

Perilaku Tanah Dasar Fondasi *Embankment* dengan Perkuatan Geogrid dan Drainase Vertikal

Nafisah Al-Huda

Universitas Syiah Kuala, Jl. Syech Abdur Rauf No. 7 Banda Aceh, E-mail: alhuda.nafisah10@gmail.com

Kabul Basah Suryolelono

Universitas Syiah Kuala, Jl. Syech Abdur Rauf No. 7 Banda Aceh, E-mail: kabulbasah@yahoo.com

Abstrak

Tanah lunak sebagai tanah dasar fondasi di bawah konstruksi *embankment* sering menimbulkan permasalahan dalam hal stabilitas dan penurunan. Oleh karena itu, perlu dilakukan perbaikan kondisi tanah lunak sebagai tanah dasar fondasi. Salah satunya menggunakan perkuatan geogrid di bawah *embankment* dan drainase vertikal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan geogrid dan drainase vertikal terhadap perilaku tanah dasar fondasi berupa tanah lunak. Penelitian berdasarkan analisis metode elemen hingga dengan menggunakan program Plaxis versi 8.2. Konstruksi *embankment* dimodelkan dua dimensi pada kondisi plane strain, model material Mohr-Coulomb dan tipe material undrained. Geogrid dimodelkan sebagai geogrid elemen, model bidang pertemuan antara tanah dan geogrid adalah rigid *embankment* dan interface *embankment*. Drainase vertikal dimodelkan sebagai drain dengan kelebihan tekanan air pori ditetapkan nol. Hasil analisis numeris terhadap normal *embankment* menggambarkan bahwa perpindahan maksimum arah vertikal saat ketinggian *embankment* mencapai $H=3,1$ m adalah sebesar 0,827 m (dalam bentuk penurunan) dan arah horisontal 0,203 m, sedangkan tegangan efektif sebesar 29,38 kN/m². Penggunaan perkuatan geogrid dan drainase vertikal pada konstruksi normal *embankment* dengan model interface reinforced *embankment* dapat mempercepat proses konsolidasi hingga 99%, mereduksi perpindahan horisontal hingga 40,5% dan meningkatkan tegangan efektif hingga 35,9%.

Kata-kata Kunci: Tanah lunak, *Embankment*, Geogrid, Drainase vertikal.

Abstract

Soft soil as the sub base under/beneath construction of *embankment* often appears the problem of the stability and the settlement. Therefore, it is necessary to improve the soft soil as the sub base. One of that is using geogrid reinforcement beneath of *embankment* and the vertical drain in soft soil. This research is aimed to investigate the influence of using geogrid and vertical drains to the behaviour of the sub base which is soft soil. This research based on the finite element analysis by using Plaxis v.8.2. The construction of *embankment* was modelled in 2D condition of plane strain, with Mohr-Coulomb material model and undrained material type. Geogrid was modelled as element geogrid, and the contact plane between soil and geogrid was modelled as rigid and interface *embankment*. The vertical drains was modelled as a drain with excess pore water pressure was specified at zero value. The result of numerical analysis at normal *embankment* demonstrated that the maximum vertical displacement, when the height of *embankment* 3,1 m was 0,827 m at vertical direction (manifested as settlement) and the horizontal displacement at this height is 0,203 m, while the effective stress was 29,38 kN/m². The use of the geogrid and vertical drains at the normally *embankment*, which is modeled as interface reinforced *embankment* can accelerate the consolidation process by 99%, to reduce the horizontal displacement by 40,5% and to increase of the effective stress by 35,9%.

Keywords: Soft soil, Normal *embankment*, Geogrid, Vertical drains

1. Pendahuluan

Konstruksi timbunan (*embankment*) yang digunakan untuk konstruksi jalan di atas tanah lunak sering mendapat hambatan dalam pelaksanaan maupun setelah konstruksi jalan tersebut selesai. Hambatan yang muncul berkaitan dengan sifat dari tanah lunak yang memiliki kuat geser rendah, tingkat

kompressibilitas dan kadar air yang tinggi menimbulkan permasalahan dalam hubungan stabilitas dan penurunan. Umumnya tanah lunak mempunyai kemampuan dukung rendah (biasanya dinyatakan dengan nilai CBR) dengan nilai $CBR < 3$, sehingga perlu dilakukan perbaikan tanah agar tanah mampu untuk mendukung beban di atasnya. Salah satu metode perbaikan tanah lunak yang dapat digunakan untuk

memperbaiki kondisi tanah lunak adalah penggunaan geosintetik sebagai perkuatan dasar *embankment* dan drainase vertikal pada tanah dasar. Geosintetik yang digunakan pada dasar *embankment* difungsikan untuk mempertahankan kestabilan *embankment*, sedangkan drainase vertikal digunakan pada tanah dasar fondasi berupa tanah lunak berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi.

Kombinasi perkuatan *embankment* yang menggunakan geosintetik sebagai perkuatan dasar *embankment* dengan drainase vertikal tipe *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) secara efisien meningkatkan stabilitas *embankment* dan mengurangi deformasi, selain itu dapat mengurangi kelebihan tekanan air pori (*excess pore pressure*) selama pelaksanaan konstruksi, mempercepat penurunan *excess pore pressure* setelah konstruksi selesai sehingga mempercepat tanah dasar memperoleh kekuatannya, mengurangi pengaruh *foundation heave* dan deformasi arah geser horizontal selama konstruksi. Kombinasi perkuatan dasar fondasi timbunan dengan geosintetik dan drainase vertikal seperti pada **Gambar 1** (Rowe dan Li., 2005). Lawson (2005) juga menyatakan bahwa penggunaan drainase vertikal dikombinasikan dengan perkuatan dasar *embankment* dapat memberikan penurunan yang terjadi dalam waktu relatif pendek dan pada waktu bersamaan juga mempertahankan stabilitas *embankment*.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait dengan analisis numeris dan permodelan terhadap hasil pengukuran lapangan dan hasil analisis numeris menunjukkan nilai yang berbeda tetapi pola yang terjadi memberikan kecenderungan yang sama. Patria dan Suryolelono (2006) telah melakukan analisis numeris terhadap normal *trial embankment* Kaliwungu Semarang tanpa perkuatan dan menggunakan perkuatan geogrid dan *floating pile*. Hasil analisis numeris terhadap perpindahan vertikal, perpindahan horisontal dan kelebihan tekanan air pori terhadap normal *trial embankment* tanpa perkuatan menghasilkan nilai yang cukup berbeda dari hasil pengukuran lapangan, sedangkan pola yang terjadi antara hasil analisis

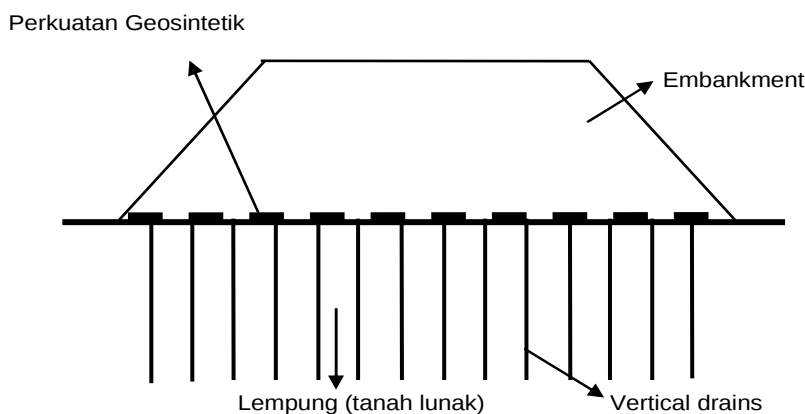
numeris dan pengukuran lapangan menghasilkan pola yang sama. Perbedaan hasil ini disebabkan adanya asumsi pemasangan *inclinometer*, asumsi homogenitas material tanah dasar dan material *embankment*. Hasil penelitian analisis numeris permodelan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) pada tanah lunak dibawah *trial embankment* Semarang yang dilakukan Hutapea, dkk (2003) menunjukkan penurunan yang sama dengan hasil pengukuran lapangan sampai dengan waktu 280 hari, selanjutnya penurunan hasil pengukuran lapangan lebih kecil dari hasil analisis numeris yang kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya kapasitas debit drainase vertikal. Sedangkan hasil pengukuran lapangan terhadap kelebihan tekanan air pori menunjukkan nilai yang lebih kecil dari hasil numeris, hal ini kemungkinan disebabkan oleh titik pengukuran pizometer lebih dekat dengan PVD dibandingkan pada analisis numeris.

