

KINERJA DINDING TANAH MERAH YANG DIPERKUAT GEOGRID BERDASARKAN MODEL NUMERIK (THE PERFORMANCE OF GEOGRID REINFORCED RED CLAY WALL BASED ON NUMERICAL MODEL)

Dian Asri Moelyani

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution 264 Bandung
E-mail: dian.asri@pusjatan.pu.go.id
Diterima: 03 Juli 2012; Disetujui: 06 Agustus 2012

ABSTRAK

Pedoman perencanaan dinding tanah yang diperkuat geogrid saat ini mensyaratkan penggunaan bahan berbutir untuk bahan timbunan. Sebagai akibatnya, keuntungan ekonomis dari teknologi ini menjadi sangat tergantung pada ketersediaan bahan berbutir di sekitar lokasi konstruksi. Di sisi lain, di Indonesia, tanah merah yang berasal dari produk vulkanik (tanah residual) sangat berlimpah dan telah banyak digunakan sebagai bahan timbunan karena mempunyai sifat teknis yang baik. Makalah ini membahas perilaku dinding tanah merah yang diperkuat geogrid melalui model numerik dari Royal Military College (RMC) Test Wall 1, Kanada. Verifikasi model dilakukan dengan membandingkan deformasi muka (facing), reaksi toe, tekanan vertikal pondasi, dan regangan perkuatan dari hasil model terhadap data dinding percobaan. Model dinding dengan menggunakan propertis tanah merah kemudian disimulasikan untuk mengetahui kinerjanya. Interaksi tanah-geogrid dimodelkan dengan memberikan faktor reduksi kuat geser pada elemen antarmuka antara kedua material tersebut. Dari hasil kajian dapat disimpulkan respon sistem dinding tanah merah lebih kompleks dibandingkan dinding dari bahan berbutir, oleh karena itu desain kuat tarik perkuatan harus mempertimbangkan deformasi muka dan timbunan akibat terdisipasinya tekanan air pori eksese dalam jangka panjang, efek downdrag dan kekakuan toe.

Kata kunci: dinding tanah, perkuatan geogrid, interaksi tanah-geogrid, model numerik, tanah merah

ABSTRACT

Recently, design guideline of mechanically stabilized earth wall requires granular material for reinforced fill. Hence, the economical benefit of this technology depends on the availability of granular fill near the construction site. On the other hand, in Indonesia, tropical red clay originating from volcanic product (residual soil) is an abundant source of fill material and has been widely used because of its good engineering properties. This paper discusses the behavior of reinforced wall using red clay through numerical modeling of a test wall from Royal Military College of Canada. The model was first verified by comparing face deformation, toe reaction, vertical foundation pressure, and reinforcement strain of the model with test wall data. Then, a reinforced wall with red clay properties was then simulated to evaluate their performance. Interaction between soil and geogrid was also modeled by applying shear strength reduction factor on the interface element between those two materials. From this study, it was identified that the red clay wall behavior is more complex than granular wall. Hence, reinforcement strength design should consider the long term facing deformation due to excess pore water pressure dissipation, down drag effect and toe stiffness.

Keywords: earth wall, geogrid reinforcement, soil-geogrid interaction, numerical modeling, red clay

PENDAHULUAN

Beberapa pedoman perencanaan dinding tanah yang diperkuat geogrid misalnya AASHTO (2010), Indonesia (2009), dan FHWA (2001) mensyaratkan penggunaan bahan berbutir dengan kandungan butir halus lolos saringan No. 200 kurang dari 15%. Akan tetapi, ketersediaan bahan berbutir yang memenuhi syarat sering tidak tersedia di lokasi pekerjaan. Selain itu, harga kerikil dan pasir yang lebih mahal dibandingkan tanah butir halus dapat menghambat penggunaan teknologi ini. Di sisi lain, material tanah merah yang saat ini banyak digunakan sebagai timbunan jalan telah menunjukkan kinerja yang cukup baik.

Di Indonesia, tanah merah dengan kandungan butir halus yang tinggi mulai digunakan sebagai pengganti bahan berbutir. Wesley (2010) mencatat dinding tanah di Bintaro Viaduct Jakarta setinggi 7,8 m dan di Jalan Lingkar Luar Ceger – Hankam Raya Jakarta setinggi 7,3m memberikan kinerja yang baik. Akan tetapi, teridentifikasi pula satu kasus keruntuhan dinding tanah merah di abutmen jembatan tol Veteran Jakarta setinggi 7m (Dobie 2010). Hal ini merupakan indikasi perlunya pemahaman perilaku tanah butir halus dalam sistem dinding tanah dengan perkuatan geogrid.

Makalah ini bertujuan membahas hasil kajian kinerja dinding dari tanah merah yang diperkuat geogrid melalui model numerik. Dari kajian ini, teridentifikasi aspek-aspek penting

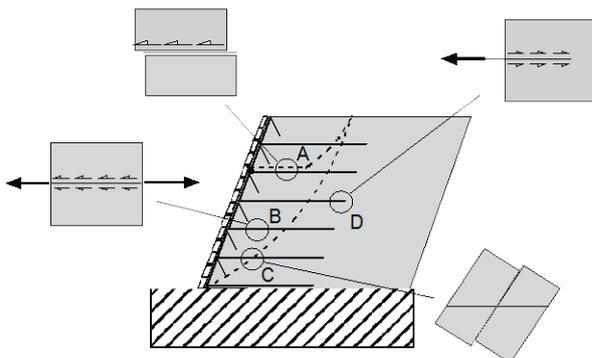
untuk mendesain dinding yang diperkuat geogrid dengan bahan tanah merah.

KAJIAN PUSTAKA

Interaksi tanah-geosintetik

Pengujian interaksi tanah dan geosintetik dikembangkan untuk mensimulasikan mekanisme keruntuhan seperti terlihat pada Gambar 1 (Palmeira 2009). Pada daerah A, terjadi gelincir massa tanah pada permukaan perkuatan sehingga pengujian yang sesuai adalah uji geser langsung. Pada daerah B, tanah dan pekuatan dapat berdeformasi dalam arah lateral, sehingga dapat dilakukan uji regangan bidang yang mirip dengan uji tarik dalam tanah (*in-soil tensile test*). Untuk daerah C uji geser langsung dengan perkuatan miring dapat digunakan. Pada daerah D, perkuatan mengalami cabut sehingga uji cabut adalah yang paling sesuai.

Pengujian interaksi tanah butir halus dan geogrid dengan uji geser langsung telah dilakukan oleh beberapa peneliti misalnya Abu-Farsakh *et al* (2007), Liu *et al* (2009), dan Moelyani (2012). Dari ketiga penelitian tersebut, disimpulkan bahwa tanah butir halus mempunyai lekatan yang kuat dengan geogrid karena mempunyai efisiensi antarmuka (C_i) lebih dari 0,5 menurut Talisoz dalam Coronel (2006). Nilai C_i dipengaruhi oleh kadar air dan derajat pemadatan tanah. Untuk geogrid, nilai C_i dipengaruhi juga oleh kuat tarik *bar* melintang dan persentase luas bukaan geogrid. C_i adalah:



Gambar 1. Mekanisme interaksi dalam dinding tanah yang diperkuat geosintetik (Palmeira 2009)

$$C_i = \frac{c_i + \sigma_n \tan \varphi_i}{c + \sigma_n \tan \varphi} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- φ = sudut geser tanah (derajat);
- c = kohesi tanah (kN/m²);
- c_i = kohesi antarmuka (kN/m²);
- φ_i = sudut geser antarmuka (derajat).
- σ_n = tegangan normal (kN/m²).

