

Analisis Perubahan Tekanan Air Pori pada Tanah Lunak akibat Beban *Trial Embankment* dengan menggunakan *Plaxis Versi 7.2*.

Pore Water Pressure Alteration Analysis in Soft Soil Effluence of Trial Embankment Load with Plaxis 7.2

Adhe Noor Patria ^{#1}, Kabul Basah Suryolelono ^{#2}, Bambang Suhendro ^{#3}

^{#1} Program Studi Teknik Sipil Universitas Jenderal Soedirman Purwokerto Indonesia,

^{#2,3} Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Abstract— *Soft soil could be found easily in Indonesia. Constructions that built on this soil; such as embankment; face some obstructions, for instance long period consolidation, difficult soil compaction, unstable slope of embankment and high settlement value for long period. Consolidation related to particle size of soil grains, soil permeability coefficient and pore size between soil particles. This research was carried out with numerical simulation and aimed to analyze the change in pore water pressures in soft soil due to embankment load.*

Numerical simulation was carried out by using Plaxis version 7.2. The time periods for construction and consolidation were the same with field measurement values. Total times for both stages were 102 days. Material model used were Mohr Coulomb Model and input material model that were used were the same with filed measurement values.

The results showed that at the end of construction stage there always an increasement in pore water pressure (excess pore water pressure existed) and the decrease of pore water pressure occurred in consolidation period. Excess pore water pressures of soil below embankment were at area A, depth 0,5 was -22,8093 kPa, at area B (depth 9 m) was -21,5576 kPa and at area C (depth 13 m) was -14,159 kPa.

Keywords— *embankment, excess pore water pressure, consolidation*

PENDAHULUAN

Tanah merupakan bahan yang sangat tidak homogen dan sering menimbulkan berbagai kendala selama pembangunan konstruksi terutama apabila di lokasi konstruksi jenis tanah lunak (*soft soil*). Sebagai contoh adalah tanah lunak di sepanjang jalan raya Kendal – Kaliwungu, Semarang. Konstruksi yang didirikan di atas tanah ini; seperti *embankment* jalan raya atau jalan rel; sering mengalami kendala seperti waktu konsolidasi yang cukup lama, sukarnya pemadatan tanah, ketidakstabilan lereng timbunan (*embankment*) dan tingkat penurunan jangka panjang yang besar.

Salah satu karakter tanah lunak yang sangat berpengaruh pada konstruksi, baik pada saat pelaksanaan maupun pada waktu setelahnya (pasca konstruksi) adalah konsolidasi. Konsolidasi berkaitan erat dengan komposisi dan kondisi tanah itu sendiri, dalam kasus ini adalah tanah lunak yang memiliki permeabilitas tanah yang rendah dan memiliki muka air tanah yang tinggi. Menurut Das (1985) besarnya nilai koefisien permeabilitas dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekentalan cairan, distribusi ukuran

pori, distribusi ukuran butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah dan derajat kejenuhan tanah. Konsolidasi tanah lunak akan terjadi apabila terjadi disipasi air pori terlebih dahulu sebagai bentuk atau cara tanah menuju pada kondisi keseimbangan dalam menahan beban yang ada.

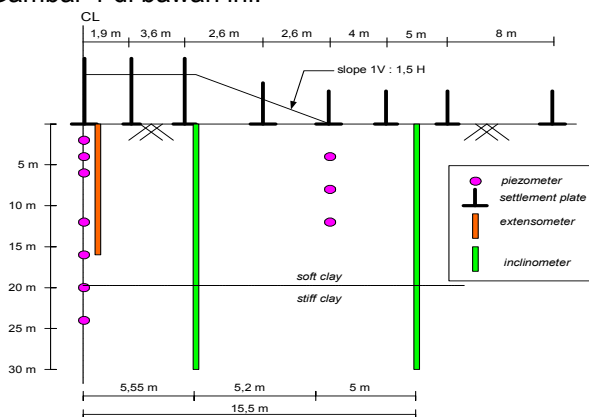
Beban yang didukung oleh tanah *embankment* tidak hanya merupakan beban statik tapi juga beban dinamis sebagai contoh penggunaan *embankment* sebagai pendukung beban lalu lintas jalan raya maupun jalan rel. Penelitian yang dilakukan oleh Miller, Teh, Li dan Zaman (2000) pada subgrade jalan rel di atas tanah lunak (tanah lempung) menunjukkan bahwa akibat beban lalu lintas kereta api (*heavy axle load*) yang berulang, berakibat terjadinya pemadatan dan konsolidasi pada tanah sehingga terbentuk kantong – kantong *balast* yang bersifat menangkap air. Hal ini mengakibatkan terjadinya keruntuhan geser (*shear failure*) yang ditandai dengan adanya deformasi plastis berlebih pada arah vertikal dari tanah lempung.

