 60,000 m³, dan akan dikembangkan untuk menampung 100,000 m³ limbah yang dihasilkan dari dekomisioning PLTN Forsmark^[1].

NSD SFR terletak pada batuan dasar, 50 m di bawah dasar laut, berjarak sekitar 1 km dari Pantai Baltik. NSD terdiri dari sebuah *silo* (Gambar 2) dan 4 buah *cavern* (Gambar 3). *Silo* merupakan tempat penyimpanan limbah level menengah, terutama limbah resin pertukaran ion yang dipadatkan dalam semen atau bitumen. Limbah dibungkus di dalam beton atau kubus baja berukuran 1.2 x 1.2 x 1.2 m³. Silo berukuran tinggi 50 m dengan diameter 25 m dan dikelilingi oleh pelindung lempung bentonit. *Rock cavern* berukuran panjang 160 m dan lebar 15 sampai 20 m dengan tinggi bervariasi antara 10 sampai 17 m^[1].



Gambar 2. *Silo* untuk penyimpanan limbah radioaktif level menengah^[1].



Gambar 3. *Rock cavern* untuk penyimpanan limbah radioaktif level rendah sampai menengah^[1].

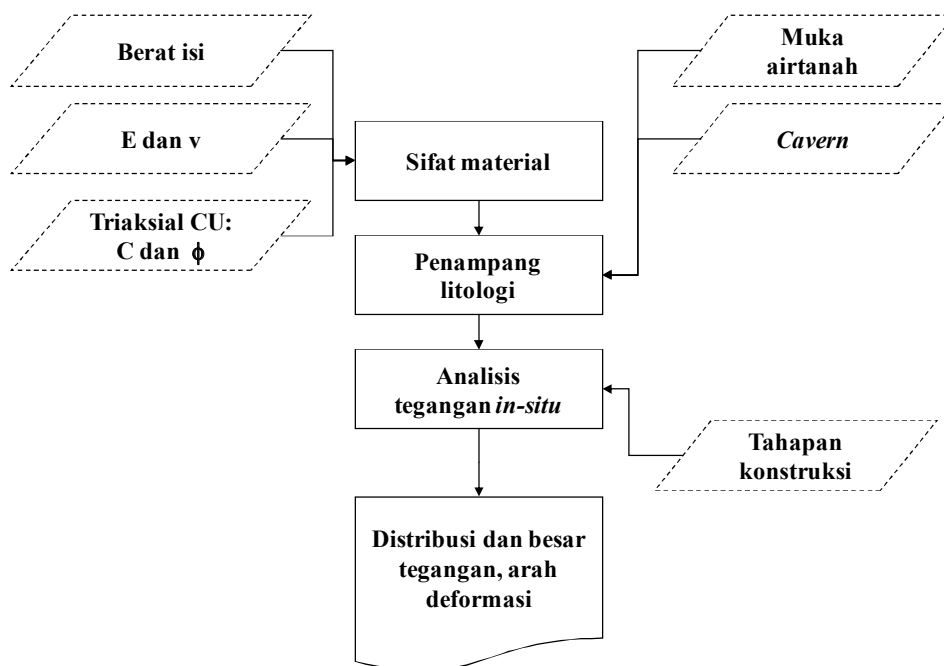
METODOLOGI

Analisis Tegangan *In-Situ*

Massa batuan di bawah permukaan mengalami kondisi tegangan yang dihasilkan dari berat massa tanah/batuan di atasnya (*overburden*) dan tegangan yang dihasilkan dari sistem tektonik. Ketika terjadi bukaan di dalam tanah, tegangan disekitar bukaan tersebut akan terdistribusi ulang^[5]. Tegangan *in-situ* adalah tegangan pada material di bawah permukaan sebelum terjadi ekstraksi material. Tegangan tersebut disebabkan oleh berat dari material yang berada di atas suatu material (tegangan *overburden*). Deformasi dari suatu massa di bawah tegangan vertikal akan menyebabkan terbentuknya tegangan horizontal. Analisis tegangan *in-situ* dilakukan untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada massa tanah dan batuan pada kondisi alami dan perubahannya berdasarkan tahapan konstruksi. Data yang digunakan dalam analisis adalah berat isi, kohesi, sudut geser dalam, modulus elastisitas, dan *Poisson's ratio*^[6]. Data berat isi didapatkan dari uji laboratorium sifat fisik tanah/batuan, kohesi dan sudut geser dalam dari uji triaksial. Modulus elastisitas tanah di estimasi berdasarkan kekerasan tanah, sedangkan untuk batuan dihitung berdasarkan nilai RMR. *Poisson's ratio* tanah/batuan

didapatkan dari referensi hasil penelitian sebelumnya. Penampang litologi yang dipilih dalam analisis adalah di sekitar titik tengah lokasi rencana tapak yaitu sekitar DH-02. Data muka airtanah dimasukkan dalam penampang untuk menghitung tegangan efektif. Muka airtanah yang dimasukkan merupakan pembacaan muka airtanah

tertinggi. Selanjutnya ditentukan kedalaman dan bentuk *cavern* untuk pemodelan dan analisis. Tahapan konstruksi dilakukan dengan asumsi agar diketahui pola perubahan distribusi dan besar tegangan efektif pada tanah/batuan, termasuk arah deformasi, yang merupakan data keluaran akhir dari analisis tegangan *in-situ* (Gambar 4).



Gambar 4. Alur analisis tegangan *in-situ*.