Model numerik

Untuk memahami perilaku sistem dinding tanah yang diperkuat geogrid, beberapa model numerik telah dikembangkan berdasarkan hasil uji coba skala penuh. Akan tetapi, Huang *et al* (2009) menyebutkan bahwa uji coba skala penuh dinding tanah dengan data instrumentasi yang lengkap dan berkualitas masih terbatas. Salah satu uji coba dinding dengan data kinerja lengkap adalah *RMC Test Walls* di Canada. *RMC Test Walls* terdiri dari 11 tipe yang dibangun beberapa tahap sejak tahun 2000.

Berhubung semua tipe *RMC Test Walls* dibangun dari material pasir, Prakoso (2012), Guler *et al* (2007), dan Hatami & Bathurst (2005a) melakukan simulasi numerik dari *RMC Test Wall 1* dengan menggunakan parameter tanah butir halus (Tabel 1). Dari ketiga penelitian tersebut disimpulkan bahwa perilaku deformasi sangat dipengaruhi parameter kuat geser dan kekakuan tanah serta kekakuan antarmuka tanah–geogrid. Tetapi, ketiga penulis tersebut belum menggunakan parameter interaksi tanah-geogrid dari hasil pengujian dan hanya mensimulasikan perilaku dinding sampai akhir konstruksi (jangka pendek).

HIPOTESIS

Sistem dinding dari tanah merah yang diperkuat dengan geogrid dalam jangka panjang akan lebih kompleks dibandingkan dinding tanah dari bahan berbutir yang diperkuat dengan geogrid.

METODOLOGI

Langkah-langkah yang dilakukan dalam kajian ini adalah:

1. Model numerik *RMC Test Wall 1* dengan parameter pasir.
2. Model numerik tersebut kemudian diverifikasi terhadap data kinerja *RMC Test Wall 1* (reaksi *toe*, regangan perkuatan, deformasi muka, tekanan vertikal pondasi).
3. Pengujian laboratorium tanah merah, yang mencakup pengujian indeks dan kuat geser.
4. Pengujian geser langsung antarmuka tanah merah-geogrid (ASTM 2012).
5. Langkah berikutnya adalah melakukan simulasi model numerik dengan bantuan piranti lunak Plaxis 2D versi 9.01 menggunakan parameter tanah merah dari hasil pengujian laboratorium, termasuk memodelkan adanya potensi selip pada antarmuka antara tanah merah dan geogrid.

Tabel 1. Simulasi numerik pengaruh butir halus pada kinerja dinding

	Prakoso (2012)	Guler <i>et al</i> (2007)	Hatami & Bathurst (2005a)
Metode numerik	Elemen hingga, Plaxis 2D	Elemen hingga, Plaxis 2D	Beda hingga, Flac 2D
Model tanah	Mohr-Coulomb	<i>Hardening Soil</i>	Hiperbolik Duncan & Chang
Antarmuka tanah-geogrid	Melekat sempurna	Melekat sempurna	Variasi kekuatan lekatan
Variasi	Kekakuan, kuat geser, berat isi tanah	-	Kuat geser, kekakuan antarmuka tanah-geogrid
Model perkuatan	Linear elastik	Linear elastik	Hiperbolik
Simulasi pemadatan	Beban merata	Elemen <i>plates</i>	Beban merata

HASIL DAN ANALISIS

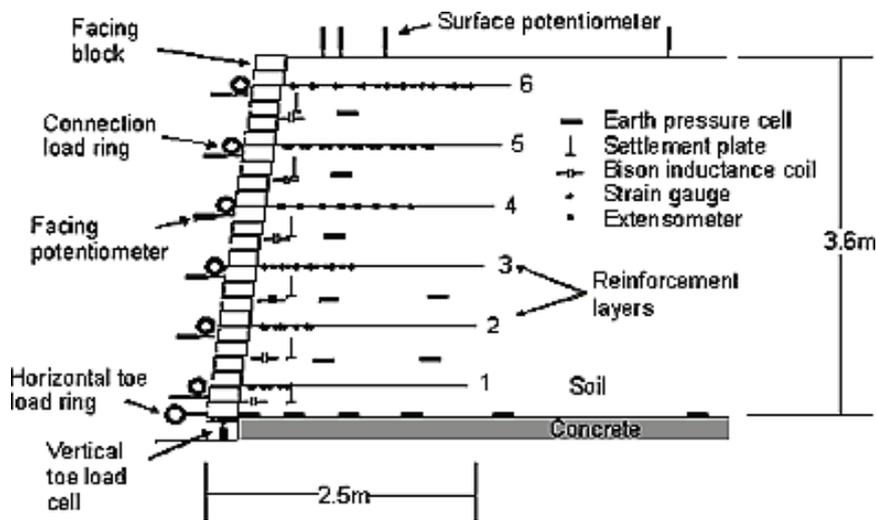
Model numerik *RMC Test Wall 1*

RMC Test Wall 1 mempunyai tinggi 3,6 m dengan kemiringan muka 8° terhadap vertikal. Dinding ini dibuat dari pasir yang diperkuat 6 lapis geogrid polipropilena dengan

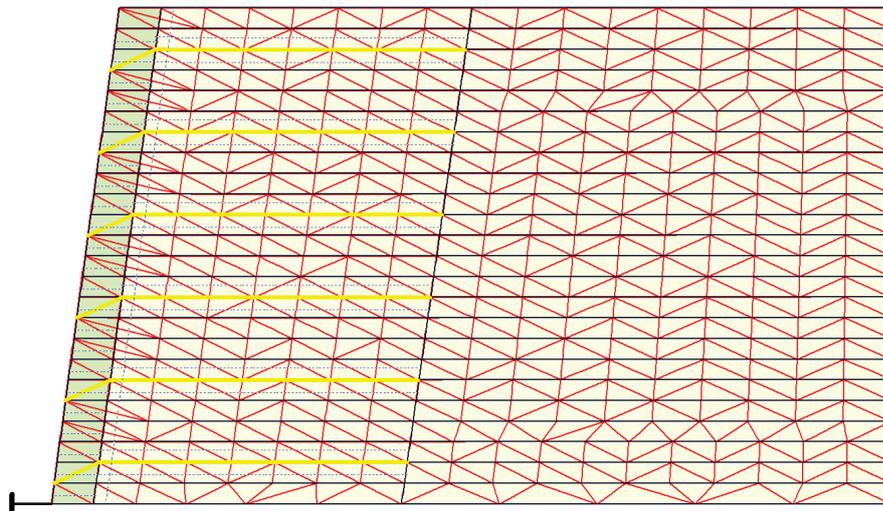
penutup muka blok modular berukuran lebar 300 mm, tinggi 150 mm dan panjang 200 mm. Sketsa dinding dan instrumen yang dipasang diperlihatkan pada Gambar 2.

