

ANALISIS PERBAIKAN DEFORMASI TANAH PERTAMBANGAN KALIMANTAN TIMUR DENGAN METODE *RIGID INCLUSION*

Josef Evan Javianto¹, Giovanni Pranata², dan Ali Iskandar³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
joses.325180125@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
giovannip@ft.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
ali.iskandar1999@gmail.com

Masuk: 26-01-2022, revisi: 10-02-2022, diterima untuk diterbitkan: 22-02-2022

ABSTRACT

East Kalimantan is one of the coal producing regions in Indonesia. However, there is a common problem in mining development in east Kalimantan that the form of soft soil layers in most mining areas makes the soil structure unstable so that if the soil is burdened it will damage the soil and surrounding structures. Therefore, it is necessary to select methods of soil repair (both nationally and internationally) that are in accordance with field conditions so that the land can be used for various mining development purposes. One method of soil repair that can be relied upon by various developed countries is the rigid inclusion method. The advantage of this method is that the workmanship can be done quickly, can withstand large loads with cheap materials, and has low workmanship costs. In addition to using rigid inclusion, there are alternative soil improvements based on the SNI 8460:2017 method, namely deep mixing. Based on the results of observations, rigid inclusion without the use of geogrids is able to reduce deformation in the radial pad area by 84,15%, rigid inclusion without using geogrids is able to reduce deformation in the radial pad area by 84,16%, while deep cement mixing by 87,04%.

Keywords: East Kalimantan, rigid inclusion, geogrid, soil improvement, SNI 8460:2017 Method

ABSTRAK

Kalimantan Timur merupakan salah satu daerah penghasil batubara di Indonesia. Tetapi, terdapat masalah umum pada pembangunan pertambangan di daerah Kalimantan Timur berupa adanya lapisan tanah lunak pada sebagian besar daerah pertambangan yang membuat struktur tanah menjadi tidak stabil sehingga bila tanah dibebani akan merusak tanah dan struktur sekitar. Oleh karena itu, dibutuhkan pemilihan metode perbaikan tanah (baik dari nasional maupun internasional) yang sesuai dengan kondisi lapangan agar tanah dapat digunakan untuk berbagai keperluan pembangunan pertambangan. Salah satu metode perbaikan tanah dapat diandalkan oleh berbagai negara maju adalah metode *rigid inclusion*. Kelebihan dari metode ini adalah pengerjaannya dapat dilakukan dengan cepat, dapat menahan beban yang besar dengan material yang murah, dan memiliki biaya pengerjaan yang murah. Selain menggunakan *rigid inclusion*, terdapat alternatif perbaikan tanah berdasarkan metode SNI 8460:2017 yaitu *deep mixing*. Berdasarkan hasil pengamatan, *rigid inclusion* tanpa menggunakan *geogrid* mampu mengurangi deformasi pada daerah *radial pad* sebesar 84,15%, *rigid inclusion* tanpa menggunakan *geogrid* mampu mengurangi deformasi pada daerah *radial pad* sebesar 84,16%, sedangkan *deep cement mixing* sebesar 87,04%.

Kata kunci: Kalimantan Timur, *rigid inclusion*, *geogrid*, perbaikan tanah, Metode SNI 8460:2017

1. PENDAHULUAN

Kalimantan Timur selain memiliki daerah yang luas, juga memiliki potensi sumber daya alam yang sangat melimpah. Tetapi, sumber daya alam tersebut belum dimanfaatkan secara optimal sehingga diperlukan pembangunan yang berkesinambungan. Potensi dari Provinsi Kalimantan sangat menjanjikan untuk meningkatkan devisa utama negara, khususnya pada sektor pertambangan dan kehutanan. (Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur, 2017).

Kalimantan Timur telah ditetapkan sebagai daerah ibukota baru maka, memerlukan pembangunan ekonomi yang kuat untuk menunjang peralihan kekuasaan ibukota. Salah satu komoditas utama ekonomi Kalimantan Timur berada pada

sektor pertambangan, sehingga dibutuhkan pembangunan sarana, prasarana untuk menunjang pembangunan struktur pertambangan yang aman, cepat, dan berkesinambungan. Di Kalimantan Timur, terdapat daerah pertambangan yang berada dekat dengan sungai besar. Karena lokasi pertambangan yang berada di pinggir sungai, maka dilakukan perbaikan tanah dengan membuat saluran drainase untuk mengatasi kenaikan muka air tanah.

Namun, terdapat permasalahan pada tanah yang tempat penggalian batubara sehingga menyebabkan kerusakan struktur sekitar. Masing-masing struktur tersebut mengalami masalah, masalah yang terjadi seperti lepasnya baut-baut pada struktur terowongan, adanya pergerakan tanah yang menyebabkan timbunan batubara di atasnya menjadi tidak stabil dan mengalami lendutan, kerusakan pada jalur *radial pad*, munculnya rembesan air dari dalam tanah, dan lain sebagainya. Sehingga, diperlukan perbaikan tanah untuk mengatasi hal tersebut. Salah satu struktur yang penting untuk diperbaiki terlebih dahulu adalah timbunan batubara, dikarenakan dikhawatirkan penurunan yang terjadi pada timbunan akan mengganggu struktur sekitar dan struktur timbunan juga tidak diberikan perbaikan tanah atau struktur penopang. Untuk metode perbaikan tanah di Indonesia sudah diatur dalam SNI 8460:2017, namun apakah ada metode internasional yang menjadi pilihan alternatif untuk mengatasi hal tersebut selain menggunakan metode SNI 8460:2017.

