

PERILAKU CABUT GEOGRID DALAM TANAH MERAH BERDASARKAN ANALISIS PENGUJIAN LABORATORIUM DAN METODE ELEMEN HINGGA (GEOGRID PULLOUT BEHAVIOR IN RED CLAY BASED ON ANALYSIS OF LABORATORY TESTS AND FINITE ELEMENT METHOD)

Rakhman Taufik¹⁾, Dian Asri Moelyani²⁾, Dea Pertiwi³⁾

^{1),2),3)} Puslitbang Jalan dan Jembatan

^{1),2),3)} Jl A.H Nasution No. 264 Bandung 40294

¹⁾ e-mail: rakhman.taufik@pusjatan.pu.go.id

²⁾ e-mail: dian.asri@pusjatan.pu.go.id

³⁾ e-mail: dea.pertiwi@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 06 Mei 2014; direvisi: 14 Juli 2014; disetujui: 07 Agustus 2014

ABSTRAK

Beberapa pedoman perencanaan dinding penahan tanah dengan perkuatan geogrid mensyaratkan penggunaan bahan berbutir dengan kandungan butir halus kurang dari 15%. Di Indonesia, tanah merah dengan kandungan butir halus yang tinggi mulai digunakan sebagai pengganti bahan berbutir karena mempunyai sifat teknis yang baik. Akan tetapi, tercatat adanya dinding tanah yang tidak memberikan kinerja sesuai dengan persyaratan. Hal ini merupakan indikasi perlunya pemahaman perilaku interaksi antara tanah butir halus dengan geogrid. Oleh karena itu, salah satu mekanisme interaksi tanah dan geogrid, yaitu perilaku cabut, dibahas dalam tulisan ini. Pengujian cabut di laboratorium dilakukan dengan variasi jenis geogrid. Hasil pengujian cabut digunakan untuk mengembangkan model dengan metode elemen hingga untuk menambah pemahaman terhadap interaksi kedua material tersebut. Dari hasil analisa, akibat sifat geogrid yang dapat memanjang (*extensible*), respon geogrid ketika menerima beban cabut tidak seragam. Selain itu, perilaku cabut geogrid tidak hanya dipengaruhi oleh kekakuan geogrid, tetapi juga oleh konfigurasi geometri geogrid. Hasil analisis dengan metode elemen hingga memberikan gambaran pentingnya sistem drainase untuk mendisipasi tegangan air pori eksese jika tanah butir halus digunakan dalam dinding penahan tanah dengan perkuatan geogrid.

Kata kunci: dinding penahan tanah, tanah merah, kandungan butir halus, geogrid, uji cabut, metode elemen hingga

ABSTRACT

Several design guidelines required granular soils with finer content less than 15% in geogrid reinforced walls. In Indonesia, red clay with high fines content has been used to replace the granular soil due to its good engineering properties. However, a case of non-performance geogrid reinforced wall with red clay was recorded. This indicates the need of a thorough understanding of the interaction mechanisms between high fines content soil and geogrid. Therefore, one of the mechanism interactions, i.e. pullout behaviors, is described in this paper. A series of pullout laboratory tests with various geogrid types were carried out. The results of the tests were used to develop model with finite element method to get more insight into the interaction of the two materials. From the analysis, due to the extensible properties of the geogrid, strain respon of the geogrid when subjected to pullout load was not uniform. More over, geogrid pullout behavior was not only influenced by the stiffness of geogrid but also its geometrical configuration. The results of finite element analysis describe the importance of drainage system for dissipating excess pore water pressure if high fines content soil is used in geogrid-reinforced retaining walls.

Keywords: retaining wall, red clay, fine soil content, geogrid, pullout test, finite element method

PENDAHULUAN

Salah satu jenis dinding penahan tanah yang umum digunakan adalah dinding tanah yang distabilisasi secara mekanis (*Mechanically Stabilized Earth Wall, MSE*) dengan perkuatan geogrid (selanjutnya disingkat menjadi dinding *MSE*). Dinding *MSE* mempunyai kelebihan dibandingkan dinding kantilever beton, dinding gravitasi dan dinding modular prafabrikasi (AASHTO 2010). Keunggulan dinding *MSE* dibandingkan struktur dinding lainnya adalah lebih dapat mengakomodir penurunan total dan penurunan diferensial.

Beberapa pedoman perencanaan di antaranya (Indonesia 2009 dan FHWA 2009) mensyaratkan penggunaan bahan berbutir dengan kandungan halus lolos saringan No. 200 kurang dari 15% untuk dinding *MSE*. Akan tetapi, ketersediaan bahan berbutir yang memenuhi syarat sering tidak tersedia di lokasi pekerjaan. Selain itu, harga kerikil dan pasir yang lebih mahal dibandingkan material kohesif dapat menjadi penghambat penggunaan geogrid untuk dinding *MSE*. Di sisi lain, material tanah merah (yang mempunyai kandungan halus lebih dari 15%) telah banyak digunakan sebagai timbunan jalan dan telah menunjukkan kinerja yang cukup baik karena mempunyai karakteristik mekanis yang baik. Tanah merah banyak terdapat di Indonesia karena merupakan hasil pelapukan batuan setempat.

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 7,3 m memberikan kinerja yang baik. Akan tetapi, teridentifikasi pula satu kasus keruntuhan penutup muka (*facing*) dinding tanah merah di abutmen jembatan Tol Veteran Jakarta setinggi 7 m (Dobie 2010). Hal ini merupakan indikasi perlunya pemahaman perilaku interaksi tanah butir halus dalam sistem dinding tanah dengan perkuatan geosintetik.

Salah satu aspek penting yang perlu dikaji sehubungan dengan penggunaan tanah kohesif adalah stabilitas internal dinding *MSE* terhadap keruntuhan cabut. Hal ini disebabkan material tanah kohesif sangat dipengaruhi oleh kadar air

dan derajat pemadatan. Karena permeabilitasnya yang rendah, kuat geser efektif tanah merah juga sangat dipengaruhi oleh tegangan air pori eksese yang dapat timbul akibat pemadatan dan beban lainnya. Oleh karena itu, tulisan ini memaparkan hasil penelitian perilaku tahanan cabut perkuatan geogrid dengan tanah merah melalui pengujian laboratorium dan analisis dengan metode elemen hingga.

KAJIAN PUSTAKA

Tanah merah

Sifat-sifat teknis tanah merah telah banyak dikaji diantaranya oleh Wesley (2010) dan Pertiwi dan Taufik (2013). Tanah merah lazim disebut juga sebagai tanah laterit (*lateritic soils*). Laterit terbentuk dari proses pelapukan tanah residual atau disebut juga sebagai proses laterisasi. Tanah laterit ini mempunyai kandungan *ferro-alumino silicates* yang tinggi, atau *sesquioxides* (oksida sekunder dari besi/ Fe_2O_3 atau aluminium/ Al_2O_3 atau keduanya) dan mempunyai kandungan silikat dasar dan utama yang rendah, tetapi dapat mengandung jumlah kuarsa dan kaolin yang cukup banyak menurut Blight dalam Peritiwi dan Taufik (2013).