Data berat isi untuk tanah dan batuan didapatkan dari hasil analisis berat isi. Data yang dimasukkan dalam analisis adalah berat isi *bulk* untuk tanah di atas muka airtanah dan berat isi tersaturasi untuk tanah/batuan di bawah muka airtanah. Kohesi dan sudut geser dalam untuk tanah didapatkan dari hasil uji laboratorium *triaxial consolidated undrained (triaxial CU)* untuk mendapatkan nilai kuat geser efektif atau setelah terkonsolidasi tanpa terdrainase. Batuan kohesi dan sudut geser dalam didapatkan dari hasil uji *triaxial compressive undrained*.

Nilai modulus elastisitas untuk tanah didapatkan dari tipikal nilai modulus elastik

tanah (Tabel 1) dan nilai *Poisson's ratio* dari tipikal nilai *Poisson's ratio* tanah (Tabel 2). Satuan Lempung diklasifikasikan pada lempung menengah dengan modulus elastisitas rata-rata 33.5 MPa dan *Poisson's ratio* pada lempung tidak tersaturasi sebesar 0.2. Satuan Lempung lanauan diklasifikasikan dalam lempung kaku dengan modulus elastisitas rata-rata 71.8 MPa dan *Poisson's ratio* pada lempung pasir sebesar 0.25. Satuan Lanau kerikilan diklasifikasikan dalam pasir lanauan dengan modulus elastisitas rata-rata 107.7 MPa dan *Poisson's ratio* pada lanau sebesar 0.325.

Tabel 1. Tipikal Nilai Modulus Elastik Tanah^[7]

Tanah	Modulus Elastisitas (ksf)	Modulus Elastisitas (kPa)
Lempung		
Lempung sangat lunak	5 – 50	479 – 4,788
Lempung lunak	50 – 200	4,788 – 19,152
Lempung menengah	200 – 500	19,152 – 47,880
Lempung kaku, lempung lanauan	500 – 1,000	47,880 – 95,761
Lempung pasir	250 – 2,000	23,940 – 191,521
Lempung serpihan	1,000 – 2,000	95,761 – 191,521
Pasir		
Pasir lepas	100 – 250	9,576 – 23,940
Pasir padat	250 – 1,000	23,940 – 95,761
Pasir padat dan kerikil	1,000 – 2,000	95,761 – 191,521
Pasir lanauan	250 – 2,000	23,940 – 191,521

Tabel 2. Tipikal Nilai *Poisson's Ratio* Tanah^[8]

Deskripsi Material	Kisaran ν	Tipikal ν
Lempung (tersaturasi)	0.4 – 0.5	0.45
Lempung (tidak tersaturasi)	0.1 – 0.3	0.2
Lempung pasir	0.2 – 0.3	0.25
Lanau	0.3 – 0.35	0.325
Pasir padat	0.2 – 0.4	0.3
Pasir berbutir kasar	0.15	0.15
Pasir berbutir halus	0.25	0.25
Batuan dasar	0.1 – 0.4	0.25

Nilai modulus elastisitas batuan didapatkan dari hasil perhitungan dengan metoda tidak langsung berdasarkan nilai RMR (Tabel 3). Nilai RMR satuan batuan didapatkan dari hasil perhitungan rata-rata RMR yang termasuk dalam satuan batuan tersebut. Nilai RMR Satuan batupasir sebesar 50 dikonversi ke dalam modulus deformasi batuan dengan rumus $E_m = 10^{(RMR-10)/40}$ ^[9], didapatkan nilai E_m 1.8 Gpa. Satuan batulanau 2 dengan RMR 50.7 dikonversi menggunakan rumus $E_m = 2RMR - 100$ ^[9], didapatkan nilai E_m 1.3 GPa. Demikian pula

untuk Satuan batugamping (RMR 54, E_m 8 GPa) dan Satuan batulanau 1 (RMR 47, E_m 1.5 GPa). *Poisson's ratio* untuk batuan didapatkan dari perbandingan dengan hasil penelitian Goodman yang mengukur rasio modulus dan *Poisson's ratio* berbagai jenis batuan^[6]. Satuan batupasir diasumsikan serupa dengan batupasir Berea, nilai *Poisson's ratio* 0.38, Satuan batulanau 2 dengan batupasir Hanckensack, nilai *Poisson's ratio* 0.22, dan Satuan batugamping dengan batugamping Solenhofen, nilai *Poisson's ratio* 0.29 (Tabel 4).

Tabel 3. Metode Tidak Langsung dalam Penentuan Modulus Deformasi Batuan^[9]

$Em = 2RMR - 100$	untuk $RMR > 50$	[Bieniawski, 1978]
$Em = 10^{(RMR-10)/40}$	untuk $RMR < 50$	[Serafim and Pereira, 1983]
$Em = 25 \log_{10} Q$	untuk $Q > 1$	[Grimstad and Barton, 1993]
$Em = E_{r\ stat} \times Em_{dyn} / E_{r\ dyn}$		[Clerici, 1993]
$Em = 5.6 RMi^{0.375}$	untuk $RMi > 0.1$	[Palmstrom, 1995]
$Em = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	untuk $\sigma_c < 100$ MPa	[Hoek and Brown, 1998]

dimana,

Em = Modulus deformasi dari massa batuan (dalam GPa)

RMR = *Rock Mass Rating* (Bieniaswki, 1973)

Q = *Q system* (Barton et al., 1974)

σ_c = Kuat tekan uniaksial (dalam MPa) dari contoh batuan dengan diameter sampel 50 mm