Dalam kajian ini, model numerik *RMC Test Wall 1* dikembangkan dari model Guler *et al* (2007) dengan bantuan piranti lunak Plaxis 2D versi 9.01 (Brinkgreve 2005). Bagian bawah dinding diberi kondisi batas *horizontal* dan *vertical fixities*. Pada blok modular terbawah, kondisi batasnya adalah *vertical fixities* karena di bawah modular block *RMC Test Wall 1* terdapat *roller* yang hanya dapat bergerak

horizontal. *Load ring* pada *toe* dimodelkan dengan elemen *node to node anchor*. Antarmuka blok-blok dan antarmuka blok-tanah dimodelkan dengan elemen antarmuka. Untuk mensimulasikan proses pemadatan, digunakan elemen *plate* dengan parameter EA dan EI yang tidak memberikan kontribusi kekuatan pada sistem dinding tanah. (E=modulus Young, A=luas penampang, I= momen inersia). Model numerik yang direkonstruksi dari Guler *et al* (2007) diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 2. *RMC Test Wall 1* (Huang *et al* 2009)



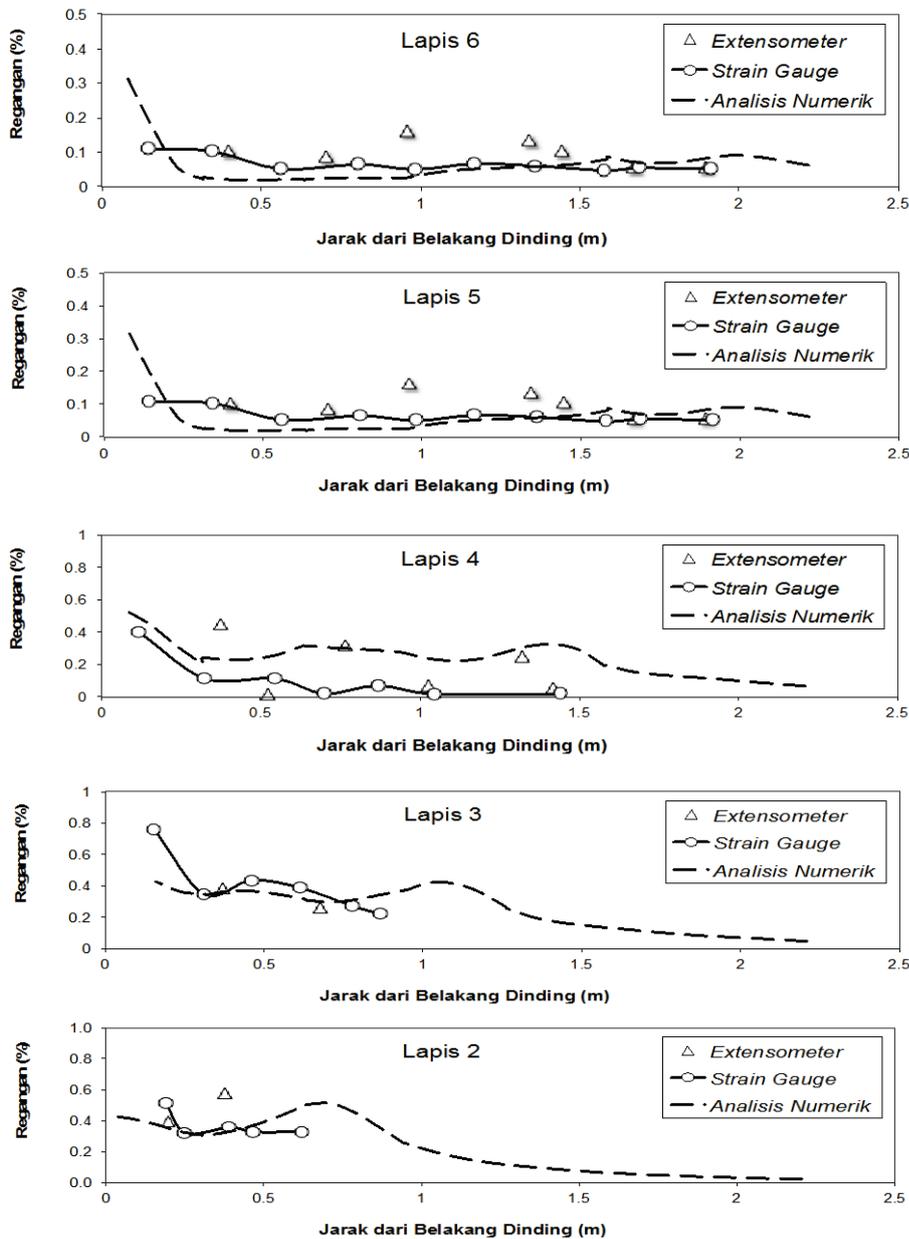
Gambar 3. Model numerik hasil rekonstruksi model Guler *et al* (2007)

Verifikasi model numerik

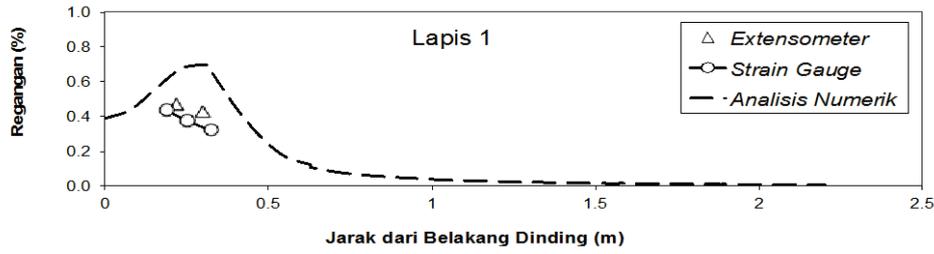
Verifikasi model numerik dilakukan dengan membandingkan respon regangan perkuatan, reaksi *toe*, deformasi muka, dan tekanan vertikal pondasi terhadap data *RMC Test Wall 1* (Gambar 4 – Gambar 7). Reaksi horizontal *toe* diambil dari reaksi gaya aksial elemen *node to node anchor*, sedangkan reaksi vertikal *toe* diperoleh dari nilai rata-rata tegangan vertikal dari beberapa *stress point*

terbawah pada blok modular dikalikan dengan lebar blok modular. Rasio EA/EI untuk elemen *plates* diambil sebesar 12.

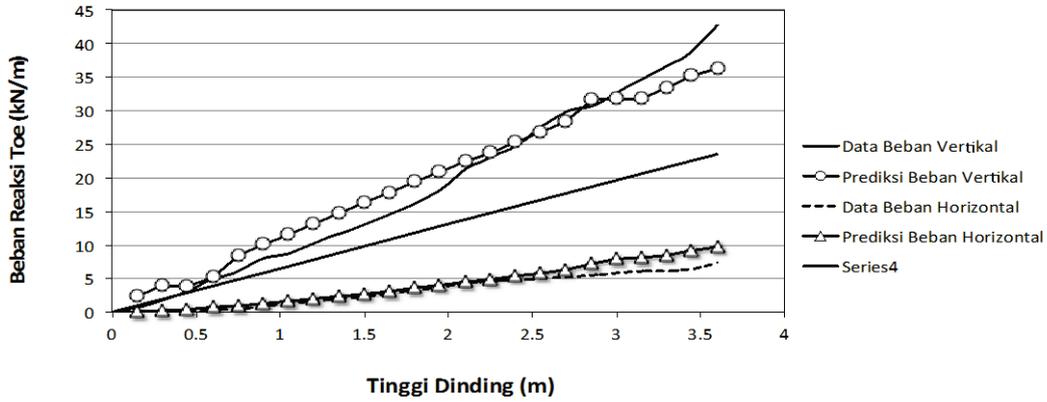
Dari hasil verifikasi pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 7, seluruh respon model dinding dinilai sama dengan data pengukuran sehingga model ini dapat digunakan untuk simulasi numerik dinding dari tanah merah yang diperkuat geogrid.