Tanah residual yang dihasilkan dari proses pelapukan batuan beku dan vulkanik umumnya memiliki sifat teknis yang baik dan memiliki kuat geser tak terdrainase maupun parameter kekuatan efektif yang cukup tinggi (Wesley 2010). Wesley (2010) menyimpulkan bahwa tingginya kuat geser efektif tanah residual adalah karena:

1. Tanah residual mempunyai mineral lempung yang sifat friksi bagus.
2. Adanya efek mikrostruktur yang signifikan, berkontribusi pada tingginya kuat geser.
3. Mikrostruktur umumnya juga berkontribusi pada tingginya komponen kohesi pada kuat geser tanah residual. Sudut geser dalam umumnya pada rentang 25° - 35° , walaupun pada lempung *allophane* dan *halloysite* bisa mencapai 40° .

Pertiwi dan Taufik (2013) juga melakukan simulasi numerik dengan metode elemen hingga untuk timbunan tinggi dari tanah merah dengan piranti lunak Plaxis 2D (Brinkgreve 2002). Salah

satu hasil kajiannya yang diacu dalam tulisan ini adalah validasi model konstitutif tanah merah dari Tanjung Sari, Sumedang, Jawa Barat. Dari hasil verifikasi, model konstitutif *Hardening Soil* lebih sesuai untuk memodelkan tanah merah dibandingkan model *Mohr-Coulomb*. Adapun parameter tanah merah model *Hardening Soil* yang telah diverifikasi diperlihatkan pada Tabel 1.

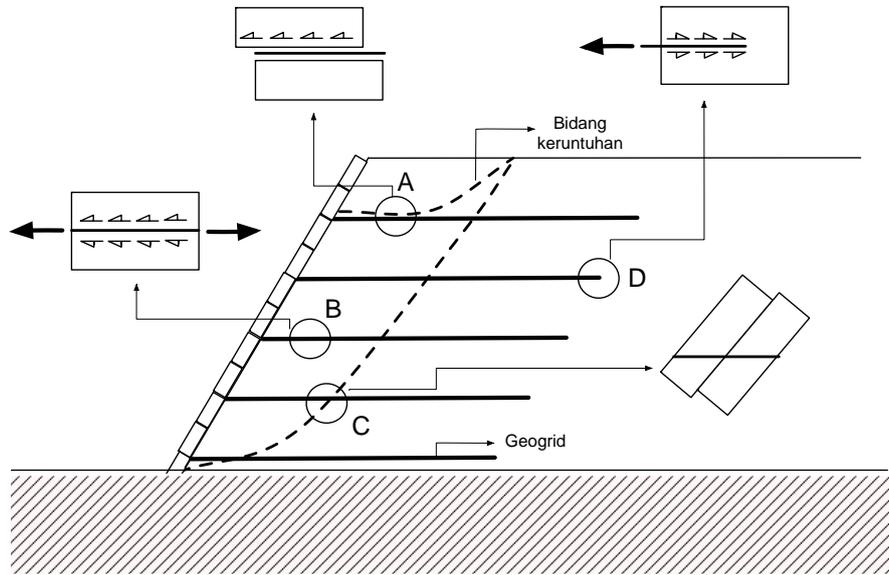
Interaksi tanah dan kekuatan geosintetik

Beberapa moda keruntuhan tanah dan kekuatan geosintetik dijabarkan oleh Palmeira (2009) pada Gambar 1. Pada daerah A, massa tanah dapat tergelincir pada permukaan

perkuatan, sehingga jenis pengujian yang sesuai adalah uji geser langsung. Pada daerah B, tanah dan perkuatan dapat berdeformasi dalam arah lateral, sehingga pengujian yang sesuai adalah uji tarik dalam tanah (*in-soil tensile test*). Daerah C menunjukkan situasi dimana tanah dan perkuatan digeser, oleh karena itu uji geser langsung dengan perkuatan miring dapat digunakan. Pada daerah D, perkuatan ditarik sehingga dapat dimodelkan dengan uji cabut. Moda keruntuhan yang dikaji dalam tulisan ini adalah pada daerah D.

Tabel 1. Parameter tanah merah model *Hardening Soil* (Pertiwi dan Taufik 2013)

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai
Tipe material	-	-	<i>Undrained</i>
Berat isi tak jenuh	γ_{unsat}	kN/m ³	17.03
Berat isi jenuh	γ_{sat}	kN/m ³	17.46
Koefisien permabilitas arah horisontal	k_x	m/hari	2.590E-05
Koefisien permabilitas arah vertikal	k_y	m/hari	2.590E-05
Rasio <i>Poisson</i>	ν	-	0.2
Kohesi efektif	c'	kN/m ²	26
Sudut geser dalam efektif	$\phi \ominus$	derajat	29.4
Sudut dilatansi	ψ	derajat	11
Faktor reduksi kuat geser antarmuka	R_{inter}	-	0.7
Modulus kekakuan sekan pada tekanan kekangan 100 kPa	E_{ref}^{50}	kN/m ²	5.904E+04
Modulus kekakuan tangen untuk kondisi <i>oedometer</i> pada tekanan kekangan acuan	$E_{\text{ref}}^{\text{oed}}$	kN/m ²	4.797E+04
Modulus <i>Young</i> sekan untuk pengangkatan beban (<i>unloading</i>) dan pembebanan kembali (<i>reloading</i>) pada tekanan kekangan acuan	$E_{\text{ref}}^{\text{ur}}$	kN/m ²	1.771E+05



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

Menurut Teixeira, et al (2007), perilaku struktur tanah yang diperkuat geosintetik sangat dipengaruhi oleh mekanisme interaksi yang timbul antara perkuatan dan timbunan tanah. Perkuatan tersebut berfungsi untuk mendistribusi tegangan dalam tanah untuk meningkatkan stabilitas internal dari struktur tanah yang diperkuat geosintetik. Perkuatan akan mengalami regangan tarik ketika mentransfer beban dari zona yang stabil ke zona yang tidak stabil.

Redistribusi tegangan dan respon deformasi dalam massa tanah yang diperkuat geosintetik tergantung pada kuat geser tanah, kuat tarik perkuatan, dan mekanisme transfer tegangan antara tanah dan perkuatan. Uji cabut telah umum digunakan untuk mengkaraktirasi mekanisme transfer tegangan tersebut.