Penelitian ini dilakukan pada normal *trial embankment* Kaliwungu Semarang tanpa perkuatan dan dengan perkuatan geogrid di bawah *embankment* dan drainase vertikal pada tanah dasar. Penyesuaian hasil numeris dan hasil pengukuran dilapangan dilakukan diawal sebelum dilakukan simulasi numeris. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perubahan perpindahan vertikal dan horisontal, tekanan air pori dan kekuatan pada tanah dasar di bawah *embankment* sebelum dan sesudah adanya perkuatan *embankment* dan drainase vertikal pada tanah dasar.

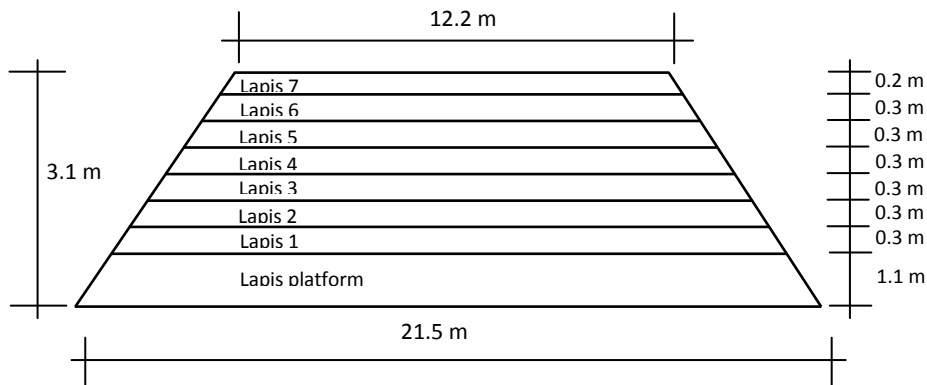
2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi

Penelitian ini mengambil objek *trial embankment* di daerah Kaliwungu, Semarang, Jawa Tengah. Data yang digunakan untuk analisis merupakan data sekunder, terdiri dari data tanah dan data *monitoring* yang diambil dari uji di laboratorium dan di lapangan yang dilaksanakan oleh Balai Geoteknik Jalan, Pusat Litbang Prasarana Transportasi. Kondisi konstruksi *trial embankment* yang digunakan pada penelitian ini adalah normal *trial embankment* (**Gambar 2**).



Gambar 1. Perkuatan dasar geosintetik dan drainase vertikal (Rowe dan Li, 2005)

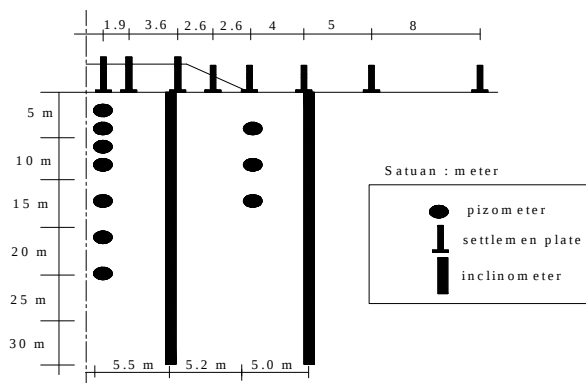


Gambar 2. Dimensi *normal trial embankment* (Balai Geoteknik Jalan, 2002)

Deskripsi tanah dasar dapat dilihat pada Tabel 1, yang diperoleh dari uji *bor* di lapangan. Selain itu, dilakukan *monitoring* dengan menempatkan instrumentasi di setiap area dasar timbunan yang berguna untuk mengukur deformasi tanah dan tekanan air pori yang terjadi. Monitoring instrumentasi yang dipasang di lapangan berupa *inclinometer* untuk mengukur pergerakan lateral (horizontal) tanah dasar; *settlement plate* untuk mengamati besarnya total penurunan vertikal dari tanah dasar dan *pneumatic piezometer* untuk mengukur tegangan air pori tanah dasar. Posisi *monitoring* instrumen geoteknik di lapangan seperti Gambar 3.

Tabel 1. Deskripsi tanah dasar (Balai Geoteknik Jalan, 2002)

Kedalaman (m) dari Muka Tanah	Deskripsi Tanah
0.50 – 0.90	Lempung, warna coklat Abu-Abu, sifat lunak
1.00 – 4.40	Lempung tercampur kulit kerang, warna abu-abu tua, sifat lunak
5.00 – 9.40	Lempung tercampur kulit kerang, warna abu-abu tua, sifat lunak
10.00–14.40	Lempung tercampur kulit kerang, warna abu-abu tua, sifat lunak
15.00 – 19.40	Lempung tercampur kulit kerang, warna abu-abu tua, sifat lunak
20.00 – 20.30	Lempung tercampur kulit kerang, warna abu-abu tua, sifat lunak



Gambar 3. Posisi instrumen geoteknik di lapangan (Balai Geoteknik Jalan, 2002)

2.2 Data masukan (input data)

2.2.1 Profil tanah dasar fondasi dan tanah timbunan

Struktur tanah dasar dan tanah timbunan yang ada di lapangan bersifat simetris, sehingga penggambaran yang dilakukan pada *Plaxis versi 8.2* hanya setengah struktur saja (bagian sebelah kanan). Hal ini diasumsi perilaku deformasi yang terjadi pada bagian sebelah kiri sama dengan bagian sebelah kanan, hanya tanda saja yang berbeda. Kedalaman tanah dasar fondasi dan kondisi batas horizontal diambil sebesar 30 m dan 80,75 m dari pusat *embankment* dengan asumsi perpindahan vertikal dan horizontal akibat pengaruh beban *embankment* masih terjadi, walaupun sangat kecil. Profil tanah dasar fondasi dan tanah timbunan serta posisi penempatan alat ukur dalam *Plaxis v.8.2* diwakili oleh setiap nodal-nodal (Gambar 4). Kondisi batas ditentukan dengan cara coba-coba hingga diperoleh deformasi tanah dasar yang lebih kecil.

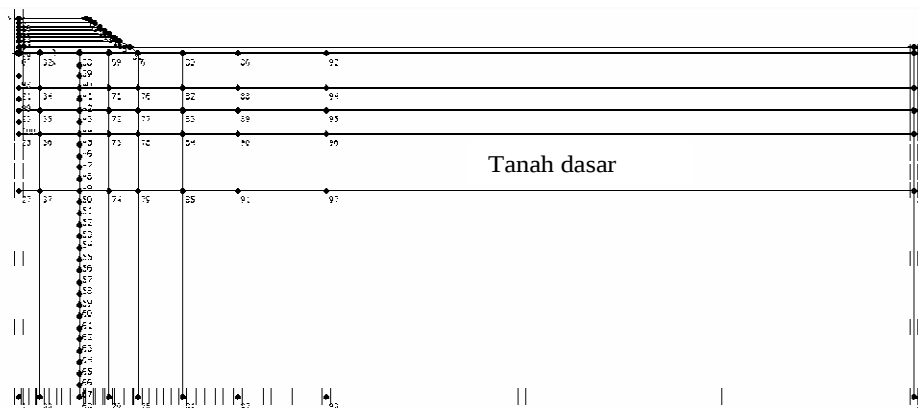
2.2.2 Tanah dasar dan *embankment*

Profil tanah dasar fondasi sebagai *input* dalam *Plaxis* dibagi dalam lima lapisan sesuai dengan ketebalan tanah, seperti pada Gambar 4. Data *input* untuk ke lima lapisan tanah dasar dapat dilihat pada Tabel 2, diambil dari hasil uji laboratorium untuk tanah dasar asli yang dilaksanakan oleh Balai Geoteknik Jalan (2002).