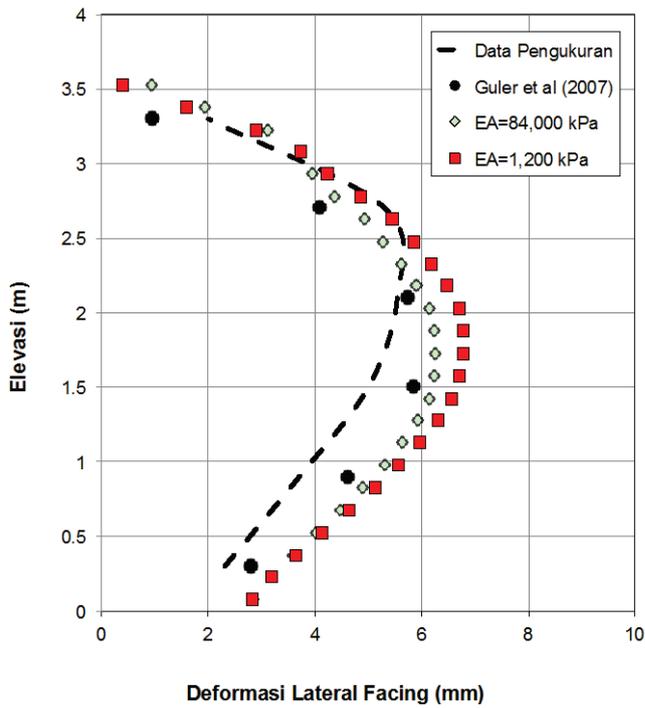
Gambar 4. Verifikasi regangan perkuatan



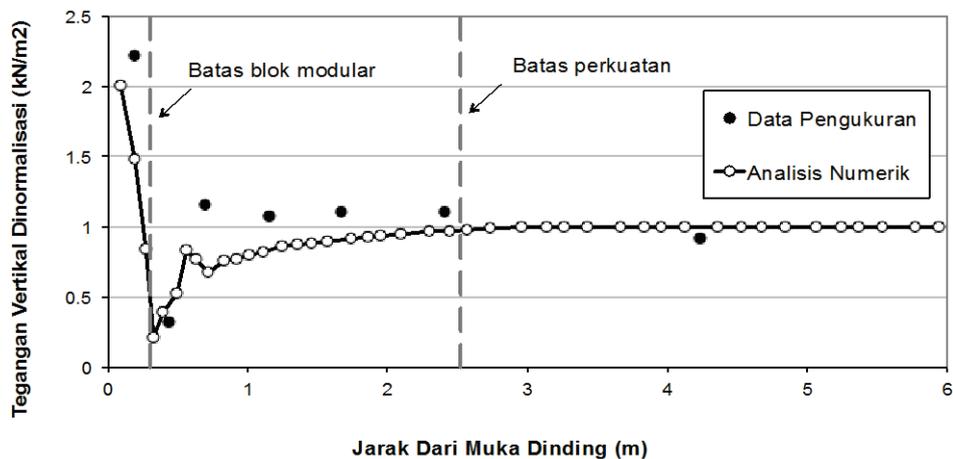
Gambar 4. Verifikasi regangan perkuatan (lanjutan)



Gambar 5. Verifikasi reaksi toe



Gambar 6. Verifikasi deformasi muka

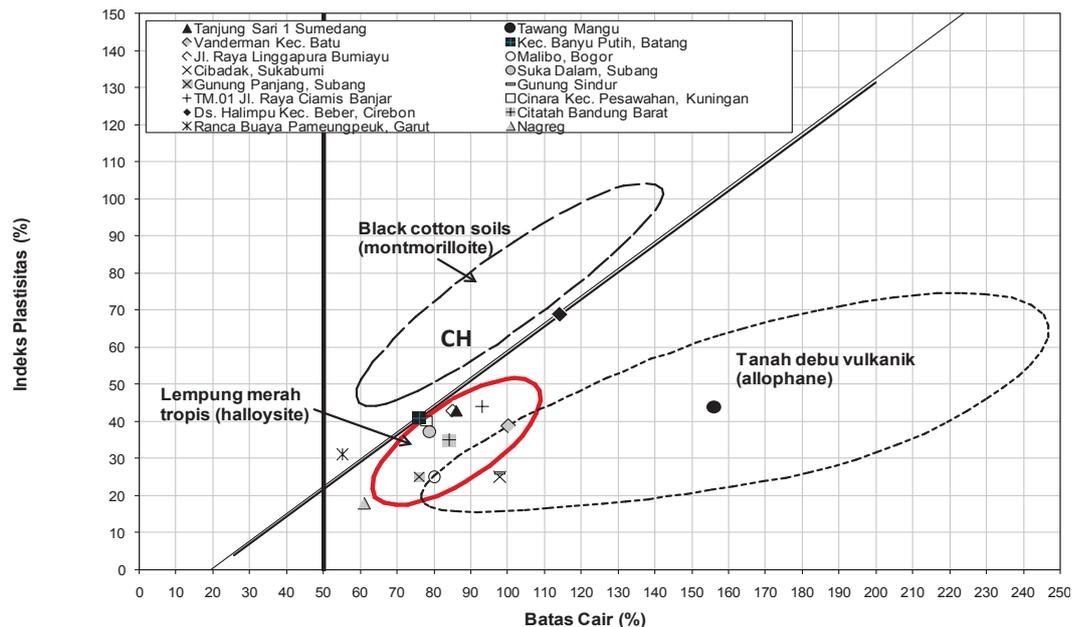


Gambar 7. Tekanan vertikal pondasi

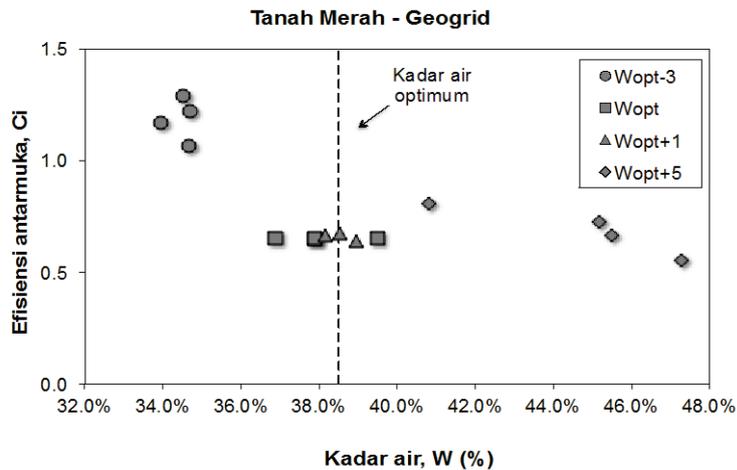
Hasil pengujian laboratorium

Tanah merah yang digunakan dalam kajian ini merupakan tanah residual produk lapukan abu vulkanik dari Tanjung Sari, Sumedang, Jawa Barat. Tanah tersebut mempunyai indeks plastisitas 30%, kandungan lolos saringan No. 200 adalah 82%, kadar lempung 32,5%, berat isi maksimum 12,7 kN/m³ dan kadar air optimum 38,5%. Tanah tersebut termasuk jenis *lempung merah tropis*

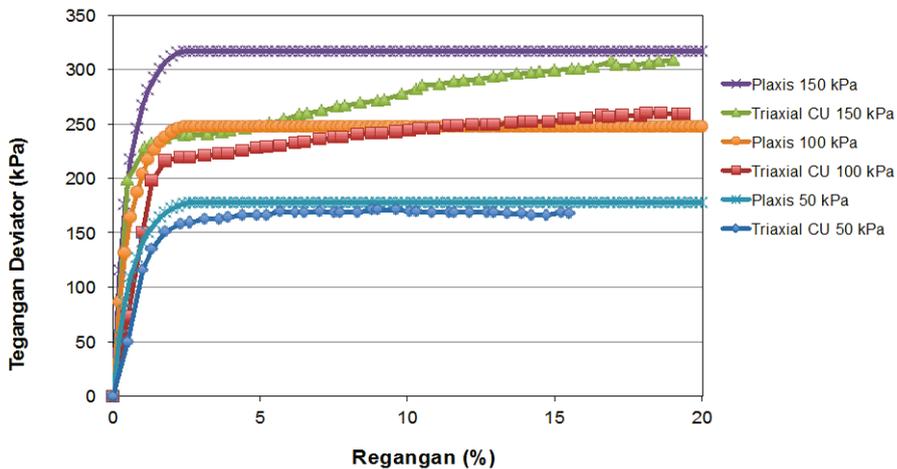
dengan mineral *halloysite* menurut Wesley (2010), lanau elastis dengan batas cair tinggi (MH) dalam *unified soil classification system* (ASTM D2487 2006), kelas A-7-5 menurut SNI-03-6797-2002 (BSN 2002), dan termasuk timbunan biasa dalam spesifikasi umum Bina Marga (2010). Plot data tanah merah pada kurva plastisitas dari Wesley (2010) diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Data batas Atterberg tanah merah



Gambar 9. Hasil uji geser langsung antarmuka tanah merah-geogrid



Gambar 10. Verifikasi parameter *hardening soil* terhadap hasil uji triaksial CU

Geogrid yang digunakan dalam kajian ini adalah geogrid poliester tipe *welded* dengan kuat tarik arah memanjang dan melintang mesin sebesar 131,2 kN/m dan 44,6 kN/m; kekakuan sekan 2% arah memanjang mesin sebesar 1987 kN/m. Ukuran bukaan geogrid tersebut 71x24 mm.