Akan tetapi, mekanisme cabut antara tanah dan geogrid lebih kompleks dibandingkan dengan perkuatan *strip* atau lembaran. Hal ini disebabkan struktur geogrid yang terdiri dari *rib* melintang dan *rib* memanjang mempunyai bukaan yang relatif besar. Selain itu, perkembangan tekanan air pori eksed tidak dapat dipantau dalam uji cabut berdasarkan metode standar.

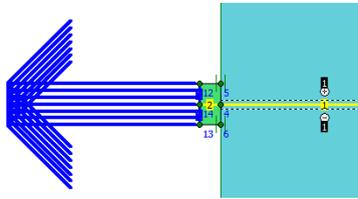
Oleh karena itu, selain melalui serangkaian pengujian cabut laboratorium, metode elemen hingga juga digunakan dalam tulisan ini untuk memberikan pemahaman yang lebih dalam terhadap interaksi tanah yang terjadi.

Uji cabut dengan analisis metode elemen hingga

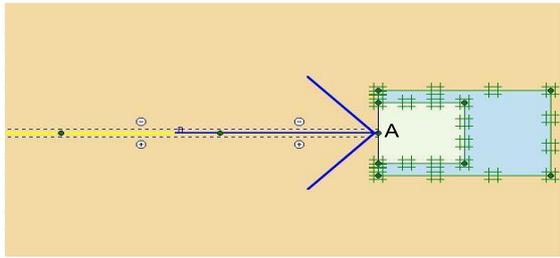
Penggunaan metode elemen hingga dengan bantuan piranti lunak Plaxis 2D (Brinkgreve 2002) telah digunakan diantaranya oleh Prakoso dan Ilyas (2013) dan Becker dkk (2013) untuk memodelkan pengujian cabut. Prakoso dan Ilyas (2013) memodelkan uji cabut laboratorium dengan memberikan perpindahan (*prescribed displacement*) pada geogrid dan gaya tarik yang dibutuhkan untuk menghasilkan perpindahan tersebut didapat dari hasil analisis dengan metode elemen hingga.

Sebaliknya, dalam pemodelan uji cabut lapangan, Becker dkk (2013) memberikan gaya tarik berupa beban titik (*point load*) pada geogrid dan perpindahannya diperoleh dari analisis dengan metode elemen hingga. Untuk mencegah keruntuhan tanah lokal di daerah bukaan, kedua penulis menggunakan material linier elastik di daerah bukaan dengan kekakuan dan rasio *poisson* yang sangat kecil. Secara lebih rinci,

kedua model tersebut diperlihatkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Model alat cabut laboratorium dan detail klem penjepit (Prakoso dan Ilyas 2013)

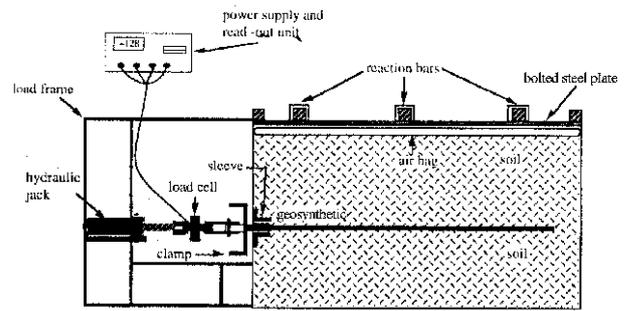


Gambar 3. Detail model klem alat cabut lapangan (Becker dkk 2013)

Pengujian cabut laboratorium

Prosedur pengujian cabut laboratorium telah menjadi standar ASTM D6706-01 (ASTM 2007). Pada dasarnya pengujian dilakukan dengan menempatkan benda uji geosintetik di antara dua lapis tanah (yang dibebani suatu tekanan vertikal), kemudian gaya horizontal diterapkan pada geosintetik melalui klem penjepit dan gaya yang dibutuhkan untuk mencabut geosintetik tersebut dicatat. Pada daerah bukaan terdapat lidah (*sleeve*) metal sepanjang 150 mm yang berfungsi untuk mentransfer gaya ke dalam benda uji tanah sehingga tegangan pada bukaan kotak akan berkurang.

Alat cabut laboratorium juga dilengkapi pengukur perpindahan klem penjepit benda uji geogrid. Selain itu, dapat diukur pula perpindahan pada beberapa lokasi di benda uji geogrid dengan transduser perpindahan elektronik, misalnya dari jenis *Linear Variable Differential Transformers (LVDT)*. Skema alat cabut diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema alat cabut (ASTM 2007)

HIPOTESIS

Dua hipotesis akan dievaluasi dalam tulisan ini. Hipotesis pertama adalah perilaku tahanan cabut tidak hanya dipengaruhi oleh sifat mulur dari geogrid. Hipotesis kedua adalah dengan kandungan butir halus diperlukan adanya penanganan untuk mendisipasi tegangan air pori eksis.

METODOLOGI

Pengujian cabut berdasarkan ASTM D 6706-01 (ASTM 2007) dilaksanakan di Laboratorium Geosintetik, Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (alat uji diperlihatkan pada Gambar 5). Alat cabut tersebut mempunyai kotak dengan panjang 1520 mm, lebar 760 mm dan tinggi 305 mm. Tekanan vertikal dan gaya cabut diterapkan dengan mesin hidrolik yang dikontrol secara elektronik. Tekanan dan gaya dari sel beban dicatat secara otomatis melalui data *logger*. Alat ini juga dilengkapi dengan empat buah *LVDT*. Jarak setiap *LVDT* dari bukaan alat adalah: *LVDT* 1 = 185 mm, *LVDT* 2 = 425 mm, *LVDT* 3 = 665 mm dan *LVDT* 4 = 815 mm.

Benda uji tanah yang digunakan dalam uji cabut diambil dari kuari Tanjung Sari, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat. Tanah tersebut mempunyai indeks plastisitas 38%, kandungan lolos saringan No. 200 sebesar 96%, berat isi maksimum 12,5 kN/m³ dan kadar air optimum 38,5%. Tanah tersebut termasuk jenis tanah merah tropis dengan mineral *halloysite* menurut Wesley (2010), lanau elastis dengan batas cair tinggi (MH) dalam sistem unifikasi

klasifikasi, kelas A-7-5 menurut Indonesia (2002), dan termasuk timbunan biasa berdasarkan Indonesia (2010).

Tanah merah dipadatkan dalam kotak alat cabut dengan target kepadatan minimal 95% dan pada kadar air optimum. Pemasangan dikontrol dengan mengukur berat isi tanah dan kadar air yang masuk pada kotak alat cabut. Tanah dipadatkan dalam kotak alat cabut dengan menggunakan alat bantu pematik pneumatik.