Penelitian mengenai pengaruh aplikasi beban *embankment* di atas tanah lunak menarik minat peneliti karena beban *embankment* yang bekerja akan

menimbulkan perubahan tekanan air pori pada tanah lunak di bawah *embankment*. Hal ini akan menimbulkan konsolidasi dan dalam waktu yang tidak lama akan berpengaruh pada kestabilan konstruksi. Hal ini membuat peneliti ingin meneliti lebih lanjut dalam simulasi numeris.

METODE PENELITIAN

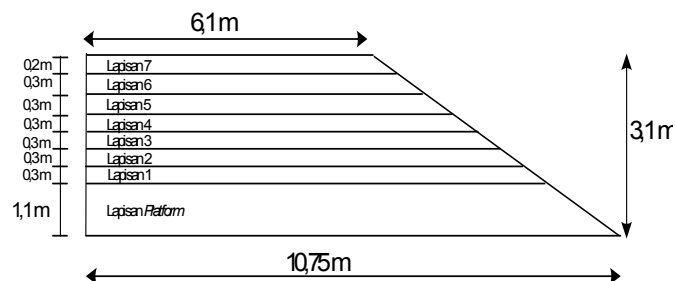
Penelitian dilakukan dengan melakukan simulasi numeris menggunakan software geoteknik Plaxis versi 7.2. Software ini dapat digunakan untuk menganalisis defromasi serta karakter tanah dan batuan dalam model Plain Strain dan Axissymetry. (Brinkgreve, 1998). Data yang digunakan dalam simulasi merupakan interpretasi data sekunder hasil pengukuran tekanan air pori di bawah konstruksi trial embankment di lapangan. Posisi alat ukur tekanan air pori (piezometer) dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Posisi Alat Ukur di Lapangan (Balai Geoteknik Jalan, 2002).

Model konstruksi *trial embankment* yang digunakan dalam simulasi terdiri atas beberapa lapis seperti Gambar 2 di .

Konstruksi *trial embankment* di salah satu sisi Jalan Raya Kendal – Kaliwungu, Semarang dibangun secara bertahap sejak tanggal 23 Februari 2001 sampai dengan 29 Mei 2001. Durasi konstruksi dan konsolidasi selama pembangunan dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.



Gambar 2 Model Trial Embankment dalam Simulasi Numeris.

TABEL 1 DURASI KONSTRUKSI DAN KONSOLIDASI SETIAP LAPISAN TRIAL EMBANKMENT SELAMA KONSTRUKSI

Lapisan	Durasi Konstruksi (hari)	Durasi Konsolidasi (hari)
Platform	1	13
1	1	13
2	1	3
3	1	38
4	1	22
5	1	2
6	1	2
7	1	2

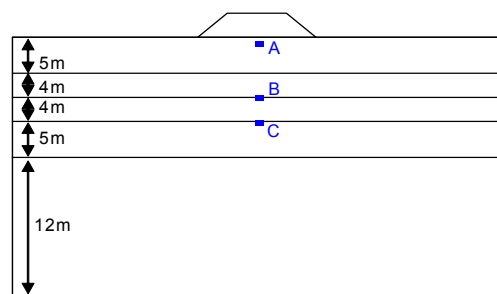
Tipe material yang digunakan dalam simulasi numeris merupakan Mohr-Coulomb Model sedangkan nilai input material tanah dasar dan tanah embankment dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3.