RMi = *Rock Mass index* (Palmstrom, 1995)

GSI = *Geological Strength Index* (Hoek and Brown, 1998)

$E_{r\ stat}$ = Modulus elastisitas statis contoh batuan

Em_{dyn} = Modulus elastisitas dinamik contoh batuan

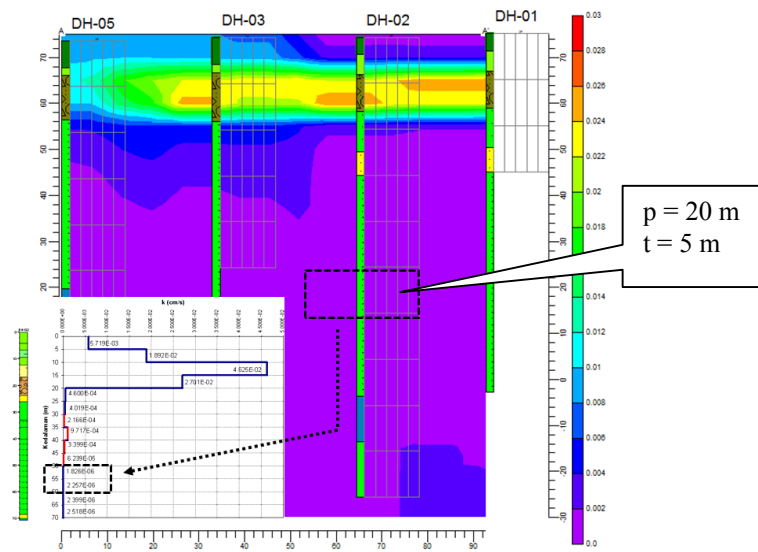
$E_{r\ dyn}$ = Modulus deformasi dinamik *in-situ*

Keseluruhan data masukan dalam pemodelan dan analisis *in-situ* ditampilkan pada Tabel 5. Data tersebut merupakan nilai rata-rata dari beberapa nilai hasil pengujian laboratorium. Pada lapisan tanah dengan asumsi tanah akan terkonsolidasi terlebih dahulu sebelum terdeformasi, maka digunakan data *triaxial CU*.

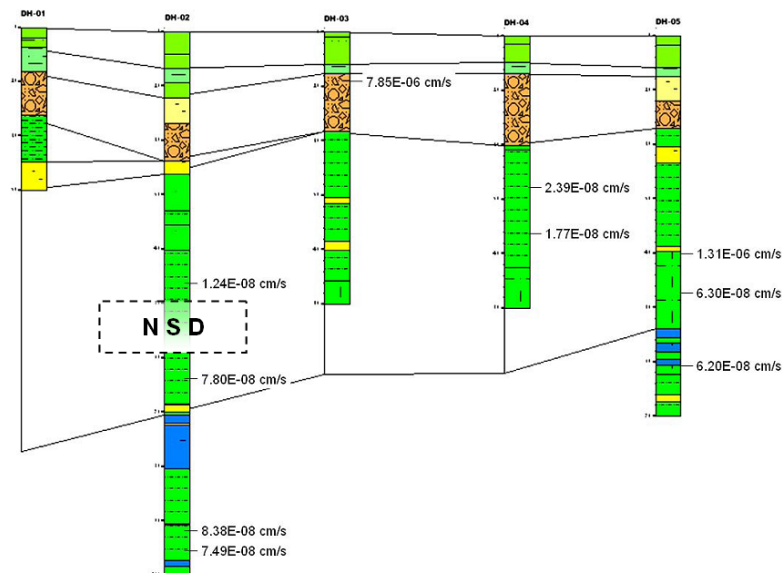
01 dan DH-02 rendah, dan meninggi ke arah barat daya atau ke arah lereng. Pada tanah lanau kerikilan di kedalaman sekitar 10 – 25 m, nilai permeabilitas tinggi pada daerah barat laut dan mengecil ke arah barat daya. Pada kedalaman antara 25 – 70 meter, nilai permeabilitas terbesar berada pada sumur DH-04^[10].

Data Konduktivitas Hidrolik

Diagram pagar dan blok model 3 dimensi menggambarkan sebaran nilai permeabilitas dengan sudut pandang relatif ke arah barat laut atau di lapangan berarah lokasi penelitian ke arah lereng (Gambar 5). Nilai permeabilitas tanah permukaan di sekitar DH-



Gambar 6. Analisis penempatan NSD pada lapisan di bawah permukaan berdasarkan data hasil uji permeabilitas *in-situ*.



Gambar 7. Data hasil uji permeabilitas di laboratorium dengan metode *falling head* dan posisi NSD.