Gambar 5. Alat uji cabut laboratorium

Empat jenis geogrid dengan variasi geometri, kuat tarik, jenis polimer dan metode pembuatan digunakan dalam penelitian ini (Gambar 6 dan Tabel 2). Sebelum dilakukan pengujian cabut, dilakukan uji kuat tarik untuk keempat jenis geogrid tersebut berdasarkan

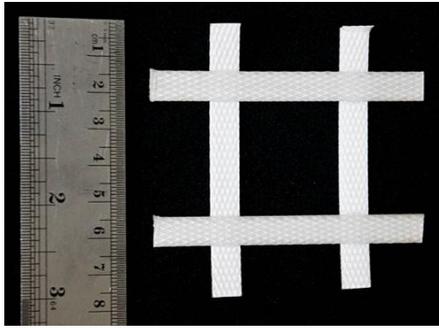
prosedur ISO 10319 (ISO 2008) dan ASTM D 6637-11 (ASTM 2011).

Pengujian cabut dilakukan dengan variasi tegangan vertikal 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa dan 120 kPa sedangkan panjang benda uji geogrid adalah sekitar 0,7 m. Semua pengujian cabut dilakukan pada arah mesin geogrid.

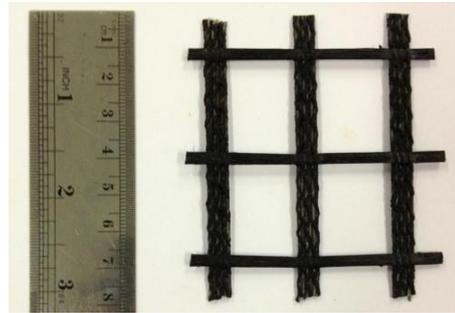
Hasil pengujian cabut laboratorium (dari satu jenis geogrid) tersebut digunakan untuk memvalidasi model elemen hingga. Validasi dilakukan dengan membandingkan respon perpindahan klem penjepit, perpindahan geogrid dan gaya cabut terhadap hasil uji laboratorium.

Validasi lainnya yang dilakukan adalah validasi model konstitutif tanah. Validasi tersebut dilakukan dengan membandingkan perilaku hubungan tegangan dan regangan dari hasil pengujian laboratorium triaksial terkonsolidasi tak terdrainase (*consolidated undrained*, CU) terhadap respon dari model elemen hingga.

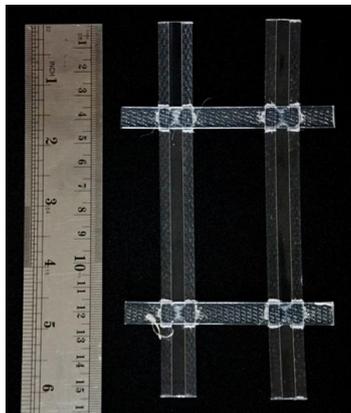
Analisis metode elemen hingga yang digunakan adalah model dua dimensi regangan bidang (*plane strain*). Piranti lunak yang digunakan adalah Plaxis 2D (Brinkgreve 2002). Elemen segitiga 15 nodal digunakan untuk material tanah. Dua model konstitutif tanah dikaji dalam tulisan ini, yaitu *Mohr-Coulomb* dan *Hardening Soil*. Beban vertikal dimodelkan sebagai beban merata di sisi atas model. Beban titik diberikan secara bertahap sampai terjadi keruntuhan cabut pada model.



GG1 (Polipropilena *Welded* Geogrid)



GG2 (Poliester *Multifilament Yarns* Geogrid)



GG3 (Poliester *Welded* Geogrid)



GG4 (*High Density Polyethylene*, HDPE Integral Geogrid)

Gambar 6. Benda uji geogrid yang digunakan dalam uji cabut laboratorium

Tabel 2. Geometri benda uji geogrid

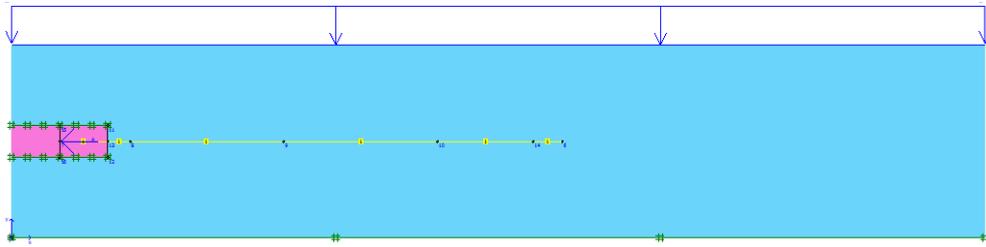
Kode Benda Uji dan Keterangan Geogrid	S_t (mm)	S_e (mm)	t (mm)	d (mm)
GG1 (Polipropilena <i>Welded</i> Geogrid)	37.9	41.2	0.8	0.8
GG2 (Poliester <i>Multifilament Yarns</i> Geogrid)	28.5	24.9	0.8	0.8
GG3 (Poliester <i>Welded</i> Geogrid)	76.7	41.4	1.0	1.2
GG4 (<i>High Density Polyethylene</i> , HDPE Integral Geogrid)	277.1	22.3	2.4	7.4

Keterangan: S_t = jarak antar *rib* transversal; d =tebal *rib* longitudinal, t =tebal *rib* transversal, S_e = jarak antara *rib* longitudinal

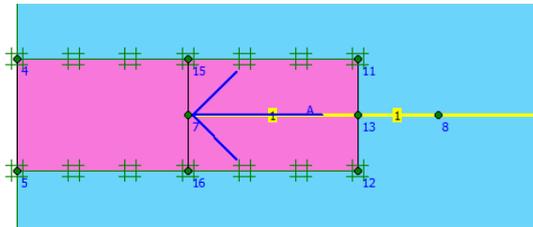
Geometri model dalam penelitian ini merujuk pada model Prakoso dan Ilyas (2013) dan Becker dkk. (2013) dengan beberapa modifikasi agar sesuai dengan alat uji cabut yang digunakan dalam penelitian ini. Modifikasi tersebut adalah adanya lidah (*sleeve*) pada alat uji cabut yang digunakan dalam penelitian (lihat Gambar 7.a). Seperti halnya model model Prakoso dan Ilyas (2013) dan Becker dkk (2013),

pada model elemen hingga dalam penelitian ini digunakan material *dummy* pada daerah bukaan untuk mencegah keruntuhan lokal, seperti pada Gambar 7.b.

Luaran hasil analisis dengan metode elemen hingga yaitu gaya tarik dan perpindahan pada geogrid digunakan untuk mengevaluasi mekanisme interaksi antara tanah dan geogrid.