TABEL 2 PARAMETER INPUT TANAH DASAR

Depth (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	k_x (m/hari)	k_y (m/hari)	E (kN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ
0–5	6,82	13,45	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$3,09 \cdot 10^{-4}$	500	0,3	9,9	2,4	0
5–9	7,48	14,64	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$3,09 \cdot 10^{-4}$	500	0,3	10,2	2,5	0
9–13	7,117	13,584	$8,73 \cdot 10^{-5}$	$5,82 \cdot 10^{-5}$	600	0,3	11,5	4	0
13–18	8,814	15,397	$8,73 \cdot 10^{-5}$	$5,82 \cdot 10^{-5}$	600	0,3	8,5	7,6	0
18–30	8,162	14,81	$6,54 \cdot 10^{-6}$	$4,36 \cdot 10^{-6}$	750	0,3	14,2	4,7	0

TABEL 3 PARAMETER INPUT TANAH TIMBUNAN

Tebal Lapisan (m)	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	k_x (m/hari)	k_y (m/hari)	E (kN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ
1,1	17,194	20,372	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0
1,4	12,544	16,01	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0
1,7	15,881	19,629	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0
2,0	13,346	16,955	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0
2,3	13,384	17,717	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0
2,6	13,14	17,357	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0
2,9	14,24	18,707	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0
3,1	13,116	17,289	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	5000	0,3	13	29,5	0



Gambar 3 Posisi titik pembacaan hasil analisis numeris.

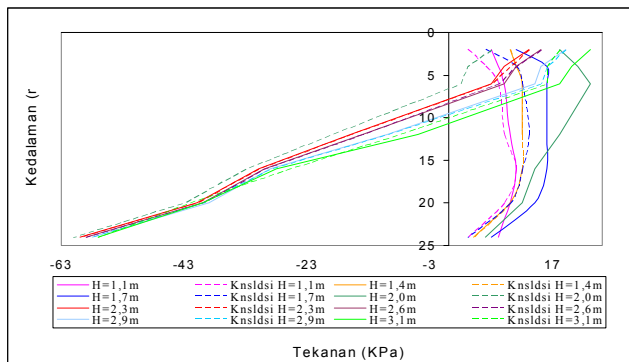
Posisi titik pengamatan perubahan tekanan air pori dalam model simulasi numeris untuk dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan dapat dilihat pada Gambar 3. Pada model simulasi diamati 3 buah titik di

bawah embankment (titik A dengan kedalaman 0,5m, B dengan kedalaman 9 m dan C dengan kedalaman 13 m).

HASIL PENELITIAN

Tanah lempung (*soft clay*) merupakan tanah yang memiliki permeabilitas rendah, penambahan beban yang berupa konstruksi *embankment* di atasnya akan mempengaruhi kondisi tekanan air pori di dalam tanahnya. Beban yang bekerja di atas tanah lempung lunak dalam waktu yang relatif cepat dengan nilai beban yang cukup besar (*rapid construction*) akan mengakibatkan terjadinya kenaikan tekanan air pori (*excess pore water pressure*).

Bila diamati hasil pengukuran lapangan secara detail dalam bentuk grafik (Gambar 3) akan terjadi kenaikan dan penurunan nilai *excess pore water pressure*. Pola kenaikan dan penurunan nilai *excess pore water pressure* akan tampak jelas pada pembangunan *embankment* dengan menggunakan metode *staged construction* dengan interval waktu untuk konsolidasi tidak terlalu lama (Gambar 4).



Gambar 4 Excess pore water pressure tanah dasar embankment hasil pengukuran di lapangan

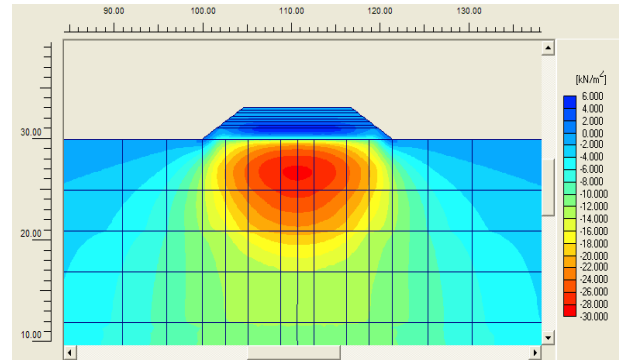
Pada setiap akhir masa konstruksi suatu lapisan *embankment* (durasi konstruksi hanya 1 hari) terjadi kenaikan tekanan air pori. Tinggi rendahnya kenaikan tekanan air pori sangat tergantung pada besar beban yang bekerja. Kenaikan terbesar terjadi pada saat penimbunan awal (tinggi lapisan timbunan = 1,1 m). Penurunan nilai *excess pore water pressure* terjadi pada masa konsolidasi, dengan nilai penurunan bervariasi tergantung pada durasi konsolidasi yang terjadi.