Tabel 5. Data Parameter Sifat Fisik dan Keteknikan Tanah/Batuan

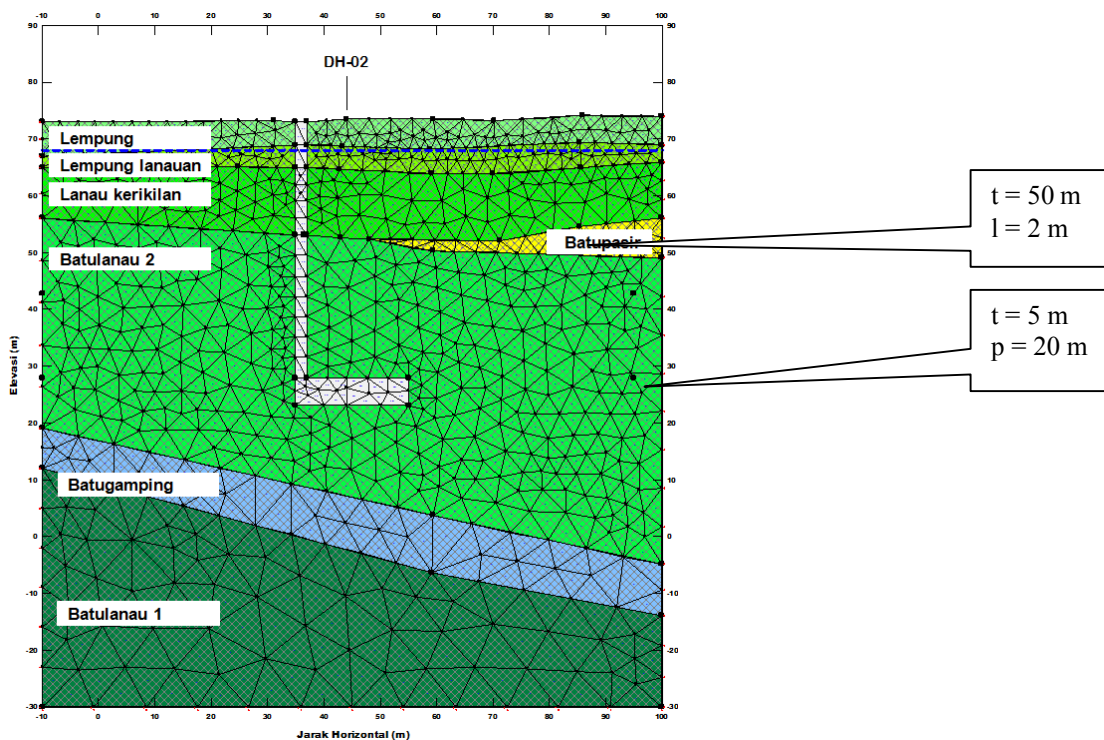
Lapisan Tanah/Batuan	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	Triaksial UU		Triaksial CU		Kekakuan	
			ϕ (°)	C (kPa)	ϕ' (°)	C' (kPa)	E	ν
Lempung	14.89	18.58	14.33	65.5	9.31	46.09	33.5	0.20
Lempung lanauan	14.48	18.20	12.56	44.5	22.98	21.58	71.8	0.25
Lempung kerikilan	15.26	19.39	16.09	58.4	19.83	44.72	107.7	0.33
Batupasir	14.11	15.13	10.37	65.7	-	-	1800	0.38
Batulanau 2	13.63	15.98	20.17	36.8	-	-	1300	0.22
Batugamping	17.68	18.68	42.84	88.3	-	-	8000	0.29
Batulanau 1	15.45	16.80	24.20	15.7	-	-	1500	0.22

HASIL DAN PEMBAHASAN

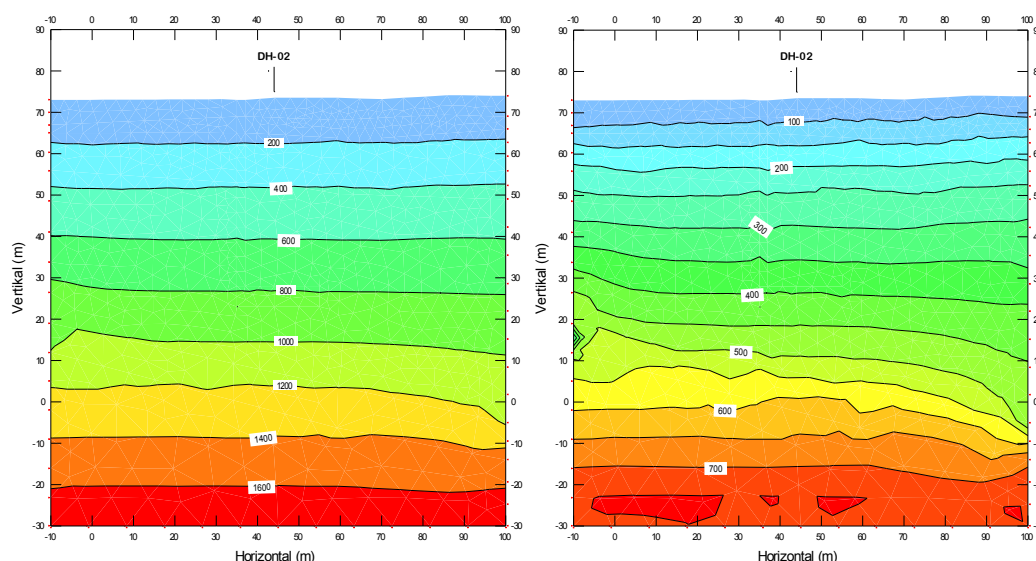
Tahapan awal analisis adalah dengan melakukan penggambaran penampang konseptual dari rencana pembuatan *cavern* (rongga) bawah permukaan (Gambar 8). Selanjutnya parameter sifat keteknikan tanah/batuan yang telah ditentukan terlebih dahulu dimasukkan dalam model dan dilakukan analisis tegangan *in-situ*. Analisis memperlihatkan variasi tegangan vertikal total yang bertambah sesuai kedalaman, berkisar antara 11 kPa di permukaan (elevasi 73) sampai 1,710 kPa di kedalaman sekitar 100 m atau elevasi -30 m. Tegangan vertikal efektif berkisar antara 62 kPa di permukaan

sampai 761 kPa di kedalaman sekitar 100 m (Gambar 9).