Nilai koefisien permeabilitas (k_x -arah horisontal dan k_y -arah vertikal) tanah dasar mengacu hasil uji di lapangan untuk kedalaman 4 m dan 12 m. Akibat keterbatasan data, maka untuk kedalaman 0 – 12 m nilai koefisien permeabilitas diasumsikan sama dan

Tabel 2. Data *input* untuk tanah dasar

Kedalaman (m)	g_{unsat} (kN/m ³)	g_{sat} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	j (°)
0 – 3	7,030	15,233	9,9	2,4
3 – 5	8,345	15,921	10,2	2,5
5 – 7	6,969	13,970	11,2	4,0
7 – 12	7,854	15,362	8,5	7,6
12 – 30	7,695	15,175	14,2	4,7



Gambar 4. Gambar profil tanah pada pemodelan Plaxis v 8.2

diwakili oleh kedalaman 4 m sebesar $k_x = k_y = 0,02607$ m/hari, sedangkan kedalaman 12 – 30 m diwakili oleh kedalaman 12 m sebesar $k_x = k_y = 0,00087$ m/hari. Modulus elastisitas tanah mengacu pada nilai kisaran tanah lunak yang dicoba-coba untuk mendekati nilai lapangan. Hal ini diasumsikan tanah dasar di daerah Kaliwungu merupakan tanah lunak yang memiliki modulus elastisitas rendah, sehingga diambil nilai modulus elastisitas bervariasi mulai dari 500-1000 kN/m². Kedalaman 0 – 7 m nilai modulus elastisitas tanah (E) = 500 kN/m², kedalaman 7- 12 m nilai $E = 700$ kN/m² dan kedalaman 12 – 30 nilai $E = 1000$ kN/m². Nilai *Poisson's ratio* (ν) yang digunakan untuk semua kedalaman sebesar 0,33. Nilai ini mengacu pada Brinkgreve (2002) yang memberikan nilai kisaran untuk material *undrained*, nilai *poisson's ratio* efektif yang digunakan dalam *Plaxis* adalah $\leq 0,35$ dan Bowles (1984) menyatakan bahwa untuk material yang bersifat elastis, nilai *poisson's ratio* terletak diantara 0 dan 0,5 ($0 < \nu < 0,5$), sehingga dilakukan coba-coba untuk memperoleh nilai yang mendekati lapangan. Nilai sudut dilatasi (ψ) untuk semua kedalaman digunakan 0, nilai ini mengacu pada Brinkgreve (2002) yang memberikan nilai ψ mendekati nol untuk sudut gesek internal yang kurang dari 30°.

Data parameter *input* tanah timbunan untuk setiap lapisnya dapat dilihat pada **Tabel 3**. Data *input* nilai kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), koefisien permeabilitas (k_x dan k_y), modulus elastisitas (E), *Poisson's ratio* (ν) dan sudut dilatasi (ψ) untuk tanah timbunan diasumsikan sama untuk sembarang tebal timbunan yaitu $c = 13$ kN/m², $\phi = 29,5^\circ$, $k_x = k_y = 0,000451$ m/hari, $E = 5000$ kN/m², $\nu = 0,33$ dan $\psi = 0$. Pengambilan nilai $\nu = 0,33$ dan $\psi = 0$ pada tanah timbunan mengambil asumsi yang sama dengan tanah dasar.

2.2.3 Perkuatan (Reinforcement) dan drainase vertikal

Jenis perkuatan yang digunakan pada penelitian ini adalah geogrid, yang diletakan di bawah *embankment*. Data *input* material geogrid seperti pada **Tabel 4**.

Tabel 3. Data input untuk tanah timbunan

Tebal timbunan (m)	g_{unsat} (kN/m ³)	g_{sat} (kN/m ³)
1,1	17,194	20,372
1,4	12,544	16,01
1,7	15,681	19,63
2,0	13,346	16,955
2,3	13,384	17,717
2,6	13,140	17,357
2,9	14,244	18,707
3,1	13,116	17,289

Tabel 4. Data input untuk perkuatan (Geosinindo, 2005)

Kuat tarik (kN/m)	Regangan	EA (kN/m)
200	0,15	1333,333

Pertemuan antara *embankment* dengan geogrid dimodelkan dalam bentuk tanpa *interface* (*rigid*) dan dalam bentuk *interface*. *Interface* diberikan pada bidang pertemuan antara geogrid dan tanah timbunan, dan antara geogrid dan tanah dasar fondasi di bawah perletakan geogrid. Untuk jenis perkuatan geogrid, *interface* dimodelkan dengan memberi nilai faktor reduksi kekuatan (R_{inter}) sebesar 0,75. Nilai $R_{inter} = 0,75$ mengacu pada Suryolelono (2000) yang memberikan nilai koefisien gesek antara tanah dan bahan perkuatan jenis geogrid sebesar $\tan \delta = 0,75 \tan \phi$, dengan ϕ adalah sudut gesek internal tanah. Tipe *drain* yang digunakan pada penelitian ini adalah drain sintesis yang dikenal dengan *prefabricated vertical drain* (PVD). Selimut pasir (*sand blanket*) diletakan pada lapis pertama di bawah timbunan. *Sand blanket* ini berfungsi sebagai drainase horisontal yang mengalirkan air dari drainase vertikal menuju ke samping timbunan. Pemakaian *sand blanket* ini karena tanah timbunan merupakan tanah lempung.

2.3 Prosedur

Analisis numeris dengan program *Plaxis versi 8.2* dan dilakukan dalam dua tahap yaitu:

1. Analisis numeris pada konstruksi timbunan tanpa perkuatan. Konstruksi *embankment* dimodelkan dalam dua dimensi pada kondisi *plain strain*, model material Mohr-Coulomb, dan tipe material dalam kondisi *undrained*. Elemen yang digunakan dalam permodelan adalah 6 node *triangular element* yang memiliki 6 node dan 3 *stress point*. Proses diskritisasi elemen dalam bentuk segitiga yang dilakukan oleh program *plaxis* v.8.2 dapat dilihat pada **Gambar 5**. Hasil dari diskritisasi di perhalus lagi dengan *refine* untuk mendapat hasil perhitungan yang akurat. Kondisi muka air tanah 0,5 m di atas muka tanah dasar. Perhitungan di laksanakan dengan menggunakan timbunan bertahap (*staged construction*). Hasil analisis berupa perilaku deformasi arah vertikal, lateral dan tekanan air pori diusahakan hasilnya sedekat mungkin dengan hasil pengukuran *settlement plate*, *inclinometer* dan *pneumatic pizometer* di lapangan, baik dari segi keakuratannya maupun pola kecenderungan yang terjadi.
2. Simulasi model dengan memberi perkuatan geogrid di bawah *embankment* dan drainase vertikal pada tanah lunak. Tahap ini dilakukan setelah mendapatkan hasil numeris yang mendekati hasil pengukuran lapangan. Penentuan perkuatan geogrid pada model dilakukan dengan menggunakan *element geogrid* yang diletakkan di bawah *embankment* dengan memasukkan propertis geogrid sesuai dengan **Tabel 4**. Pertemuan antara geogrid dan tanah ditentukan dengan model rigid dan *interface*. Untuk permodelan drainase vertikal digunakan *drains* yang diletakkan pada tanah dasar lunak. *Drains* merupakan garis yang tekanan air pori atau kelebihan tekanan air pori ditetapkan nol.