Hasil uji geser langsung antarmuka tanah merah-geogrid poliester disajikan pada Gambar 9. Nilai C_i yang dihitung dengan persamaan (1) berkisar antara 0,50-0,67. Pengujian tersebut dilakukan pada rentang kadar air +5% sampai -3% dari kadar air optimum. Sesuai dengan penelitian Abu-Farsakh *et al* (2007), nilai C_i terbesar diperoleh pada sampel di sisi kering kadar air optimum.

Desain tanah, geogrid dan antarmuka

Dalam kajian ini digunakan parameter desain tanah merah pada kondisi kadar air 1% di atas optimum (W_{opt+1}).

Model *hardening soil* digunakan untuk tanah merah karena dapat memodelkan hubungan regangan aksial dan tegangan deviator secara hiperbolik (Brinkgreve 2005). Parameter desain tanah merah (Tabel 2) diperoleh dari hasil pengujian triaksial *consolidated undrained (CU)* dan konsolidasi dengan menggunakan metode Suarak (2010).

Parameter desain dan model tanah merah diverifikasi terhadap hasil pengujian triaksial *CU*, Gambar 10. Terlihat bahwa perilaku

tegangan – regangan dari model dinilai relatif sama dengan perilaku dari pengujian triaksial *CU*.

Untuk elemen antarmuka, digunakan faktor reduksi kuat geser (R_{inter}) sebagai berikut (Brinkgreve 2005):

$$c_i = R_{inter} \cdot c \dots\dots\dots (2)$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \cdot \tan \varphi \dots\dots\dots (3)$$

Dari hasil uji geser langsung pada Gambar 9 dan dengan kedua persamaan tersebut, untuk sampel W_{opt+1} diperoleh R_{inter} sebesar 0,7.

Tabel 2. Parameter desain tanah merah

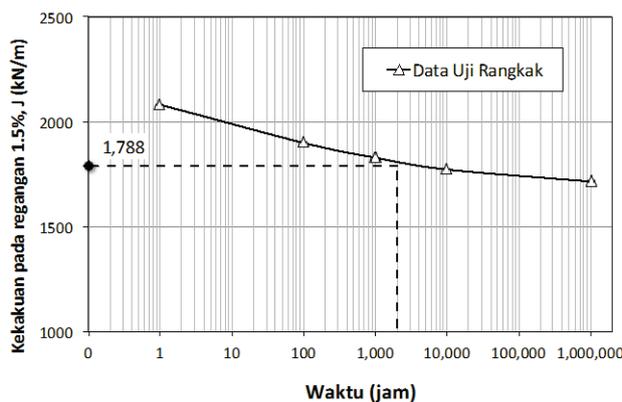
Tipe Material	<i>Undrained</i>
Berat isi, γ (kN/m ³)	17,4
Permeabilitas, k (m/hari)	2,59E-05
Kohesi, c (kPa)	13
Sudut geser dalam, ϕ (°)	33,9
Sudut dilatasi, ω (°)	0
p_{ref} (kN/m ²)	100
E_{ref}^{50} (kN/m ²)	49,916
E_{ref}^{oed} (kN/m ²)	34,379
E_{ref}^{ur} (kN/m ²)	149,748
Power m (-)	0,5
K_{0NC} (-)	0,442
R_f (-)	0,9

Dalam studi ini digunakan geogrid dari jenis geogrid poliester yang berbeda dengan geogrid pada *RMC Test Wall 1*. Parameter desain geogrid ditentukan dengan metode Walters *et al* (2002). Parameter kekakuan geogrid diolah dari kurva *isochronous* dari pengujian rangkai yang dilakukan pabrik pembuatnya. Untuk *RMC Test Wall 1*, lamanya konstruksi adalah 2000 jam dan regangan maksimum perkuatan yang terjadi sampai akhir konstruksi adalah 1,5% (Hatami dan Bathurst 2005b) atau setara dengan kecepatan pembebanan 10^{-5} %/menit. Berdasarkan data tersebut, parameter desain kekakuan geogrid adalah sebesar 1788 kN/m (Gambar 11).

Simulasi numerik dinding tanah merah yang diperkuat geogrid

Karena tanah merah bersifat *undrained*, tahapan simulasi perhitungan yang dilakukan adalah:

1. Tahap penimbunan dan pemadatan dengan tipe analisis plastik.
2. Tahap pemberian beban tambah (*surcharge*) 10 kPa sampai 40 kPa dengan tipe analisis plastik atau disebut juga *undrained loading*.
3. Beban tambah dipertahankan sebesar 40 kPa dengan tipe analisis konsolidasi (dalam makalah ini disebut juga *drained loading*) hingga tekanan air pori eksese mencapai 1 kPa.



Gambar 11. Penentuan parameter desain kekakuan geogrid

Untuk mengetahui pengaruh selip pada model dinding tanah merah, dalam simulasi ini dibandingkan respon dinding dengan elemen antarmuka yang diaktifkan (dengan $R_{inter}=0,7$) dan elemen antarmuka yang non-aktif atau tidak terjadi selip.

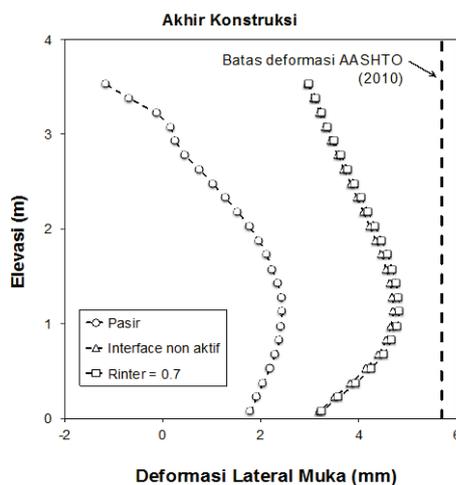
PEMBAHASAN

Deformasi lateral muka

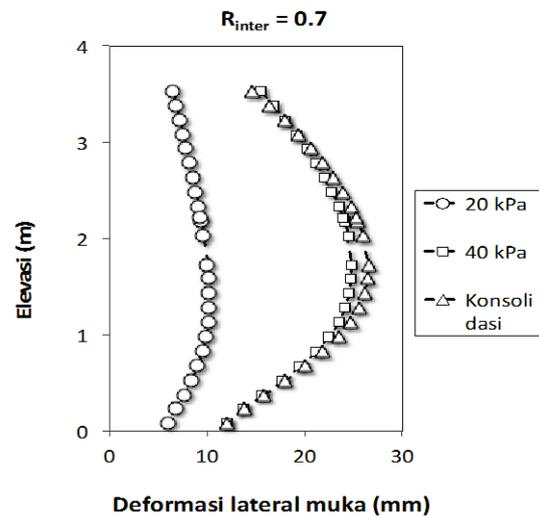
Prediksi deformasi lateral muka model dinding tanah merah pada akhir konstruksi memenuhi syarat AASHTO (2010) walaupun lebih besar dibandingkan dinding pasir (Gambar 12). Akibat *surchage* dan saat tekanan air pori eksese telah terdispersi, deformasi semakin bertambah di bagian tengah dinding (Gambar 13).