Gambar 7.a. Potongan melintang



Gambar 7.b. Detail klem

Gambar 7. Model alat uji cabut dan detail klem

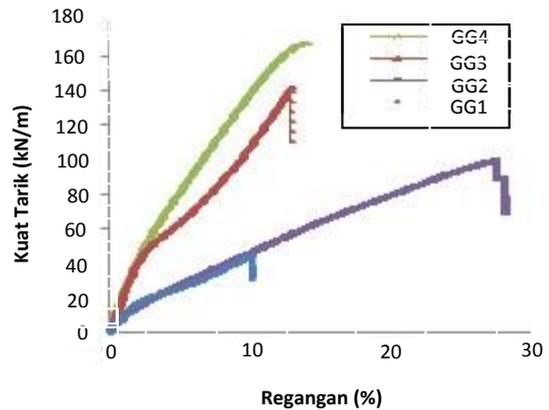
HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengujian laboratorium

Hasil pengujian kuat tarik diperlihatkan pada Tabel 3 dan Gambar 8. Terlihat bahwa benda uji GG3 dan GG4 mempunyai kekakuan yang tinggi dibandingkan benda uji GG1 dan GG2.

Hasil pengujian pengujian cabut dirangkum pada Tabel 4. Seluruh pengujian mengalami keruntuhan cabut kecuali untuk benda uji GG1. Hasil pengujian didefinisikan mengalami keruntuhan cabut ketika ujung geogrid mengalami perpindahan dari hasil bacaan LVDT dan berdasarkan pengamatan visual setelah pengujian. Pada benda uji GG1, ujung paling belakang geogrid tidak mengalami perpindahan

dan geogrid putus pada daerah antara klem dan lidah (*sleeve*).



Gambar 8. Hasil uji kuat tarik

Tabel 3. Hasil pengujian kuat tarik geogrid

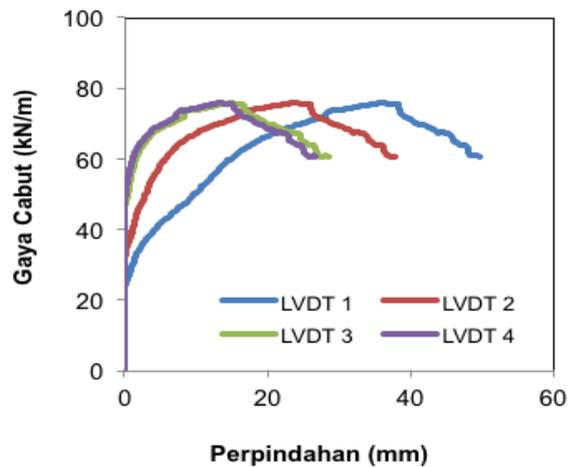
Kode Benda Uji dan Keterangan Geogrid	Kuat Tarik ¹ (kN/m)	Elongasi saat putus ¹ (%)	Kekakuan ² , J _{2%} (kN/m)
GG1 (<i>Welded</i> Polipropilena Geogrid)	47.2	11.4	841
GG2 (Geogrid Poliester <i>Multifilament Yarns</i>)	100	27.5	720
GG3 (<i>Welded</i> Poliester Geogrid)	131	12.1	1990
GG4 (Geogrid Integral <i>High Density Polyethylene</i> , HDPE)	166	13.8	2830

Keterangan: ¹ Berdasarkan ISO 10319, kecuali GG1 berdasarkan ASTM D6637; ² Kekakuan geogrid saat regangan 2%;

Tabel 4. Hasil pengujian cabut laboratorium

Jenis Geogrid	Tegangan Vertikal, σ_v (kPa)	Tahanan Cabut (kN/m)
GG1	20	30.0
	40	32.3
	80	26.9
GG2	40	50.1
	80	51.8
	120	55.7
GG3	40	59.5
	80	75.7
	120	80.0
GG4	40	65.6
	80	61.7
	120	63.5

Keterangan: GG1 mengalami keruntuhan geogrid.

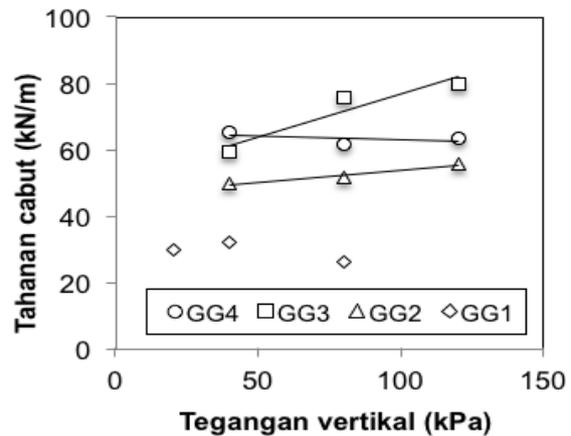


Gambar 9. Hubungan perpindahan dan gaya cabut pada benda uji GG3

Secara keseluruhan keruntuhan cabut yang terjadi memiliki pola hubungan tegangan-perpindahan yang bersifat getas (*brittle*) seperti dicontohkan pada Gambar 9. Pola getas yaitu pola dengan nilai puncak yang jelas. Nilai puncak atau nilai maksimum inilah yang digunakan untuk menentukan tahanan cabut pada Gambar 10.

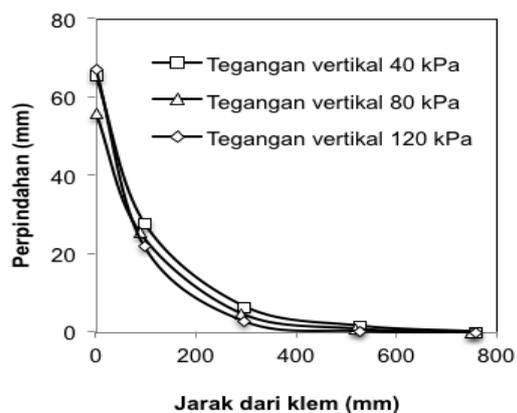
Dari Gambar 10, dapat disimpulkan bahwa tahanan cabut semakin besar dengan meningkatnya tegangan vertikal. Akan tetapi, geometri geogrid juga berpengaruh terhadap besarnya tahanan cabut. Hal ini terlihat pada benda uji GG4, walaupun tegangan vertikal meningkat tetapi nilai tahanan cabut relatif konstan. Penyebabnya karena spasi *rib* dan ukuran bukaan GG4 sangat besar. Hasil ini konsisten dengan Irsyam dan Hryciw (1991)

serta Mohiuddin (2003) yang telah meneliti hubungan antara jarak *rib* dengan tahanan cabut.