2.4 Persamaan elemen hingga

Persamaan elemen menentukan perilaku deformasi masing-masing elemen. Untuk memperoleh persamaan elemen, digunakan prinsip energi potensial elemen

minimum. Persamaan energi potensial elemen total adalah (Suhendro, 2001):

$$\pi_e = \iiint_V \frac{1}{2} \{\epsilon\}^T [E] \{\epsilon\} dV - \iiint_V \left\{ \begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix} \right\}^T \{F\} dV - \iint_{S_1} \left\{ \begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix} \right\}^T \{\phi\} ds - \{d\}_e^T \{P_e\} \quad (1)$$

dengan mensubstitusikan **Persamaan 2** ke **Persamaan 1** dan dengan menggunakan prinsip energi potensial

minimum $\frac{\partial \pi_e}{\partial \{d\}_e} = 0$, maka diperoleh **Persamaan 3**.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = [N] \{d\}_e \quad (2)$$

$$\left(\iiint_V [B]^T [E] [B] dV \right) \{d\}_e = \{P_e\} + \iiint_V [N]^T \{F\} dV + \iint_{S_1} [N]^T \{\phi\} ds \quad (3)$$

dengan:

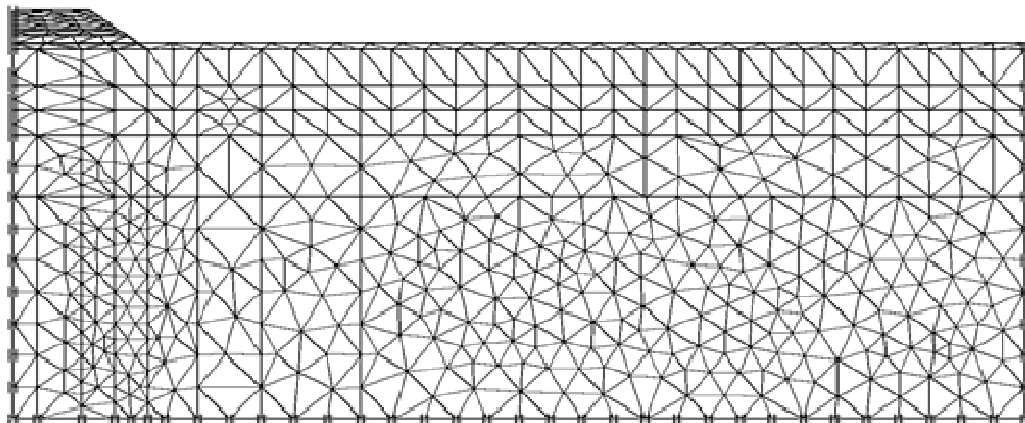
$\{P_e\}$: vektor beban akibat gaya-gaya nodal (*nodal forces*),

$\iiint_V [N]^T \{F\} dV$: vektor beban akibat pengaruh *body forces*,

$\iint_{S_1} [N]^T \{\phi\} ds$: vektor beban akibat *surface traction*.

Apabila pengaruh *body forces* maupun *surface traction* diekivalensikan sebagai beban ekuivalen terpusat pada titik-titik nodal, maka **Persamaan 3** menjadi **Persamaan 4**.

$$\left(\iiint_V [B]^T [E] [B] dV \right) \{d\}_e = \{P\}_e^* \quad (4)$$



Gambar 5. Diskritisasi elemen hingga pada konstruksi normal *embankment*

Dengan menggunakan prinsip-prinsip metoda matrik kekakuan $\{k_\ell^e\} \{d\}_e = \{P\}_e^*$ maka dapat diperoleh

Persamaan 5 yaitu matrik kekakuan elemen struktur.

$$[k_\ell^e] = \iiint_V [B]^T [E] [B] dV \quad (5)$$

6. Hasil dan Pembahasan

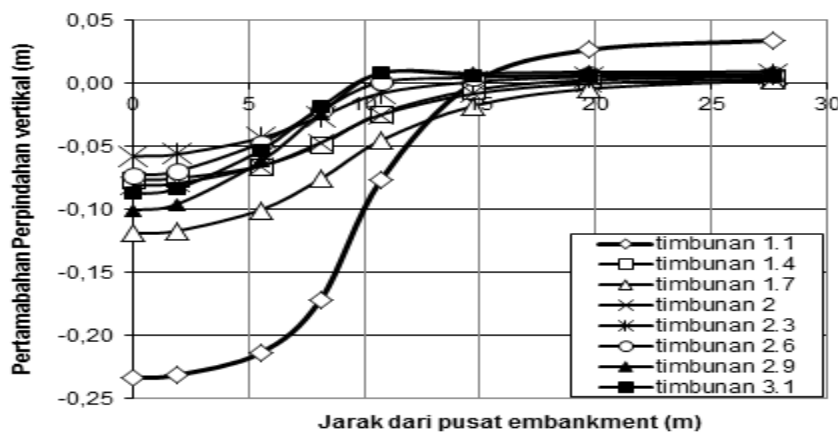
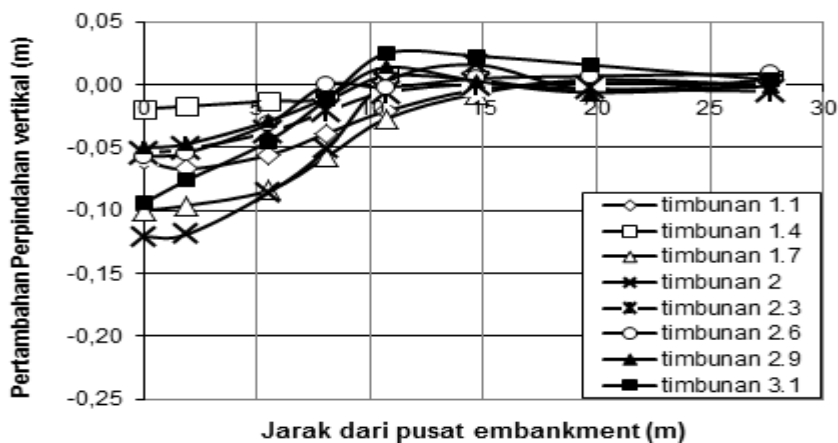
6.1 Analisis konstruksi tanpa perkuatan

6.1.1 Perpindahan vertikal dan horisontal

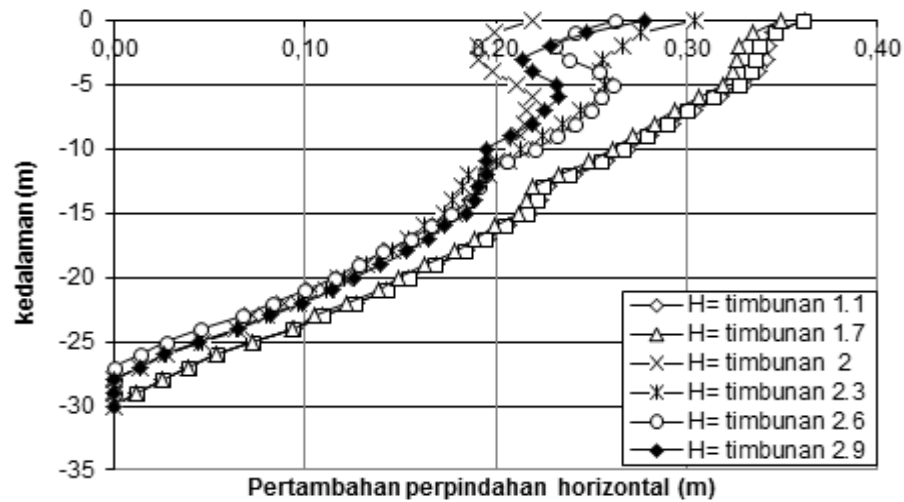
Perilaku tanah dasar lunak dalam menahan beban yang diterapkan di atasnya dapat dilihat dari deformasi yang terjadi, baik perpindahan arah vertikal maupun perpindahan arah horisontal. Beban embankment yang menjadi beban statis bagi tanah dasar menyebabkan tanah dasar mengalami perpindahan vertikal dan horisontal sesuai besar beban yang diberikan. Pola perpindahan tanah dasar arah vertikal hasil pengukuran di lapangan dan hasil analisis numeris menggambarkan pola yang sama (**Gambar 6**), sedangkan pola perpindahan horisontal menggambarkan sedikit kesamaan (**Gambar 7**).