Perhitungan secara manual dilakukan juga untuk memeriksa hasil perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak. Perhitungan dilakukan dengan tahapan perhitungan tegangan total, tekanan pori, dan tegangan efektif (Tabel 6). Hasil perhitungan digambarkan dalam bentuk grafik hubungan antara elevasi, tegangan total, tekanan pori, dan tegangan efektif (Gambar 10). Secara umum hasil perhitungan secara manual menunjukkan pola variasi tegangan vertikal total dan efektif yang relatif sama dengan perhitungan menggunakan perangkat lunak.



Gambar 8. Penampang dan model elemen hingga untuk analisis tegangan *in-situ*.



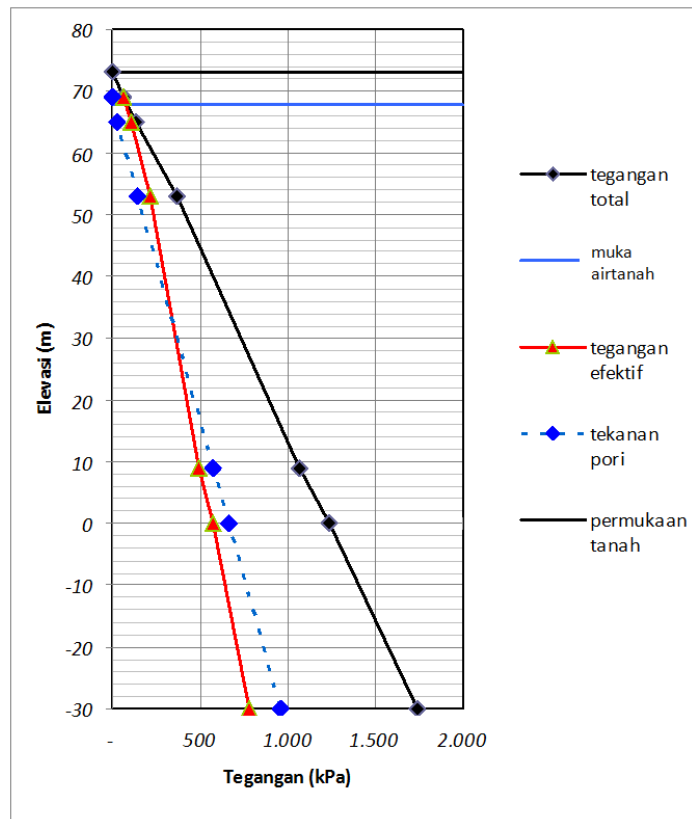
Gambar 9. Variasi tegangan *overburden* total (kiri) dan efektif (kanan).

Tabel 6. Perhitungan Tegangan *In-Situ* Total dan Efektif

Litologi	Elevasi (m)	Kedalaman ke permukaan (m)	Ketebalan lapisan (m)	Berat isi tanah/ batuan normal (kN/m ³)	Berat isi tanah/ batuan tersaturasi (kN/m ³)	Tegangan (kPa)	Tegangan total (kPa)	Kedalaman ke MAT (m)	Berat isi air (kN/m ³)	Tekanan pori (kPa)	Tegangan efektif (kPa)
	73	0	0	-	-	-	-	(5.15)	9.81	-	-
Lempung	69	4	4	14.89	18.58	60	60	(1.15)	9.81	-	60
Lempung lanauan	65	8	4	-	18.20	73	132	2.85	9.81	28	104
Lanau kerikilan	53	20	12	-	19.39	233	365	14.85	9.81	146	219
Batulanau 2	9	64	44	-	15.98	703	1,068	58.85	9.81	577	491
Batugamping	0	73	9	-	18.68	168	1,236	67.85	9.81	665	571
Batulanau 1	-30	103	30	-	16.80	504	1,740	97.85	9.81	960	781

Analisis pemodelan ekskavasi bawah permukaan dilakukan untuk mengetahui variasi perubahan tegangan efektif dan pola deformasi di bawah permukaan dalam kondisi alami atau tanpa perkuatan. Hasil analisis yang diharapkan adalah diketahuinya beberapa parameter geologi teknik yang penting dalam perencanaan ekskavasi bawah permukaan. Analisis ekskavasi bawah permukaan dilakukan berdasarkan tahapan ekskavasi, guna mengetahui perubahan nilai tegangan efektif dan arah deformasi

tanah/batuan di bawah permukaan pada setiap tahapan kerja. Analisis dilakukan dengan mengasumsikan tahapan ekskavasi yang terbagi dalam empat tahapan ekskavasi, dengan asumsi tahapan awal pembuatan terowongan *shaft* dan dilanjutkan dengan pembuatan terowongan utama atau rongga bawah permukaan. Terowongan *shaft* berukuran diameter 2 m dengan kedalaman 50 m. Sedangkan terowongan utama berukuran panjang 20 m dan tinggi 5 m (Gambar 11).



Gambar 10. Grafik hubungan antara elevasi dengan tegangan total/efektif hasil perhitungan secara manual.