Gambar 10. Hubungan tahanan cabut maksimum dan tegangan vertikal

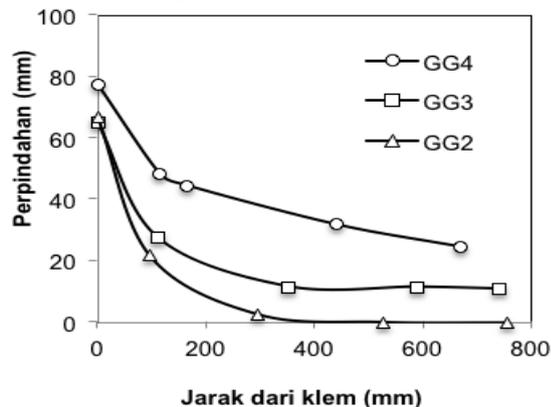
Ketika dibebani gaya cabut, geogrid memberikan respon regangan yang tidak seragam akibat sifatnya yang mulur (*extensible*). Hal ini ditandai oleh perbedaan perpindahan di setiap titik *LVDT* pada benda uji geogrid (Gambar 11). Gambar tersebut memperlihatkan data pembacaan perpindahan klem penjepit dan data perpindahan dari empat *LVDT* di beberapa posisi pada benda uji GG3.



Gambar 11. Respon regangan geogrid yang tidak seragam (GG3, beban vertikal 40 kPa)

Gambar 12 memperlihatkan perbandingan respon regangan geogrid. Terlihat bahwa geogrid GG4 dengan kekakuan yang lebih tinggi memberikan respon regangan yang relatif lebih merata di sepanjang geogrid dibanding GG2 dan

GG3. Kekakuan geogrid GG4 pada regangan 2% = 2830kN/m, GG3 = 720 kN/m dan GG2 = 1990 kN/m (lihat Tabel 3). Pada gambar tersebut juga terlihat gaya cabut maksimum GG4 dan GG3 termobilisasi ketika seluruh bagian geogrid mengalami perpindahan, sedangkan pada GG2 hanya sekitar 50% dari panjang geogrid mengalami perpindahan.



Gambar 12. Perbandingan respon regangan geogrid (tegangan vertikal 120 kPa)

Hasil analisis metode elemen hingga uji cabut laboratorium

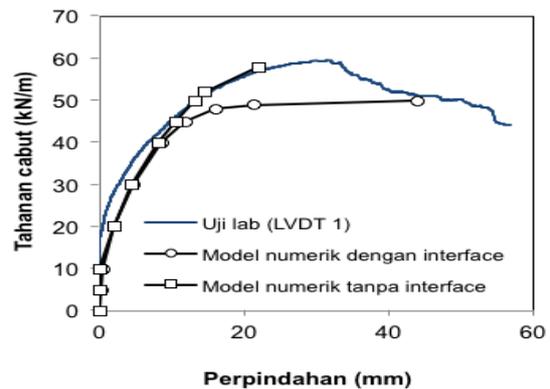
Parameter tanah yang digunakan adalah parameter *Hardening-Soil* pada Tabel 1 yang telah divalidasi oleh Pertiwi dan Taufik (2013). Material *dummy* untuk daerah bukaan diperlihatkan dimodelkan sebagai material *linier elastic* dengan kekakuan yang sangat kecil (modulus elastisitas, $E=0,10$ kN/m²; dan rasio *poisson*, $\nu = 0,01$).

Parameter kekakuan elemen geogrid (EA) ditentukan dari Gambar 8. Kekakuan dihitung dengan menggunakan persamaan $J = T/(\Delta L/L_0)$ (Becker dkk 2013) dengan J adalah kekakuan dan T adalah kuat tarik geogrid. Untuk GG3, dengan kuat tarik maksimum sebesar 131 kN/m² dan elongasi pada kuat tarik maksimum sebesar 12,1% diperoleh EA sebesar 1082 kN/m.

Untuk elemen antar muka (*interface*), digunakan faktor reduksi kuat geser (R_{inter}) yang merupakan perbandingan antara kohesi *interface* (c_i) dengan kohesi tanah (c) dan sudut geser *interface* (ϕ_i) dengan sudut geser tanah (ϕ). R_{inter} untuk timbunan dengan kadar air optimum (W_{opt}), digunakan sebesar 0,7 sesuai dengan hasil kajian Moelyani dan Taufik (2012).

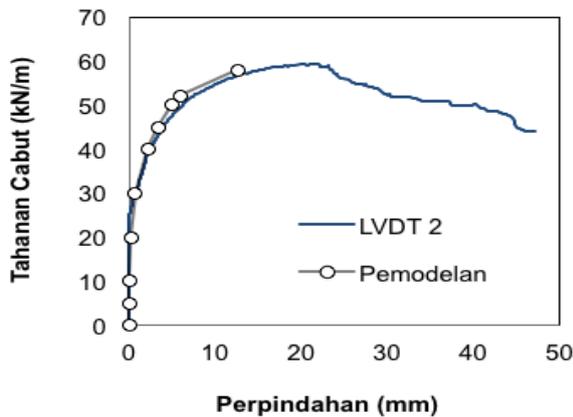
Verifikasi hasil pemodelan elemen hingga dilakukan dengan membandingkan respon perpindahan geogrid dengan gaya cabut dengan hasil uji laboratorium. Perpindahan geogrid diperoleh dari bacaan instrumen pengukur perpindahan LVDT 1 sampai dengan LVDT 4 sedangkan gaya cabut diukur dengan sel beban pada alat uji cabut.

Gambar 13 memperlihatkan perbandingan antara hasil pengujian laboratorium dan hasil pemodelan elemen hingga dengan dan tanpa elemen *interface* pada geogrid. Terlihat pada gambar tersebut bahwa model tanpa elemen *interface* lebih mendekati hasil pengujian laboratorium dibandingkan model dengan elemen *interface*. Model dengan elemen *interface* memberikan nilai kuat tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium karena model ini tidak dapat menggambarkan tahanan pasif dari *rib* melintang. Dengan menghilangkan elemen *interface*, kuat tarik dari hasil pemodelan elemen hingga menjadi lebih tinggi dari pada model dengan elemen *interface* dan menjadi kompensasi untuk kontribusi tahanan pasif *rib* melintang geogrid.