Gambar 6 dan **Gambar 7** memperlihatkan bahwa beban timbunan setinggi 1,1 m memberikan perpindahan vertikal dan horisontal yang lebih besar daripada beban timbunan 0,3 m dan 0,2 m. Selain itu, faktor waktu konsolidasi yang diterapkan pada tanah dasar fondasi juga mempengaruhi besarnya perpindahan vertikal dan horisontal. Air yang keluar dari pori-pori tanah saat proses konsolidasi akan menyebabkan butiran tanah saling merapat dan tanah dasar fondasi mengalami perpindahan vertikal yang besar. Selama proses konsolidasi terjadi peningkatan kekuatan tanah dasar fondasi dalam mendukung beban, sehingga perpindahan horisontal yang terjadi menjadi lebih kecil.

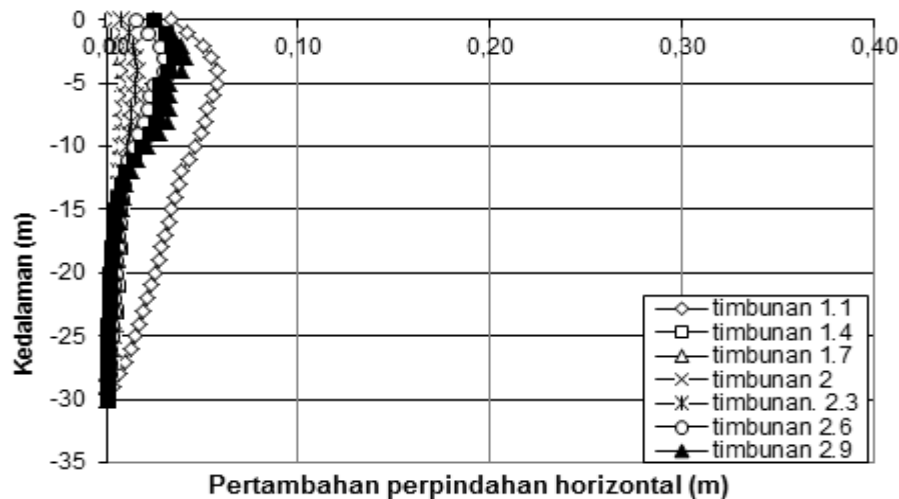
Penambahan setiap lapisan embankment hingga mencapai tinggi embankment yang diinginkan ($H = 3,1$ m) akan mengakibatkan perpindahan vertikal yang terjadi pada tanah dasar semakin bertambah (**Gambar 8**). Perpindahan vertikal pada tanah umumnya disebut penurunan (settlement) tidak membuat tanah kembali ke posisi semula setelah tanah mencapai kekuatannya, tetapi akan terus bertambah seiring dengan ditambahnya beban embankment hingga mencapai tinggi yang diinginkan. Pola perpindahan vertikal terbesar terjadi di daerah tepat di bawah pusat embankment,



Gambar 6. Pertambahan Perpindahan vertikal pada tanah dasar (a,b)



a. Hasil pengukuran di Lapangan

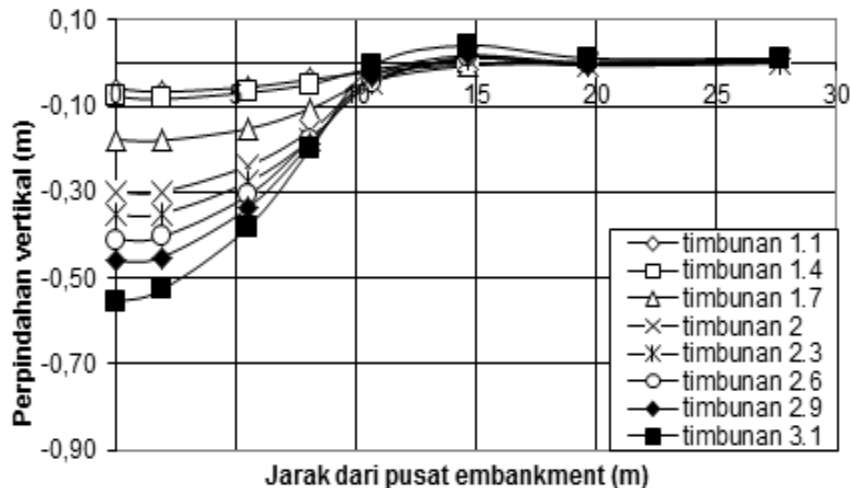


b. Hasil analisis numeris

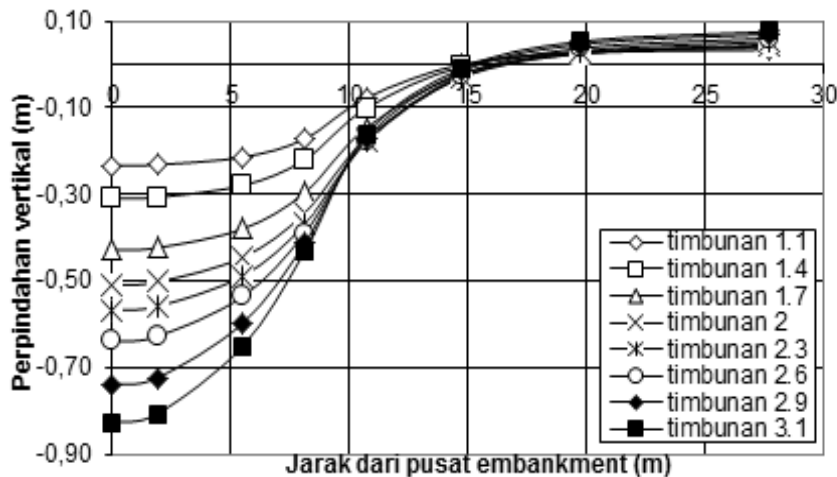
Gambar 7. Pertambahan Perpindahan horizontal pada tanah (a, b)

yang semakin menjauh dari pusat embankment, semakin mengecil hingga tanah dasar fondasi mengalami pengembangan di luar area *embankment*. Hal ini terjadi karena di bagian bawah pusat embankment merupakan daerah terjadinya tekanan yang besar akibat beban embankment yang diterapkan dan ke arah *toe of embankment*, beban yang terjadi semakin kecil, sehingga perpindahan vertikal yang terjadi semakin kecil. Beban embankment yang diterapkan berakibat tanah dasar fondasi mengalami tekanan, penekanan ini menyebabkan tanah di sekitarnya bergerak ke arah luar permukaan tanah dasar. Pergerakan ini ditahan oleh tanah dasar yang berada dekat permukaan, apabila kemampuan tanah tersebut terlampaui, maka gerakan tanah terdorong ke atas yang mengakibatkan pengembangan tanah di luar area embankment.

Perbedaan pertambahan perpindahan horizontal antara hasil perhitungan numeris dengan pengukuran lapangan umumnya masih menampakkan selisih yang besar untuk setiap penambahan lapisan embankment, hal ini terlihat pada **Gambar 7**, perpindahan horizontal hasil perhitungan numeris memberikan nilai yang lebih kecil daripada hasil pengukuran di lapangan (underpredicted). Perbedaan hasil juga terlihat pada **Gambar 6** dan **Gambar 8**, perbedaan pertambahan perpindahan vertikal hasil hitungan numeris pada pusat di bawah *embankment* umumnya memberikan hasil yang lebih besar dari pada hasil pengukuran di lapangan (overpredicted). Perbedaan hasil yang terjadi antara hitungan numeris dengan menggunakan program Plaxis dan pengukuran di lapangan diasumsikan dapat terjadi karena dalam program plaxis model dan parameternya dianggap homogen untuk jarak kedalaman tertentu, sedangkan kenyataannya parameter kekakuan, permeabilitas dan kuat geser bervariasi untuk setiap kedalaman.