Reaksi toe dan tekanan vertikal pondasi pada tahap konstruksi

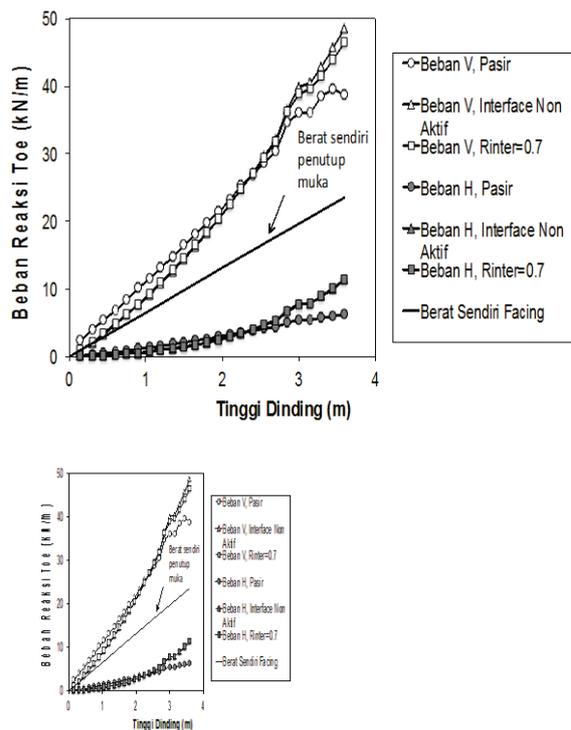
Dari Gambar 14 terlihat bahwa efek *downdrag* lebih signifikan pada dinding tanah merah dibandingkan dinding pasir. Hal ini disebabkan deformasi dan rotasi pada dinding tanah merah yang lebih besar. Efek *downdrag* tersebut menyebabkan reaksi vertikal *toe* yang lebih besar daripada berat sendiri muka.



Gambar 12. Deformasi lateral muka pada akhir konstruksi



Gambar 13. Deformasi muka dinding tanah merah akibat *surchage* dan konsolidasi



Gambar 14. Reaksi toe pada akhir konstruksi

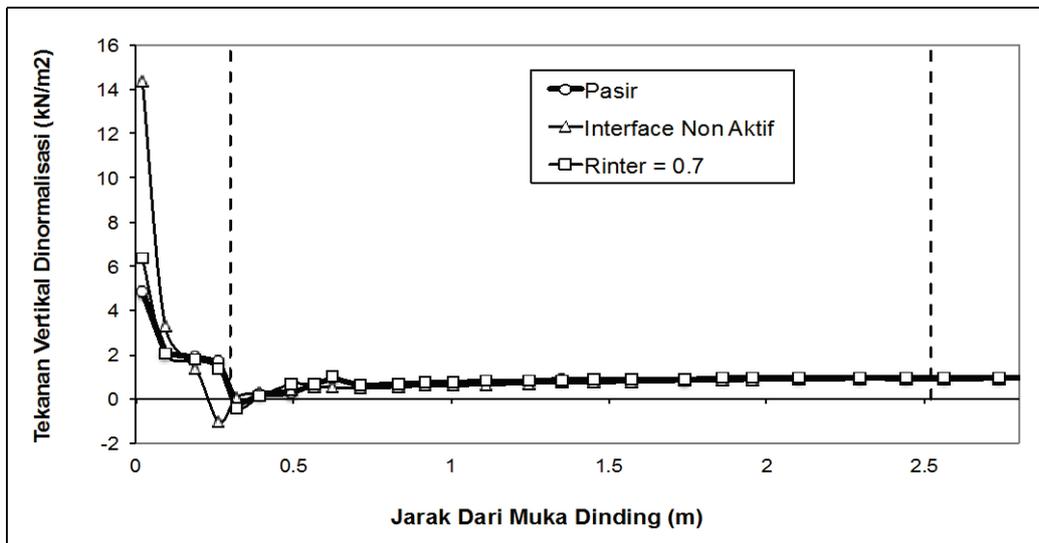
Gambar 14 terlihat reaksi vertikal *toe* pada model dinding tanah merah tanpa selip (*interface* non aktif) lebih tinggi dibandingkan model dengan selip ($R_{inter} = 0.7$). Penyebab terjadinya perilaku ini adalah karena selip antara tanah merah dengan geogrid mengurangi efek *downdrag* karena geogrid ikut bergerak (tercabut) mengikuti pergerakan muka. Fenomena tersebut juga dapat dijelaskan oleh respon tekanan vertikal pondasi (pada dasar dinding) pada Gambar 15. Pada model tanpa selip, tekanan vertikal pondasi pada bagian terdepan blok modular muka sangat besar dan terjadi tekanan negatif (tarik) pada bagian

belakang blok modular muka. Secara visual, terjadinya deformasi *mesh* pada kondisi ini diperlihatkan pada Gambar 16.

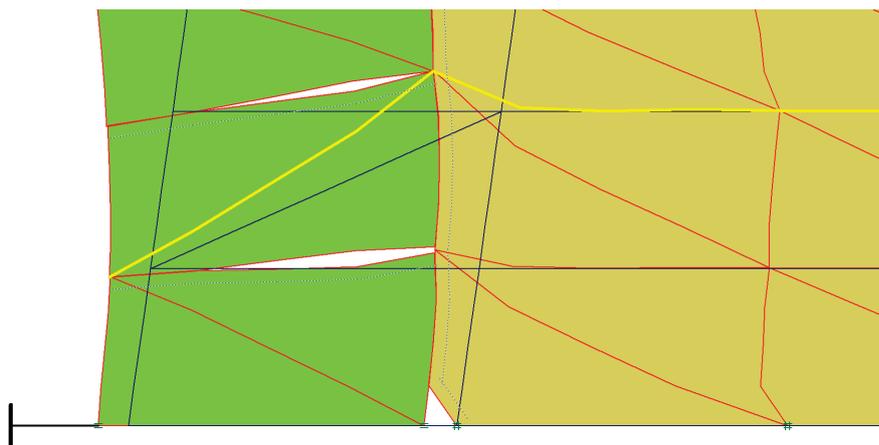
Untuk mengetahui distribusi beban lateral tanah yang dipikul oleh *toe* dan oleh perkuatan, dihitung dengan persamaan berikut (Bathurst *et al* 2009):

$$P_{AH} = F_H + \sum_{i=1}^6 (T_{conn})_i \dots \dots \dots (4)$$

dimana P_{AH} adalah beban horizontal total pada kolom penutup muka, F_H adalah reaksi horizontal *toe*, dan T_{conn} adalah beban koneksi.