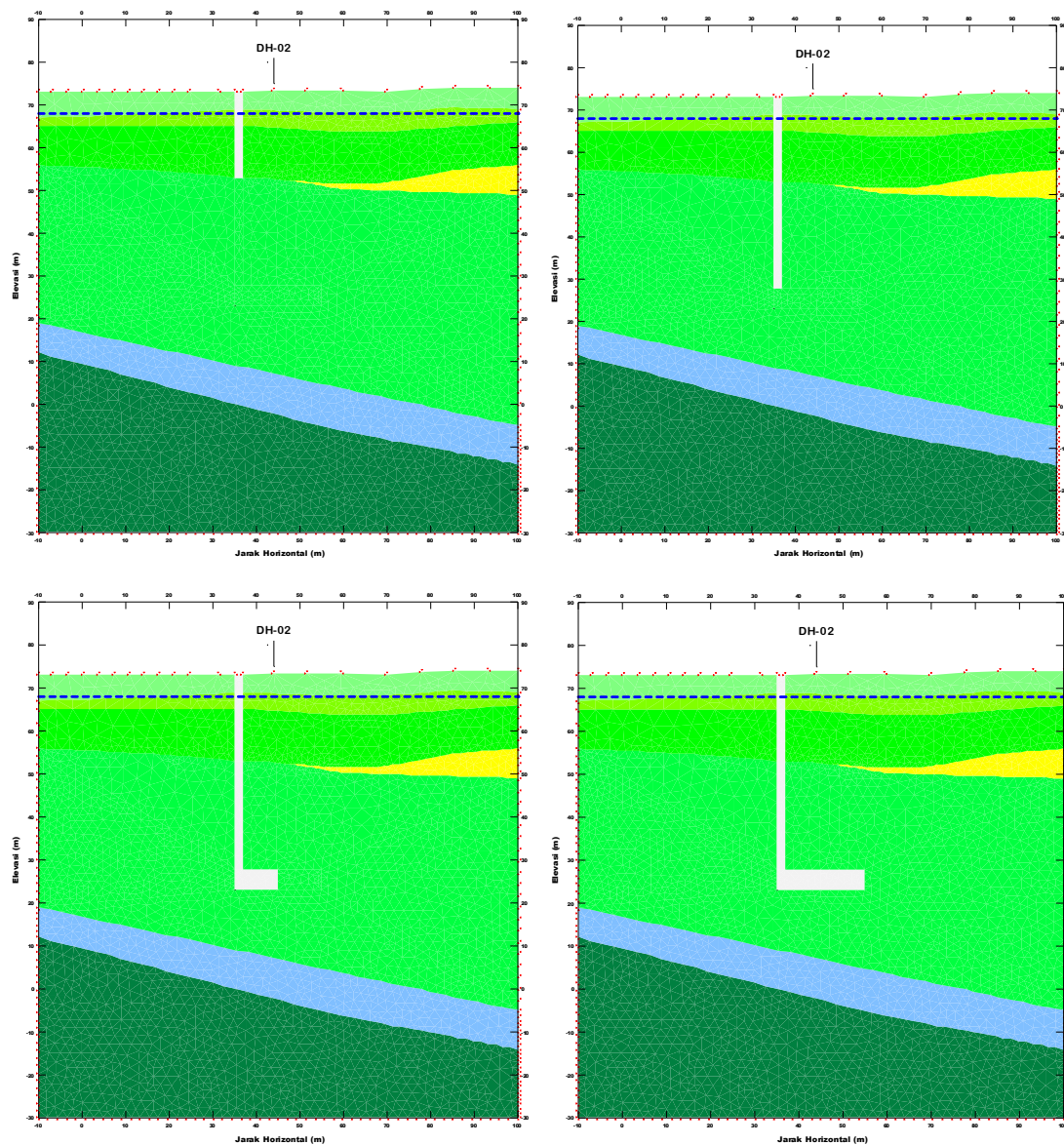
Pada analisis ekskavasi tahap awal yaitu terowongan *shaft* sampai batas kontak litologi antara satuan lanau kerikilan dan batulanau 2, terlihat tegangan vertikal efektif (σ_{eff}) pada bukaan berkisar antara 83 kPa di permukaan tanah sampai 386 kPa di bagian ujung bukaan. Pola deformasi tanah menunjukkan arah dominasi horizontal menuju bagian bukaan dengan nilai deformasi maksimal 4.4 cm di dekat permukaan tanah (Gambar 12). Analisis ekskavasi tahap kedua yaitu terowongan *shaft* sampai kedalaman 50 m di bawah permukaan tanah pada satuan batulanau 2, diketahui nilai tegangan vertikal efektif (σ_{eff}) berkisar antara 79 kPa di permukaan tanah sampai 863 kPa di bagian ujung bukaan. Pola deformasi menunjukkan dominasi arah horizontal dengan nilai

deformasi maksimal 5.9 cm di zona dekat permukaan tanah (Gambar 13).