Penurunan nilai *excess pore water pressure* paling besar terjadi pada durasi konsolidasi saat ketinggian *embankment* mencapai 2 m. Durasi konsolidasi pada tahap ini cukup lama (38 hari), hal ini mengakibatkan penurunan nilai *excess pore water pressure* mencapai nilai negatif (< 0) pada tanah dengan kedalaman di atas 9 m.

Variasi nilai *excess pore water pressure* tanah dasar *embankment* menunjukkan bahwa pada kedalaman yang

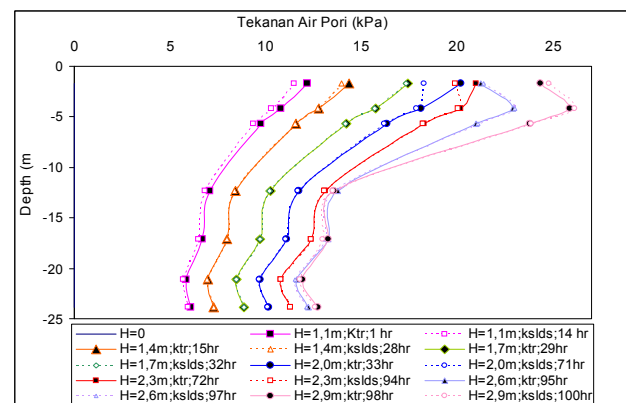
cukup dalam kondisi tanah semakin stabil sedangkan pada kedalaman tanah yang dangkal, masih dibutuhkan waktu untuk konsolidasi agar kondisi stabil tercapai.

Hasil simulasi numeris untuk perubahan tekanan air pori berlebih pada akhir masa konstruksi yang terjadi di dalam tanah akibat beban *embankment* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Area excess pore water pressure pada tanah dasar embankment.

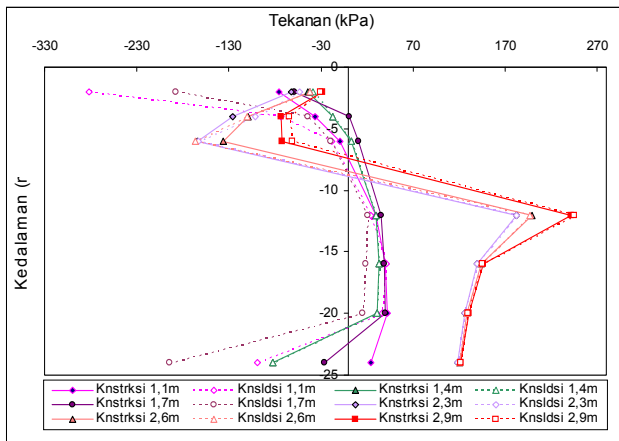
Pada tanah dasar *embankment*, kelebihan tekanan air pori maksimum terjadi pada area persis di bawah *embankment*. Hal ini disebabkan karena pada *embankment*, beban yang bekerja (akibat berat sendiri *embankment*) langsung didistribusikan ke tanah dasar yang merupakan tanah lempung lunak (*soft clay*). Tanah jenis ini memiliki nilai permeabilitas yang sangat kecil, sehingga akibat beban yang bekerja padanya maka terjadi dua tipe deformasi yaitu deformasi segera (*immediate deformation*) yang terjadi pada saat beban *embankment* bekerja dan deformasi konsolidasi (*consolidation deformation*) yang terjadi pada saat *excess pore water pressure* menurun akibat adanya disipasi air pori di dalam tanah dasar. Disipasi air pori akan mengakibatkan terjadinya perapatan jarak antar butiran di dalam tanah dasar sehingga deformasi tanah dasar akan semakin besar.



Gambar 6 Excess pore water pressure tanah dasar embankment hasil simulasi numeris

Analisis secara numeris memberikan hasil yang cukup berbeda terhadap kondisi tekanan air pori berlebih di dalam tanah (Gambar 6).