a. Hasil pengukuran di Lapangan



b. Hasil analisis Numeris

Gambar 8. Perpindahan Vertikal pada tanah dasar

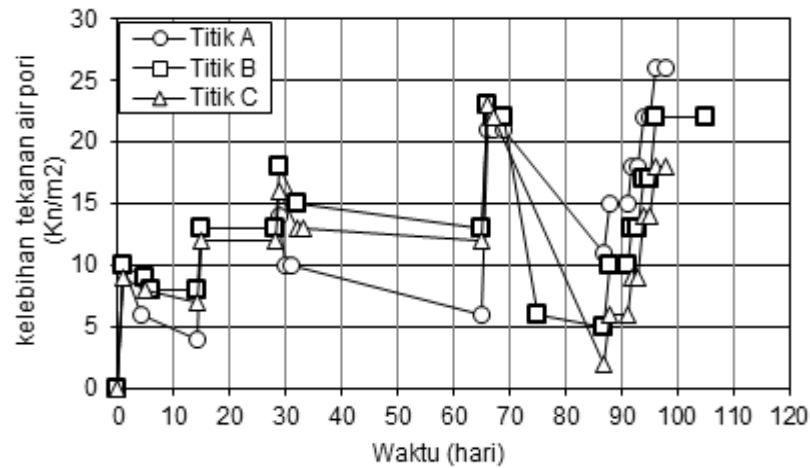
6.1.2 Kelebihan tekanan air pori

Pembebanan pada tanah jenuh air yang memiliki permeabilitas rendah akan mengakibatkan tekanan air pori yang ada di dalam tanah bertambah. Kenaikan tekanan air pori ini disebut dengan kelebihan tekanan air pori. Pengukuran kelebihan tekanan air pori dilakukan pada titik-titik di bawah pusat embankment dengan kedalaman 2, 4 dan 6 m. **Gambar 9** memperlihatkan perkembangan kelebihan tekanan air akibat tahap pembebanan tiap lapis embankment dan waktu konsolidasi yang diberikan. Pola kelebihan tekanan air pori terhadap waktu hasil pengukuran di lapangan dan hasil analisis numeris membentuk pola yang sama. Kelebihan tekanan air pori terbentuk segera setelah beban *embankment* diterapkan, yang besarnya sama dengan besarnya beban *embankment* yang diterapkan. Waktu konsolidasi yang diberikan menyebabkan kelebihan tekanan air pori berangsur-angsur berkurang, tetapi proses konsolidasi yang terjadi tidak berlangsung lama. Hal ini terlihat

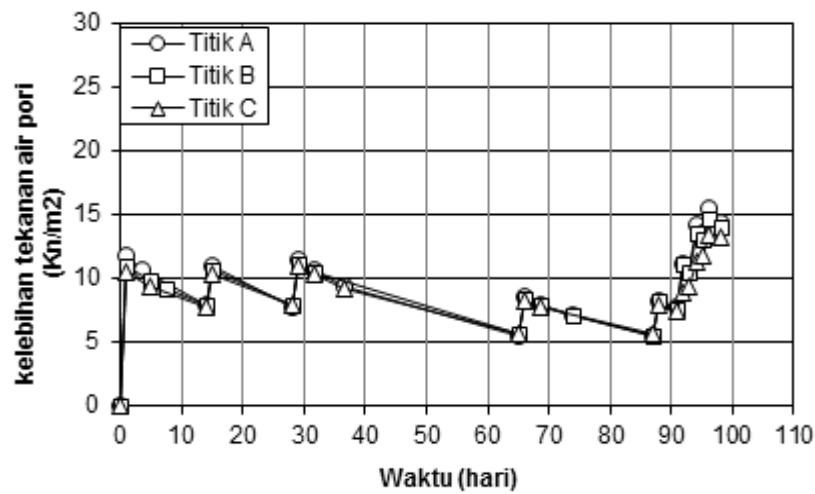
pada besarnya kelebihan tekanan air pori yang tidak mendekati nol di setiap akhir konsolidasi dan penimbunan yang terus dilakukan menyebabkan kelebihan tekanan air pori terus bertambah.

Besarnya kelebihan tekanan air pori yang diperoleh dari hasil hitungan numeris adalah nilai yang lebih besar untuk timbunan pertama (*overpredicted*) dan hasil yang umumnya lebih kecil untuk timbunan yang berikutnya (*underpredicted*) dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan.

Perbedaan ini diasumsikan dapat terjadi karena nilai permeabilitas di lapangan lebih bervariasi untuk setiap kedalaman, dan dalam model dianggap sama untuk jarak kedalaman tertentu. Selain itu, anggapan kondisi batas konsolidasi yang diberikan pada model untuk membatasi air yang keluar diasumsikan dapat mempengaruhi juga besarnya perubahan kenaikan tekanan air pori dalam tanah.



a. Hasil pengukuran di Lapangan



b. Hasil analisis Numeris

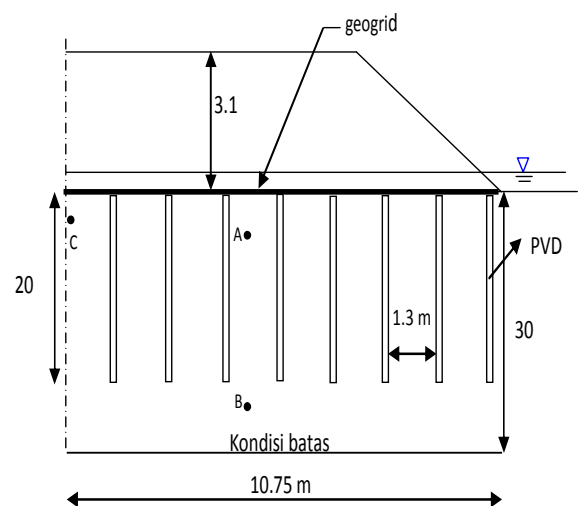
Gambar 9. Kelebihan tekanan air pori di bawah pusat *embankment* (a, b)

3. Analisis Perilaku Tanah Dasar pada *Reinforced Embankment* dan Drainase Vertikal

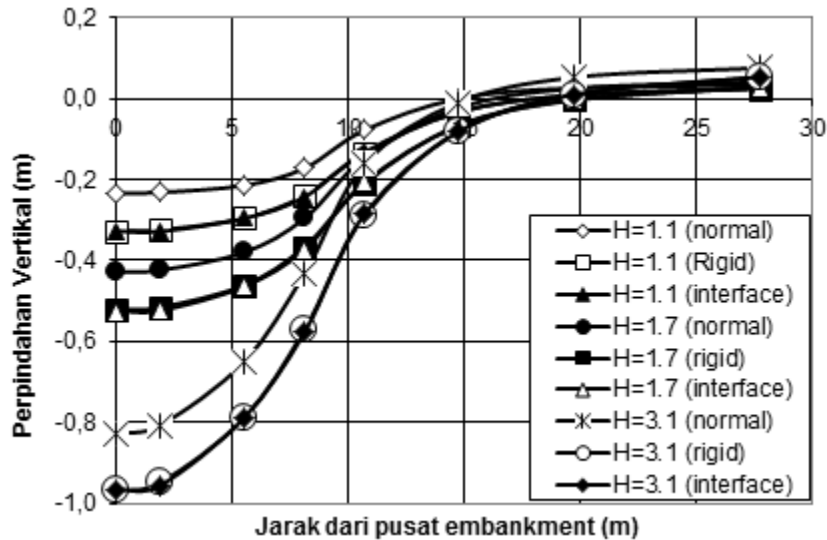
Permodelan perkuatan *embankment* dan drainase vertikal di dalam *plaxis* dapat dilihat pada Gambar 10.

3.1 Perubahan Perpindahan vertikal dan horizontal pada tanah dasar

Pengaruh penggunaan geogrid sebagai perkuatan dasar *embankment* dan drainase vertikal dapat dilihat dari perubahan perpindahan vertikal (Gambar 11) dan perpindahan horizontal (Gambar 12). Perpindahan vertikal dan horizontal yang diamati adalah pada *embankment* tanpa perkuatan (normal), *embankment* dengan perkuatan tanpa *interface* (*Rigid*), dan *embankment* dengan perkuatan dan *interface*.