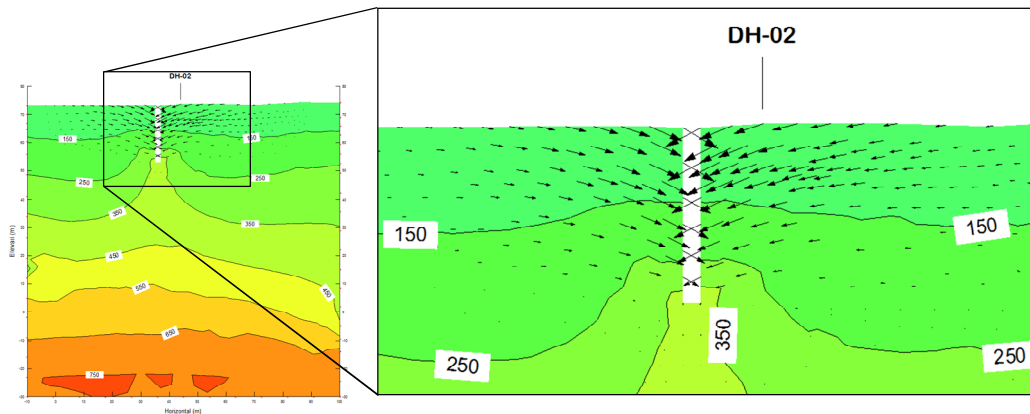
Analisis ekskavasi tahap ketiga yaitu ekskavasi terowongan utama sampai bagian tengah rencana bukaan, diketahui nilai tegangan vertikal efektif (σ_{eff}) berkisar antara -443 kPa atau bersifat tensional di ujung pertemuan terowongan *shaft* dengan terowongan utama, sampai 1,878 kPa di bagian ujung terowongan utama. Pola deformasi menunjukkan arah deformasi horizontal dan sebagian vertikal menuju lubang bukaan terowongan utama dengan nilai deformasi maksimal 7.4 cm di dekat permukaan tanah (Gambar 14). Analisis ekskavasi tahap keempat yaitu ekskavasi dari bagian tengah sampai ujung terowongan utama, diketahui nilai tegangan vertikal efektif berkisar antara -441 kPa atau bersifat tensional di pertemuan antara terowongan

shaft dengan terowongan utama sampai 4,028 kPa di bagian ujung terowongan utama. Pola deformasi menunjukkan dominasi arah horizontal dan sebagian berarah vertikal menuju lubang bukaan dengan nilai deformasi maksimal 13.5 cm di dekat permukaan tanah (Gambar 15). Hasil pemodelan tegangan dan deformasi ini mengkonfirmasi hasil penelitian Ghosh [5] dimana ketika terjadi bukaan di dalam tanah,

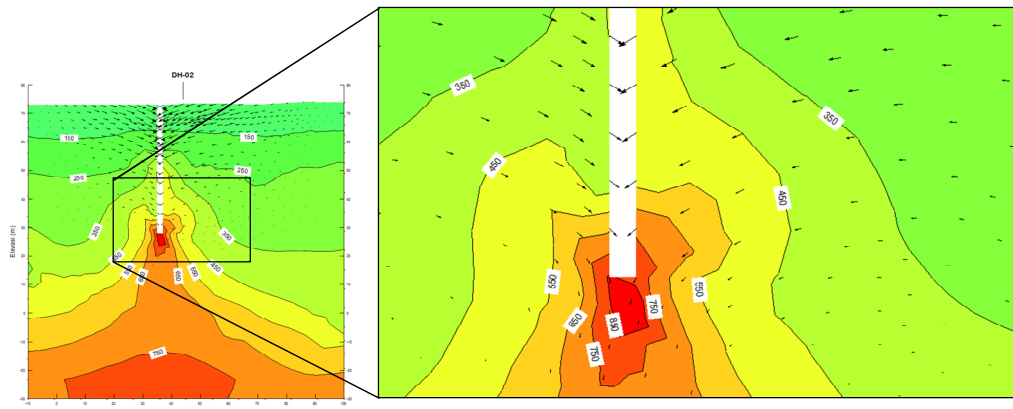
tegangan di sekitar bukaan akan terdistribusi ulang. Pada zona dimana tegangan tidak terakomodasi dengan material lainnya, maka akan terjadi deformasi. Nilai deformasi yang cukup besar dimana mencapai 13.5 cm menunjukkan diperlukan rekayasa perkuatan teknik pada saat ekskavasi. Desain rekayasa perkuatan teknik pada setiap tahapan ekskavasi mengacu hasil analisis pola tegangan dan deformasi.



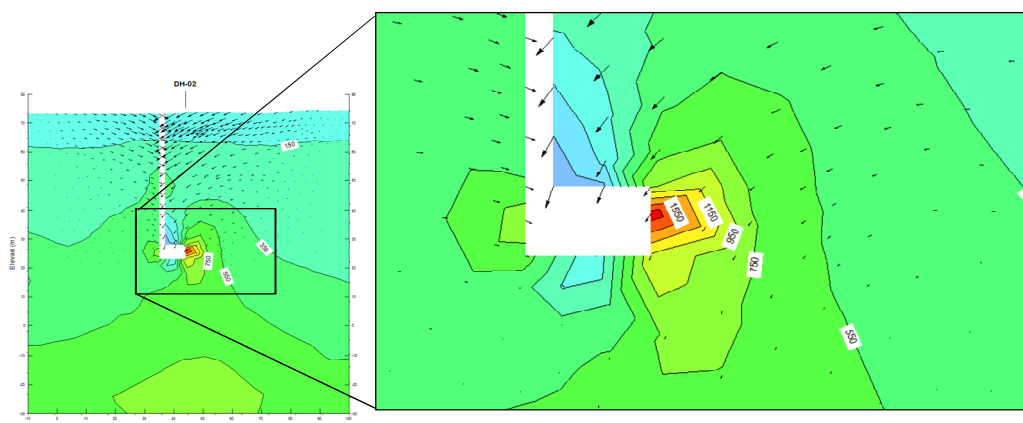
Gambar 11. Asumsi tahapan ekskavasi bawah permukaan.