Perbedaan yang terjadi antara hasil simulasi numeris yang menggunakan *Plaxis Versi 7.2* dan hasil pengukuran lapangan dapat disebabkan karena pada permodelan tanah dasar secara numeris banyak dilakukan penyederhanaan, seperti permeabilitas tanah dasar, kekakuan tanah dasar dan parameter – parameter kekuatan tanah yang bernilai tetap untuk suatu interval kedalaman tertentu (Gambar 7).



Gambar 7 Perbedaan *excess pore water pressure* tanah dasar embankment.

Kondisi lain yang dapat mempengaruhi perbedaan nilai *excess pore water pressure* adalah sangat heterogennya tanah dasar sehingga hasil uji lapangan (sondir, bore hole) pada beberapa titik uji belum tentu memberi hasil yang sama dengan kondisi tanah dasar di bawah embankment. Pada umumnya, pola kurva *excess pore water pressure* hasil analisis numeris menunjukkan pola yang sama yaitu pada akhir tahap konstruksi terjadi kenaikan *excess pore water pressure* dan pada akhir tahap konsolidasi terjadi penurunan *excess pore water pressure*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil simulasi numeris untuk perubahan tekanan air pori yang terjadi di bawah *embankment* yang berada di atas tanah lempung lunak (*soft clay*) dan dibangun dengan metode konstruksi bertahap (*staged construction*) memberikan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

Nilai *excess pore water pressure* yang terjadi pada beberapa tempat di bawah *embankment* hasil simulasi numeris bervariasi. Nilai *excess pore water pressure* pada beberapa tempat adalah sebagai berikut, pada area persis di bawah dasar *embankment* (area A, kedalaman 0,5 m) sebesar -22,8093 kPa, pada area B

(kedalaman 9 m) sebesar -21,5576 kPa dan pada area C (kedalaman 13 m) sebesar -14,159 kPa.

Fluktuasi *excess pore water pressure* selama masa konstruksi disebabkan karena pada setiap awal konstruksi per lapisan *embankment* tanah mengalami pembebanan dan air pori belum sempat terdisipasi sehingga tekanan air pori meningkat (*excess pore water pressure* bertambah). Pada masa konsolidasi terjadi penurunan tekanan air pori bertahap (*excess pore water pressure* berkurang) karena pada tahap ini terjadi disipasi air pori.

Beberapa hal yang dapat disarankan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut antara lain :

Penggunaan model elemen hingga untuk tanah yang lebih detail dengan tingkat diskretisasi material yang lebih tinggi, seperti *soft soil model*, *soft soil creep model* agar hasil yang diperoleh bisa lebih mendekati kondisi asli di lapangan.

Penggunaan alternatif perkuatan lain baik yang lebih sederhana maupun yang lebih kompleks seperti penggunaan *geogrid* dengan variasi jumlah lapisan perkuatan pada dasar *embankment*, penggunaan *vertical drain* untuk mempercepat laju konsolidasi tanah dasar *embankment*.

Pemantauan kestabilan konstruksi jangka panjang dengan melakukan *trial* terhadap durasi konsolidasi tanah dasar yang lebih lama.

Perbandingan dengan *output Plaxis* dengan *output software* tanah lain seperti *Sigma W* atau *Slope W* agar diperoleh tingkat validitas *output* yang lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar – besarnya dan setulusnya kepada Prof. Dr. Ir. Kabul Basah Suryolelono, Dip. HE, DEA dan Prof. Ir. Bambang Suhendro, Msc., Ph.D atas perkenannya memberi banyak masukan dan bimbingan selama penelitian, tidak lupa penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak – pihak lain terkait yang berperan dalam selesainya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Balai Geoteknik Jalan, 2002, *Laporan Faktual Pengujian Laboratorium Jalan Lingkar Kaliwungu*, Semarang, Puslitbang Prasarana Transportasi, Departemen Pekerjaan Umum, Ujungberung, Bandung.
- Brinkgreve, R.B.J and Vermeer, P.A., 1998, *Plaxis Version 7*, A.A.Balkema/ Rotterdam/Brookfield/1998, Netherlands.
- Das, B.M., 1985, *Mekanika Tanah, Prinsip – Prinsip Rekayasa Geoteknis*, Erlangga. Jakarta.
- Miller, G.A., Teh, S.Y., and Zaman, M.M., 2000, *Cyclic Shear Strength of Soft Railroad Subgrade*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p.139-147, Vol 126, No.2, ASCE, February, USA.