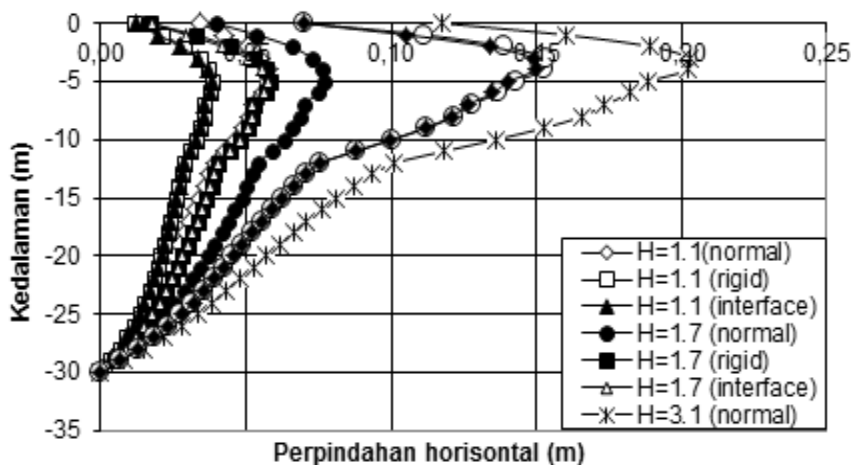


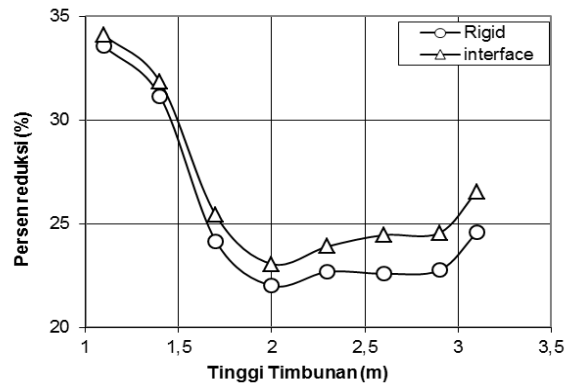
Gambar 10. Model *reinforced embankment* dan drainase vertikal pada *Plaxis* versi 8.2

Gambar 11. Perpindahan vertikal pada *reinforced embankment*

Perpindahan vertikal (**Gambar 11**) yang terjadi pada tanah dasar meningkat dengan adanya drainase vertikal. Terjadi kenaikan perpindahan vertikal pada *rigid reinforced embankment* sebesar 40,124 % dan 40,202 % untuk *interface reinforced embankment*. Peningkatan ini terjadi karena adanya drainase vertikal yang mempercepat proses konsolidasi yang berlangsung untuk jangka waktu yang ditentukan. Drainase vertikal yang ditanam pada tanah dasar mempercepat air yang ada dalam pori-pori tanah mengalir secara horizontal dan vertikal. Keluarnya air dari pori-pori tanah menyebabkan butiran tanah ikut bergerak merapat dan kemampuan tanah dalam menahan beban menjadi lebih baik, sehingga perpindahan vertikal yang terjadi menjadi lebih besar dan pengembangan yang terjadi di atas permukaan tanah dasar berkurang. Perilaku yang sama pada tanah dasar juga terjadi pada perpindahan horizontal. **Gambar 12** menggambarkan bahwa terjadi pengurangan perpindahan horizontal akibat pengaruh

penggunaan geogrid dan drainase vertikal. Reduksi yang terjadi sebesar 33,56% untuk *rigid reinforced embankment* dan 34,10% untuk *interface reinforced embankment*. Pengurangan ini terjadi karena berat beban *embankment* dan gaya tanah lateral pada awalnya ditahan oleh geogrid, kemudian didistribusikan ke tanah dasar, sehingga tekanan yang bekerja pada tanah dasar berkurang dan pengaruh penggunaan drainase vertikal mempercepat tanah mendapatkan kekuatannya dalam melawan tekanan yang bekerja. Selain itu, pengaruh adanya *interface* pada bidang kontak antara tanah dan geogrid mereduksi perpindahan horizontal hingga 34 % di awal penerapan beban *embankment* (**Gambar 13**). Pengaruh ini akan berkurang, apabila waktu konsolidasi yang diberikan dengan penggunaan drainase vertikal cukup untuk membuat tanah mendapatkan kekuatannya dalam mendukung beban dan akan bertambah apabila waktu konsolidasi yang diberikan tidak cukup.

Gambar 12. Perpindahan horizontal pada *reinforced embankment*



Gambar 13. Persentase reduksi perpindahan horizontal tanah dasar

Jadi pengaruh drainase vertikal adalah mempercepat proses konsolidasi bekerja lebih dominan pada arah vertikal, sedangkan pengaruh pemasangan geogrid sebagai perkuatan *embankment* bekerja lebih dominan pada arah horizontal.

3.2 Perubahan kelebihan tekanan air pori

Pengaruh drainase vertikal terhadap perubahan kelebihan tekanan air pori dapat dilihat pada **Gambar 14**. Ditinjau titik A yang terletak di daerah pengaruh drainase vertikal dan titik B di luar daerah pengaruh drainase vertikal (**Gambar 10**). Kelebihan tekanan air pori yang terjadi di daerah pengaruh drainase vertikal (Titik A) mengalami pengurangan yang lebih besar di akhir proses konsolidasi dari 69,61 % hingga 98,71 % pada *rigid reinforced embankment* dan 69,14% hingga 99,96 % pada *interface reinforced embankment* dari waktu konsolidasi yang diberikan. Hal ini terjadi karena air pori terdisipasi dengan cepat akibat pemasangan drainase vertikal. Untuk titik B, pada awal timbunan belum terjadi pengurangan kelebihan tekanan air pori, karena titik B berada pada 25 m dari permukaan tanah dasar. Pengurangan kelebihan tekanan air pori mulai terlihat pada penambahan beban timbunan berikutnya atau pada hari ke-28, air pori mulai terdisipasi dari 0,32% hingga 10,14 % untuk *rigid reinforced embankment* dan 0,29% hingga 10,32 % untuk *interface reinforced embankment* dari waktu konsolidasi yang diberikan. Pengurangan ini terjadi karena adanya pengaruh drainase vertikal, walaupun titik B tidak terletak pada daerah pengaruh drainase vertikal, tetapi sedikitnya pengaruh drainase vertikal dapat mengurangi air pori pada kedalaman tersebut, meskipun dalam jangka lama.

3.3 Analisis kekuatan tanah dasar fondasi

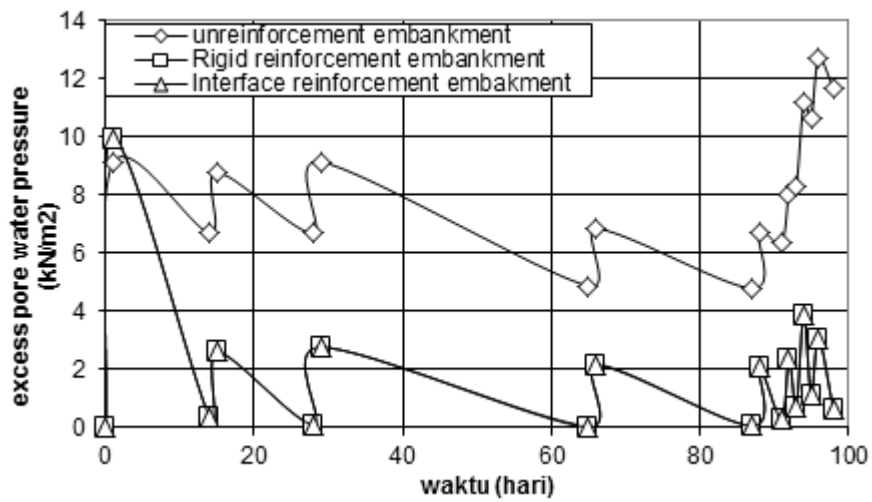
Gambar 15 memperlihatkan perkembangan tegangan efektif tanah dasar pada konstruksi *normal embankment* (*unreinforced embankment*) dan *reinforced embankment*. Ditinjau titik C pada kedalaman 3.17 m seperti terlihat pada **Gambar 10**. Tegangan efektif tanah pada *normal embankment*

mengalami peningkatan setelah proses konsolidasi. Hal ini terjadi, karena proses konsolidasi yang berlangsung menyebabkan air keluar dari pori-pori tanah, sehingga kelebihan tekanan air pori akibat beban *embankment* berkurang dan tegangan efektif tanah meningkat. Pola yang sama juga terjadi pada *reinforced embankment*, akan tetapi terjadi peningkatan tegangan efektif pada *reinforced embankment* lebih besar dari pada *normal embankment* (**Gambar 15**). Peningkatan ini terjadi karena pengaruh pemasangan drainase vertikal yang mempercepat proses konsolidasi, sehingga kelebihan tekanan air pori berkurang dengan cepat dan tegangan efektif dapat bertambah dengan cepat pula.