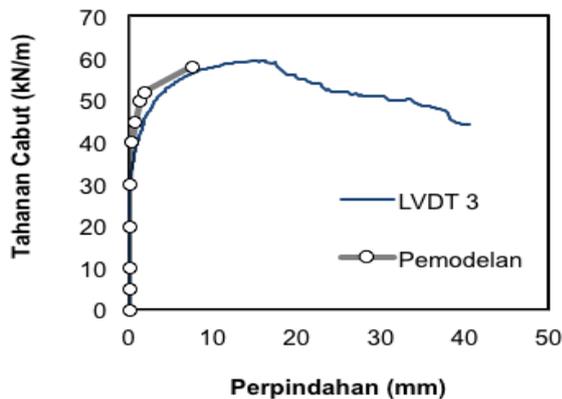


Gambar 13. Perbandingan tahanan cabut dan perpindahan pada LVDT 1

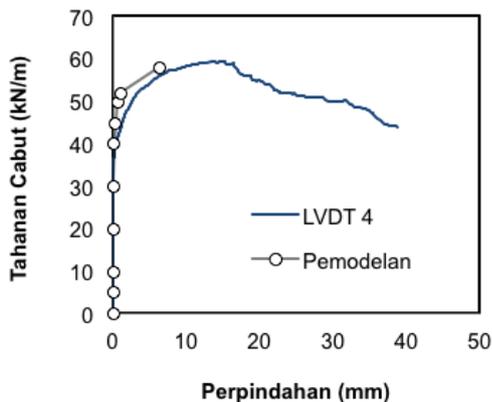
Gambar 14 sampai Gambar 16 memperlihatkan perbandingan antara hasil analisis dengan metode elemen hingga dan hasil pengujian laboratorium dari titik pengukuran lainnya (LVDT 2 sampai LVDT 4), sehingga disimpulkan bahwa model elemen hingga ini dianggap cukup dapat menggambarkan respon cabut di laboratorium.



Gambar 14. Perbandingan tahanan cabut dan perpindahan pada *LVDT 2*



Gambar 15. Perbandingan tahanan cabut dan perpindahan pada *LVDT 3*

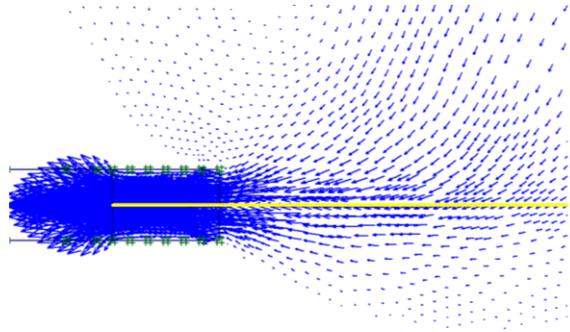


Gambar 16. Perbandingan tahanan cabut dan perpindahan pada *LVDT 4*

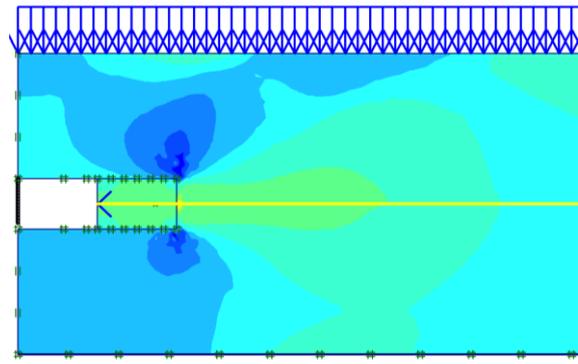
PEMBAHASAN

Aplikasi gaya tarik menyebabkan timbulnya perpindahan pada geogrid dan tanah

di sekelilingnya. Gambar 17 memperlihatkan contoh vektor perpindahan setelah pemberian gaya tarik sebesar 20 kN/m dan tegangan vertikal (σ_v) sebesar 40 kPa. Pada Gambar 18 diperlihatkan kontur konsentrasi tegangan horizontal setelah pemberian gaya tarik sebesar 20 kN/m, dan $\sigma_v = 40$ kPa, terlihat bahwa konsentrasi tegangan terjadi pada bagian klem alat uji cabut.

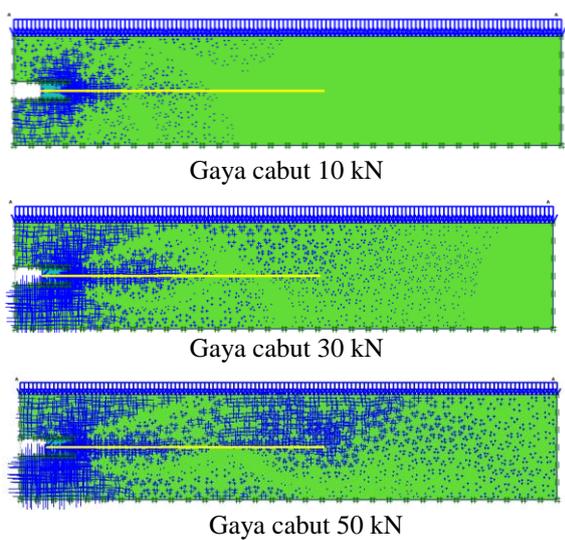


Gambar 17. Vektor perpindahan setelah pemberian gaya tarik 20 kN/m dan $\sigma_v = 40$ kPa



Gambar 18. Kontur tegangan horizontal setelah pemberian gaya tarik 20 kN/m dan $\sigma_v = 40$ kPa

Akibat permeabilitas tanah merah yang rendah dikarenakan kandungan butir halus yang tinggi (96%), menjadikan tegangan air pori eksis timbul ketika geogrid menerima gaya cabut. Perkembangan tegangan air pori eksis tersebut diperlihatkan pada Gambar 19. Terlihat bahwa tegangan air pori eksis mula-mula terjadi pada daerah bukaan kemudian dengan bertambahnya beban cabut pada geogrid, tegangan air pori eksis berkembang hingga ke bagian ujung geogrid.

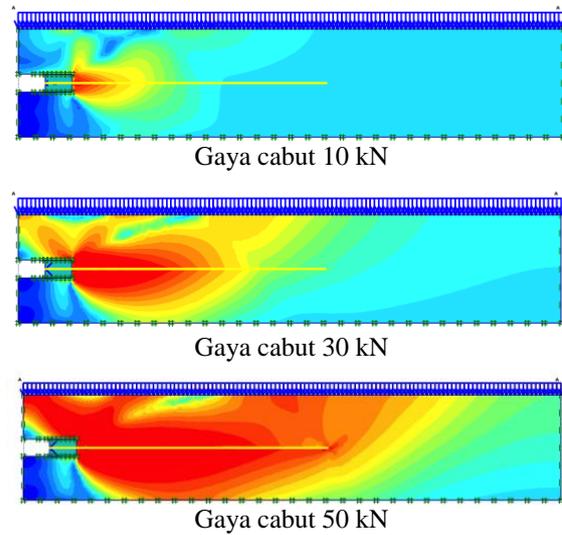


Keterangan: + tegangan air pori

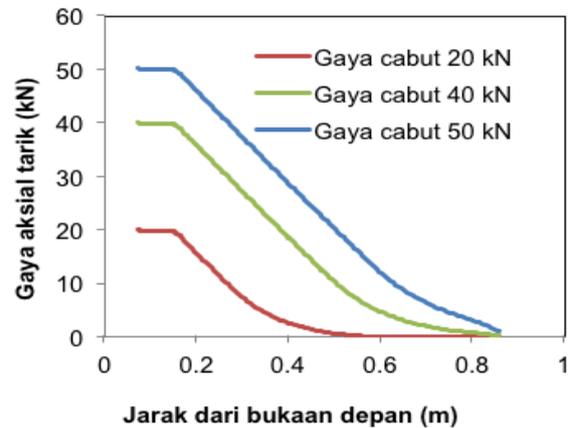
Gambar 19. Perkembangan tegangan air pori ekses