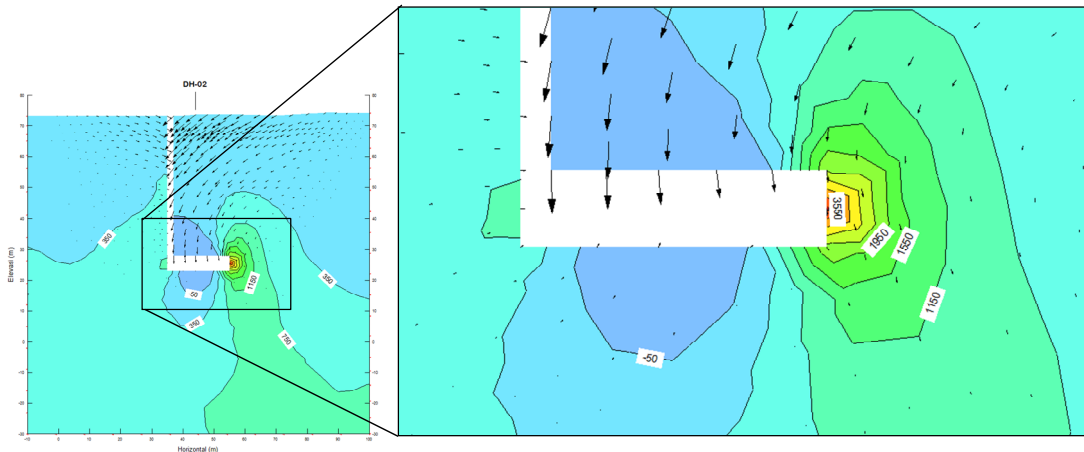
Gambar 12. Variasi tegangan vertikal efektif dan pola deformasi pada tahapan awal ekskavasi bawah permukaan (awal pembuatan terowongan *shaft*). Keterangan: kontur menunjukkan nilai tegangan vertikal efektif, vektor panah menunjukkan pola deformasi.



Gambar 13. Variasi tegangan vertikal efektif dan pola deformasi pada tahapan kedua ekskavasi bawah permukaan (akhir pembuatan terowongan *shaft*). Keterangan: kontur menunjukkan nilai tegangan vertikal efektif, vektor panah menunjukkan pola deformasi.



Gambar 14. Variasi tegangan vertikal efektif dan pola deformasi pada tahapan ketiga ekskavasi bawah permukaan (awal pembuatan terowongan utama/bukaan bawah permukaan). Keterangan: kontur menunjukkan nilai tegangan vertikal efektif, vektor panah menunjukkan pola deformasi.



Gambar 15. Variasi tegangan vertikal efektif dan pola deformasi pada tahapan keempat ekskavasi bawah permukaan (akhir pembuatan terowongan utama/bukaan bawah permukaan). Keterangan: kontur menunjukkan nilai tegangan vertikal efektif, vektor panah menunjukkan pola deformasi.

KESIMPULAN

Analisis pemodelan ekskavasi bawah permukaan dilakukan untuk mengetahui variasi perubahan tegangan efektif dan pola deformasi di bawah permukaan dalam kondisi alami atau tanpa perkuatan. Analisis pemodelan ekskavasi dilakukan dengan metode *staging* atau setiap tahapan ekskavasi, dimulai dari pembuatan terowongan *shaft* sampai pembuatan terowongan utama. Berdasarkan analisis diketahui nilai tegangan dan sebaran tegangan tensional maupun kompresional yang berkisar antara -441 kPa sampai 4,028 kPa dengan nilai deformasi alami atau tanpa perkuatan antara 4.4 cm sampai 13.5 cm. Nilai deformasi yang cukup besar dimana mencapai 13.5 cm menunjukkan diperlukan rekayasa perkuatan teknik pada saat ekskavasi. Desain rekayasa perkuatan teknik pada setiap tahapan ekskavasi mengacu hasil analisis pola tegangan dan deformasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste", IAEA-TECDOC-1256, Vienna, Austria, 2001.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste", SAFETY GUIDE No. WS-G-1.1, Vienna, Austria, 1999.
3. SUSILOWATI, D., SUCIPTA, SUGANDA, D., "Konsep Desain Fasilitas Demo-Plant Penyimpanan Limbah Radioaktif Dekat Permukaan (Near Surface Disposal) di Kawasan Nuklir Serpong", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah IX, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN dan Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serpong, 2011.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Disposal Options for Disused Radioactive Sources", Technical Reports Series No. 436, Vienna, Austria, 2005.

5. GHOSH, A.K., “Rock Stress Measurements for Underground Excavations”, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, 2008.
6. GOODMAN, R. E., “Introduction to Rock Mechanics – Second Edition”, University of California, Berkeley, 1989.
7. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEER, “Settlement Analysis”, EM 1110-1-1902, Washington, 1990.
8. CHRISTOPHER, B. R., SCHWARTS, C., BOUDREAU, R., “Geotechnical Aspects of Pavement”, FHWA NHI-05-037, U.S. Department of Transportation, Washington, 2006.
9. PALMSTROM, A., SINGH, R., “The Deformation Modulus of Rock Masses”, Tunneling and Underground Space Technology, 2001, Vol. 16, No. 3, pp 115 – 131.
10. SYAEFUL, H., SUCIPTA, “Penentuan Koefisien Hidraulik pada Tapak NSD, Serpong, Berdasarkan Metode Uji Permeabilitas In-Situ”, Eksplorium Pusat Pengembangan Geologi Nuklir – BATAN, Volume 34 No. 1, Jakarta, 2013.