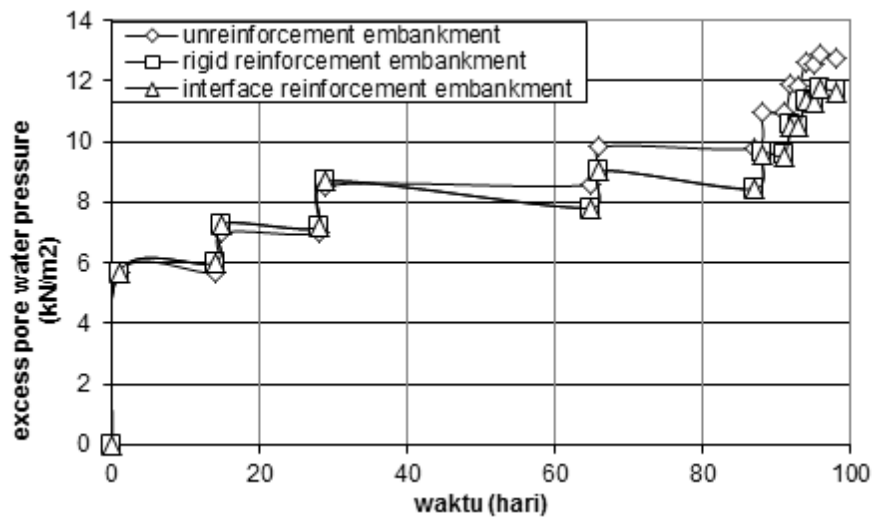
4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Besarnya beban *embankment* dan lamanya waktu konsolidasi yang ditentukan pada *normal embankment* akan mempengaruhi besarnya deformasi tanah lunak, baik perpindahan arah vertikal maupun perpindahan arah horisontal.
2. Kelebihan tekanan air pori yang terjadi pada *normal embankment* akan meningkat segera setelah pembebanan dan berkurang setelah mengalami masa konsolidasi. Besarnya peningkatan tekanan air pori sama dengan besarnya pertambahan tegangan yang diterapkan dan besarnya pengurangan kelebihan tekanan air pori tergantung lamanya masa konsolidasi.
3. Penggunaan parameter yang homogen untuk jarak kedalaman tertentu pada model diasumsikan dapat menghasilkan adanya perbedaan hasil antara hitungan numeris dan pengukuran di lapangan.
4. Hasil simulasi numeris perkuatan *embankment* dengan geogrid yang digunakan untuk mempertahankan kestabilan *embankment* dan pemasangan drainase vertikal pada tanah lunak untuk mempercepat proses konsolidasi dapat mengurangi perpindahan horisontal dan meningkatkan perpindahan vertikal pada tanah lunak.
5. Pengaruh pemasangan drainase vertikal pada tanah dasar dapat mempercepat penurunan kelebihan tekanan air pori baik dalam area maupun di luar area pemasangan drainase vertikal.
6. Tegangan efektif pada *normal embankment* hasil analisis numeris menggambarkan bahwa tegangan efektif akan bertambah setelah air pori terdisipasi akibat proses konsolidasi. Tegangan efektif tanah dasar umumnya mengalami peningkatan yang cepat pada *rigid reinforcement* dan *interface embankment* akibat pengaruh proses percepatan konsolidasi oleh drainase vertikal.

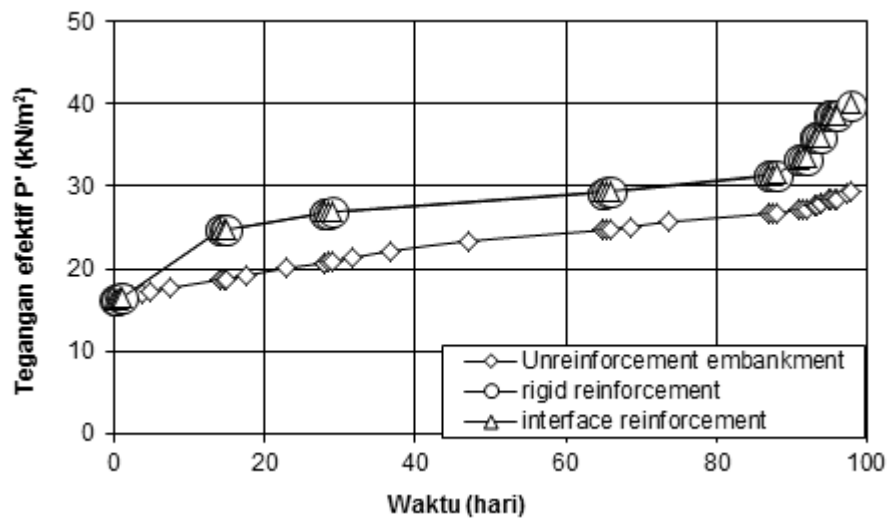


a. Titik A



b. Titik B

Gambar 14. Kelebihan Tekanan air pori pada titik A dan B



Gambar 15. Tegangan efektif tanah pada kedalaman 3,17 m (titik C)

Daftar Pustaka

- Balai Geoteknik Jalan, 2002, Laporan Faktual Pengujian Laboratorium Jalan Lingkar Kaliwungu, Semarang, Bandung: Puslitbang Prasarana Transportasi, Departemen Pekerjaan Umum, Ujungerung.
- Bowles, J.E., 1984, *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, Second edition, USA: McGraw Hill.
- Brinkgreve, R.B.J., 2002, Plaxis Version 8, A.A Balkema Publishers Lisse/ Abingdon/ Exton (PA)/ Tokyo.
- Geosinindo, 2005, *Product Catalog-Description of Miragrid GX Geogrids*, TenCate Geosynthetics Asia Sdn. Bhd., Malaysia: Selangor Darul Ehsan.
- Hutapea, M.B., Rahadian, H., Karyasupatra, S.Y., dan Widodo, T., 2003, Permodelan Prefabricated Vertical Drain Semarang Trial Embankment, Jakarta: *Prosiding Konferensi Geoteknik Indonesia-VI dan Pertemuan Ilmiah Tahunan-VII, 11-13 Agustus 2003*.
- Lawson, C., 2005, *Construction Over Soft Foundation Using Geosynthetic*, Jakarta: Seminar Sehari Application of Geosynthetics With Reference to Indonesian Soil Condition, 14 Februari 2005.
- Patria, A.N., dan Suryolelono, K.B., 2006, Analisis Deformasi Dua Dimensi pada Geogrid Akibat Beban Lalu Lintas Kendaraan., Yogyakarta: *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala*, ISBN : 979-95022-8-4, 11 Juli 2006.
- Rowe, R.K & Li, A.L., 2005, *Geosynthetic-Reinforced Embankment over Soft Foundation*, Geosynthetic International, No.1, 50 – 85.
- Suhendro, B., 2001, Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya, Yogyakarta: Beta offset.
- Suryolelono, K.B., 2000, Geosintetik Geoteknik, Edisi I, Cetakan 1, Nafiri, Yogyakarta.