Gambar 15. Tekanan vertikal pondasi pada akhir konstruksi



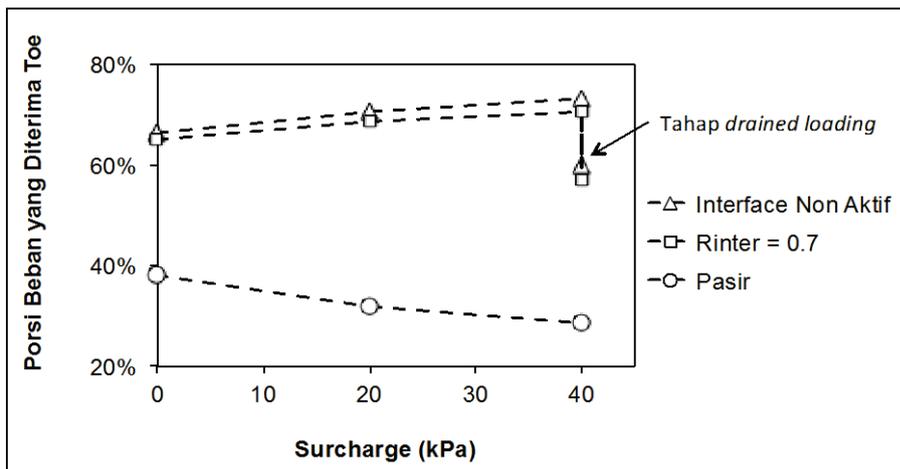
Gambar 16. Deformasi mesh pada daerah *toe*

Dengan persamaan (4), maka porsi beban yang diterima oleh *toe* terhadap beban horizontal total adalah: F_H/P_{AH} . Jika porsi beban yang diterima oleh *toe* (F_H/P_{AH}) berkurang maka porsi beban yang diterima koneksi perkuatan (T_{conn}/P_{AH}) akan meningkat.

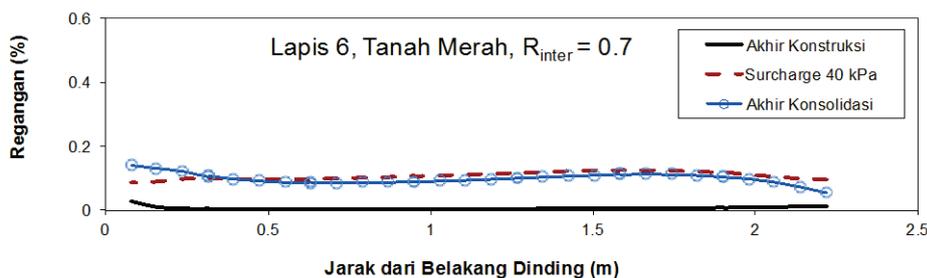
Pola distribusi beban horizontal yang diterima *toe* dan perkuatan pada dinding tanah merah akibat *surcharge* memperlihatkan pola yang berbeda dengan dinding pasir (Gambar 17). Pada dinding pasir terlihat porsi beban yang diterima oleh *toe* semakin berkurang dengan bertambahnya *surcharge* akibat termobilisasinya perkuatan. Respon ini konsisten dengan model numerik Bathurst *et al* (2009). Akan tetapi, respon dinding tanah merah memperlihatkan terjadinya peningkatan reaksi horizontal *toe* saat tahap *undrained loading*. Ketika tahap *drained loading*, terjadi

penurunan reaksi horizontal *toe*, yang berarti porsi beban yang diterima perkuatan pada koneksi geogrid dengan muka semakin besar. Efek *drained loading* tersebut sangat signifikan karena beban koneksi perkuatan meningkat hingga sekitar 10%.

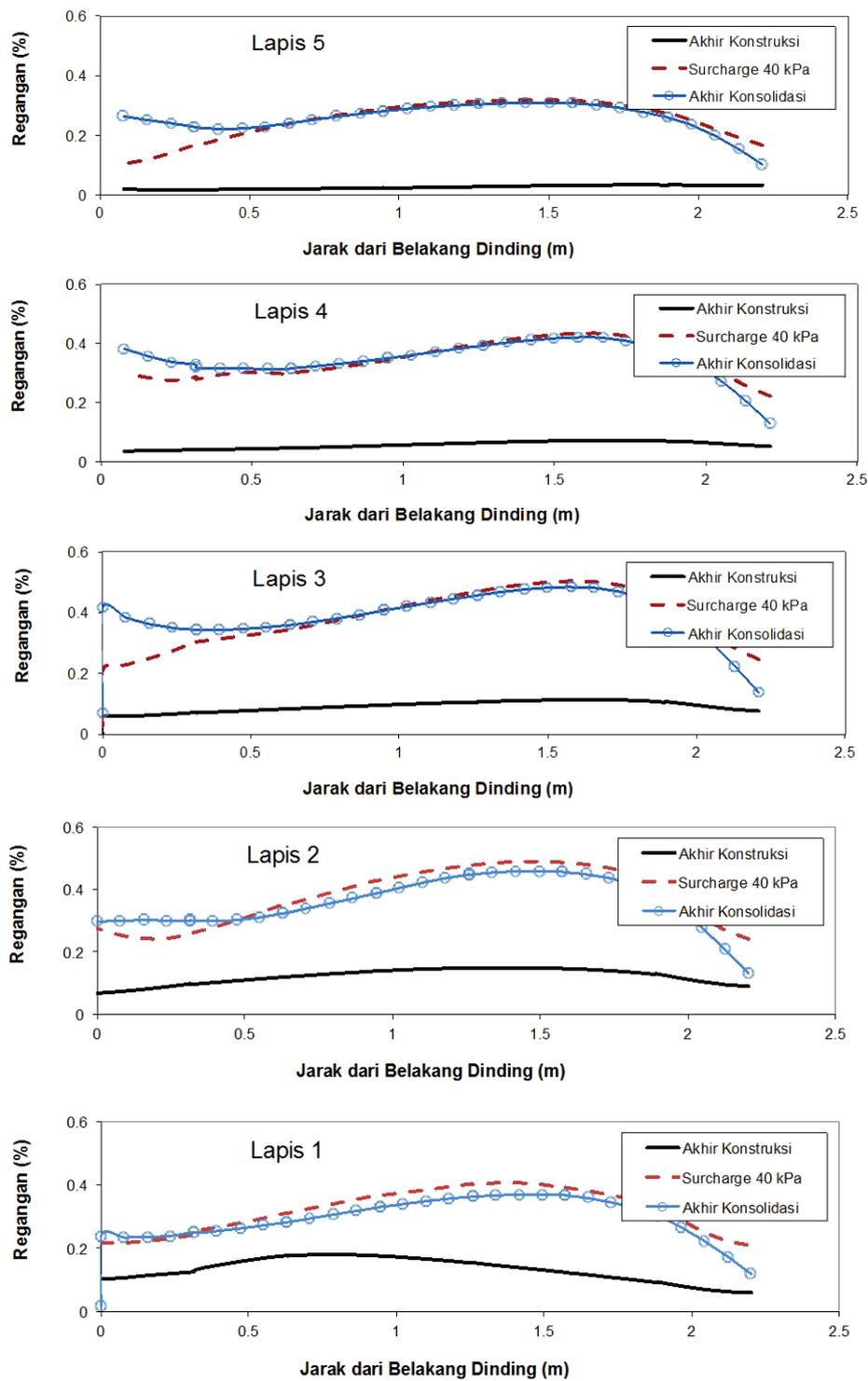
Peningkatan beban koneksi akibat terdispasinya tekanan air pori eksese (konsolidasi) pada tahap *drained loading* tersebut juga terlihat pada distribusi regangan pada setiap lapis geogrid (Gambar 18). Peningkatan regangan (yang juga berarti peningkatan beban koneksi perkuatan) pada Gambar 18 teridentifikasi pada lapis geogrid ke-3 sampai lapis ke-6 (lapis teratas). Hal ini disebabkan deformasi terbesar yang terjadi antara kedua lapis geogrid tersebut seperti diperlihatkan pada kontur *total displacement* dalam Gambar 19.