Timbulnya tegangan air pori ekses tersebut menyebabkan pola keruntuhan yang sama dengan perkembangan tekanan air pori ekses (lihat Gambar 20). Gambar tersebut memperlihatkan distribusi tegangan efektif dalam bentuk tegangan geser relatif yang terjadi akibat geogrid diberi gaya cabut. Tegangan geser relatif memberikan indikasi dekatnya titik tegangan (*stress points*) pada selubung keruntuhan (*failure envelope*). Dengan semakin meningkatnya tegangan air pori ekses, keruntuhan yang terjadi semakin merata di sepanjang geogrid.

Dari hasil pemodelan elemen hingga dapat disimpulkan bahwa akibat sifat geogrid yang dapat memanjang (*extensible*), respon geogrid ketika menerima beban cabut tidak seragam seperti diperlihatkan pada Gambar 21. Gambar tersebut memperlihatkan distribusi gaya aksial tarik di sepanjang geogrid yang diberi gaya cabut sebesar 20 kN, 40 kN dan 50 kN. Terlihat bahwa tegangan aksial tarik pada geogrid pada bagian depan sama besarnya dengan gaya yang diberikan, akan tetapi tegangan aksial tarik semakin mengecil pada bagian belakang geogrid. Perilaku transfer beban dari model elemen hingga ini konsisten dengan hasil pengujian cabut di laboratorium pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 20. Tegangan geser relatif pada uji cabut



Gambar 21. Distribusi gaya aksial tarik di sepanjang geogrid

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Karena sifat geogrid yang dapat memanjang (*extensible*), respon geogrid ketika menerima beban cabut tidak seragam. Dari hasil analisis dengan metode elemen hingga, diketahui tegangan aksial tarik pada geogrid pada bagian depan (yang dekat dengan gaya cabut) termobilisasi terlebih dahulu dibandingkan dengan bagian belakang geogrid.
2. Tahanan cabut geogrid tidak hanya dipengaruhi oleh kekakuan geogrid dan ketebalan rib melintang, tetapi juga oleh konfigurasi geometri geogrid. Hal ini

disebabkan tahanan cabut juga dipengaruhi oleh persentase luas bukaan dan jarak antar *rib* melintang.

3. Dari hasil analisis dengan metode elemen hingga diketahui bahwa akibat permeabilitas tanah merah yang kedap air, tegangan air pori ekses timbul ketika geogrid mengalami gaya cabut. Teridentifikasi bahwa tegangan air pori ekses mula-mula terjadi pada daerah bukaan kemudian dengan semakin meningkatnya beban cabut, tegangan air pori ekses berkembang hingga ke bagian ujung geogrid.

Saran

1. Karena sifat kandungan butir halus mempunyai nilai permeabilitas yang kecil, maka sistem drainase perlu didesain dengan benar untuk mengatasi potensi timbulnya tegangan air pori.
2. Selain parameter kekakuan geogrid, disarankan parameter luas bukaan dan spasi *rib* melintang juga dipertimbangkan dalam pemilihan jenis geogrid.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway Transportation Officials Standard. 2010. *AASHTO LRFD Bridge Design Specification*, 5th Edition. Washington, DC: AASHTO.
- American Society for Testing and Material. 2007. "Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil". ASTM D6706-01 (Reapproved 1997). *Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.13*. West Conshohocken: ASTM International.
- _____. 2007. "Standard Test Method for determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method". ASTM D6637-11. *Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.13*. West Conshohocken: ASTM International.
- Becker, L.D.B., Sayao, A.S.F.J., and Nunes, A.L.L.S. 2013. "Numerical Simulation of Pullout Tests in Residual Clayey Silt". *Proceedings of Geosynthetic 2013 Conference, Geosynthetics for Water and Energy Challenges*. Long Beach: the Industrial Fabrics Association International, 347-354.
- Brinkgreve, R.B.J. 2002. *Plaxis 2D – Version 8*. The Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- 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: HATTI.
- Federal Highway Administration. 2009. *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I*. FHWA. Publication No. FHWA-NHI-10-024, FHWA GEC 011 – Volume I. Washington, DC: FHWA
- Indonesia. Departemen Pekerjaan Umum. Direktorat Jenderal Bina Marga. 2009. *Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- _____. 2002. *Tata Cara Klasifikasi Tanah dan Campuran Tanah dan Agregat untuk Konstruksi Jalan*. SNI-03-6797-2002. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- _____. 2010. *Spesifikasi Umum Bina Marga Edisi 2010 – Revisi 2*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- International Standard Organization. 2008. *Geosynthetics – Wide Width Tensile Test*. ISO 10319. Switzerland: ISO.
- Irsyam, M. dan Hryciw, R.D. 1991. "Friction and Passive Resistance in Soil Reinforced by Plane Ribbed Construction". *Geotechnique* 41, No. 4: 485-498.
- Moelyani, Dian Asri, dan Taufik, Rakhman. 2012. *Bahan Kohesif untuk Timbunan dengan Perkuatan Geosintetik*. Bandung: Penerbit Informatika.
- Mohiuddin, Ather. 2003. Analysis of Laboratory and Field Pull-out Tests of Geosynthetics in Clayey Soils. M.Sc. Thesis, Louisiana State University.
- Palmeira, Ennio M. 2009. *Soil-Geosynthetic Interaction: Modelling and Analysis*. Geotextiles and Geomembranes 27: 368-390.
- Pertiwi, Dea dan Taufik, Rakhman. 2013. "Prediksi Kinerja Konstruksi Timbunan Tinggi dari Tanah Merah dengan Pemodelan Numerik". *Kolokium Jalan dan Jembatan 2013*. Puslitbang Jalan dan Jembatan: Bandung.
- Prakoso, W.A dan Ilyas, T. 2013. "Modeling of Lab Pullout Tests of Polyester Straps. Advances in Geotechnical Infrastructure". *Proceeding of the 18th Southeast Asian Geotechnical Conference Cum Inaugural AGSSEA Conference*. Singapore: Research Publishing.

Teixeira, S.H.C, Bueno, B.S, Zornberg, J.G. 2007. "Pullout Resistance of Individual Longitudinal and Transverse Geogrid Ribs". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 133, No. 1, January 1, 2007:37-50.

Wesley, Laurence D. 2010. *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. New Jersey: John Wiley & Sons.