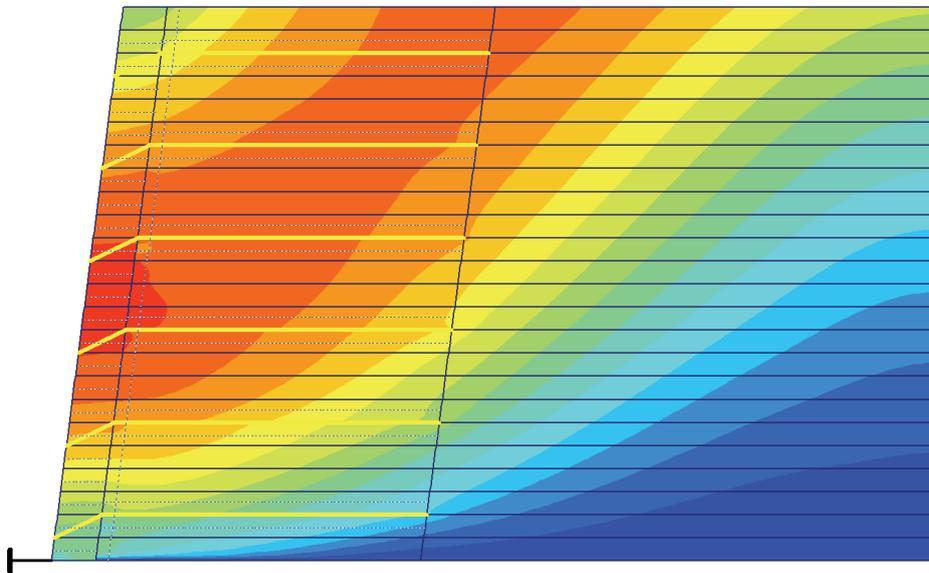
Gambar 17. Porsi reaksi horizontal *toe* terhadap beban horizontal total akibat *surcharge*



Gambar 18. Respon regangan perkuatan



Gambar 18. Respon regangan perkuatan (lanjutan)



Gambar 19. Kontur *total displacement*, dinding tanah merah, $R_{inter}=0,7$

Karena sifat tanah merah relatif lebih kedap air dibandingkan tanah berbutir kasar, maka untuk desain kuat tarik perkuatan harus mempertimbangkan deformasi muka dan timbunan akibat terdisipasinya tekanan air pori eksese dalam jangka panjang, efek *downdrag* dan kekakuan *toe*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil kajian kinerja dinding tanah merah yang diperkuat geogrid berdasarkan model numerik adalah:

1. Respon dinding tanah merah yang diperkuat geogrid lebih kompleks dibandingkan dengan respon dinding tanah berbutir (pasir). Kompleksitas tersebut diakibatkan pengaruh gabungan dari sifat deformasi tanah merah dalam jangka panjang, kekakuan muka, kekakuan *toe*, dan perkuatan yang bersifat *extensible* atau dapat meregang.
2. Deformasi lateral muka pada jangka panjang lebih membutuhkan perhatian daripada saat akhir konstruksi. Dengan terjadinya proses

disipasi tekanan air pori dan terjadinya selip, deformasi lateral bertambah secara signifikan.

3. Desain kebutuhan kuat tarik perkuatan pada koneksi perlu mempertimbangkan terjadinya efek *downdrag* dan proses disipasi tekanan air pori eksese dalam jangka panjang.
4. *Toe* untuk dinding tanah merah didesain dengan lebih kaku dibandingkan untuk dinding dari tanah berbutir.

Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk kajian selanjutnya adalah:

1. Kinerja dinding tanah merah dapat ditingkatkan dengan pengelolaan drainase dan perencanaan *toe* yang lebih kaku.
2. Model numerik ini sebaiknya dikembangkan dengan menggunakan model tanah yang dapat memodelkan pengaruh penurunan kuat geser akibat hilangnya *suction* tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Farsakh, M., Coronel J; and Tao, M. 2007. "Effect of Soil Moisture Content and Dry Density on Cohesive Soil-Geosynthetic

- Interactions Using Large Direct Shear Tests". *Journal Of Materials In Civil Engineering* 19(7): 540-549.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. 2010. *LRFD Bridge Design Design Specifications*, Fifth Edition. Washington, DC.: AASHTO.
- American Standards Testing Materials. 2012. *Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method*. ASTM D5321. West Conshohoken: ASTM International.
- American Standards Testing Materials. 2006. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purpose (Unified Soil Classification System)*. ASTM D2487. West Conshohoken: ASTM International.
- Badan Standar Nasional. 2002. *Tata Cara Klasifikasi Tanah dan Campuran Tanah Agregat untuk Konstruksi Jalan*. SNI 03-6797-2002. Jakarta: Badan Standar Nasional.
- Bathurst, R. J., et al. 2009. "Influence of Reinforcement Stiffness and Compaction on the Performance of Four Geosynthetic-Reinforced Soil Walls". *Geosynthetics International* 16(1): 43–59.
- Brinkgreve, R.B.J. 2005. *Plaxis 2D – Version 9.A.A*. Netherland: Balkema Publishers.
- Coronel, Julian. 2006. *Frictional Interaction Properties Between Geomaterials and Geosynthetics*. Master of Science Thesis the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- Dobie, Michael. 2010. *Practical Use of Clay Fills in Reinforced Soil Structures*. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XIV HATTI. Development of Geotechnical Engineering in Civil Works and Geo-Environment. Yogyakarta.
- Federal Highway Administration. 2001. *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design and Construction Guidelines*. Publication No.FHWA-NHI-00-043. Washington DC: FHWA.
- Guler, E, Hamderi, M. and Demirkan, M. M. 2007. "Numerical analysis of reinforced soil-retaining wall structures with cohesive and granular backfills". *Geosynthetics International* 14 (6): 330–345.
- Hatami, Kianoosh, dan Bathurst, Richard J. 2005a. *Parametric Analysis of Reinforced Soil Walls with Different Backfill Material Properties*. In NAGS'2006 Conference, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 1–15.
- Hatami, Kianoosh, dan Bathurst, Richard J. 2005b. *Development and Verification of a Numerical Model for the Analysis of Geosynthetic-Reinforced Soil Segmental Walls under Working Stress Conditions*. Canadian Geotechnical Journal, 42: 1066–1085.
- Huang B., Bathurst R.J. dan Hatami K. 2009. "Numerical Study of Reinforced Soil Segmental Walls Using Three Different Constitutive Soil Models". *ASCEJ. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(10):1486-1498.
- Indonesia, Departemen Pekerjaan Umum. 2009. *Pedoman Konstruksi dan Bangunan: Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik, No. 003/BM/2009*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- _____, Kementerian Pekerjaan Umum. Direktorat Jenderal Bina Marga. 2010. *Spesifikasi Umum*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Liu, Ch.N., Ho, Y.H., and Huang, J.W. 2009. "Large Direct Shear Test of Soil/PET-Yarn Geogrid Interfaces". *Geotextiles and Geomembranes* 27: 19-30.
- Moelyani, Dian A. 2012. *Potensi Penggunaan Lempung untuk bahan Timbunan yang Diperkuat Geosintetik*. Prosiding Kolokium Jalan dan Jembatan. eds. Furqon Affandi dkk., 92 -99. Bandung: Pusjatan.
- Palmeira, Ennio M. 2009. "Soil–Geosynthetic Interaction: Modelling and Analysis". *Geotextiles and Geomembranes* 27: 368–390.
- Prakoso, Widjojo A. 2012. *Kajian Awal Penggunaan Tanah Butir Halus untuk Dinding Tanah Bertulang Geosintetik*. eds. Furqon Affandi dkk, 309-325. Bandung: Pusjatan.
- Suarak, Chanaton. 2010. *Geotechnical Aspects of the Bangkok MRT Blue Line Project*. Doctor of Philosophy Thesis. Engineering and Technology Griffith University.