Berdasarkan latar belakang, maka tulisan ini akan membahas mengenai perbaikan tanah yang dilakukan untuk mengatasi masalah yang terjadi pada timbunan batubara di pertambangan Kalimantan Timur. Perbaikan tanah yang dipilih menggunakan metode internasional yaitu, metode *rigid inclusion*. Penggunaan *rigid inclusion* ini belum umum digunakan pada banyak konstruksi di Indonesia dan memiliki kelebihan dapat digunakan pada tanah yang sangat lunak dengan pengerjaan yang terbilang cepat dan murah. Sedangkan, untuk metode perbaikan tanah dengan metode SNI 8460:2017 dipilih berdasarkan grafik kriteria perbaikan tanah yang sesuai dengan ukuran distribusi tanah.

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan maka masalah-masalah yang harus diselesaikan yaitu apakah penyebab kerusakan struktur pada daerah pertambangan Kalimantan Timur dan apakah *rigid inclusion* cukup efektif digunakan dalam studi kasus ini.

Adapun tujuan dari penelitian ini, untuk mengetahui penyebab kerusakan struktur pada daerah pertambangan Kalimantan Timur dan untuk mengetahui efektifitas *rigid inclusion* dalam studi kasus ini.

Kondisi topografi

Wilayah Provinsi Kalimantan Timur didominasi oleh topografi bergelombang, mulai dari kemiringan landai hingga curam, dengan ketinggian dari permukaan laut berkisar antara 0-1.500 meter, dengan kemiringan antara 0-60%, di mana lebih separuhnya dengan kelas kemiringan lebih dari 40%. Wilayah Provinsi Kalimantan Timur dibedakan menjadi daerah dataran rendah, daerah perbukitan, dan daerah pegunungan. Daerah dataran rendah dapat dijumpai di kawasan sepanjang sungai serta wilayah pantai. Daerah perbukitan dan pegunungan memiliki ketinggian rata-rata lebih dari 1000 meter di atas permukaan laut, dengan kisaran antara 47-2.467 meter dengan kemiringan 30% dan terdapat bagian Barat Laut berbatasan langsung dengan wilayah Malaysia. (Bappeda Kalimantan Timur, 2019).

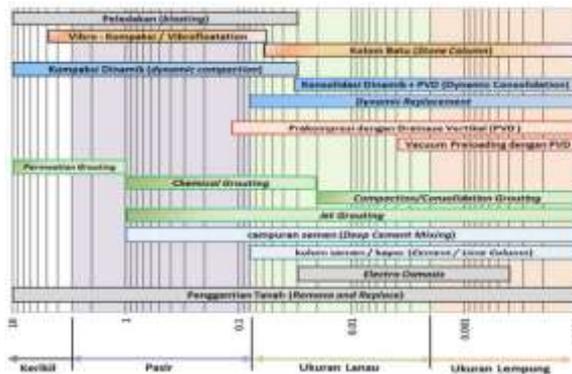
Kondisi geologi

Jenis tanah di wilayah daratan Provinsi Kalimantan Timur didominasi oleh tanah podsolik merah kuning latosol dan litosol yang tersebar di bagian Tengah dan Utara Provinsi Kalimantan Timur. Jenis tanah lainnya adalah aluvial, organosol, latosol, podsol dan podsolik merah kuning dengan tingkat kesuburan yang rendah. (Bappeda Kalimantan Timur, 2019).

Metode perbaikan tanah SNI 8460:2017

Metode perbaikan tanah berdasarkan SNI 8460:2017 merupakan metode perbaikan tanah yang telah ditetapkan secara sah di Indonesia. Terdapat beberapa metode umum yang digunakan antara lain: *grouting*, *deep mixing*, pemadatan dalam, teknik prakompresi dengan *prefabricated vertical drain* (PVD), dan metode ruang hampa.

Masing-masing metode tersebut digolongkan berdasarkan sistem warna dan sistem distribusi ukuran butiran tanah. Sistem warna yang sama pada grafik perbaikan tanah menunjukkan adanya hubungan metode perbaikan tersebut dengan metode perbaikan lainnya dalam hal pengerjaan perbaikan tanah di lapangan. Sistem distribusi ukuran butiran tanah pada grafik perbaikan tanah menunjukkan pilihan-pilihan perbaikan tanah yang bisa dilakukan pada tanah di lokasi berdasarkan ukuran butiran tanahnya. Dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Jenis-jenis metode perbaikan tanah (Sumber : SNI 8460:2017)

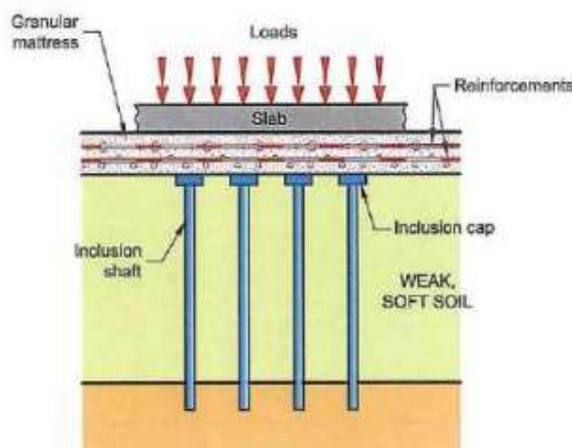
Metode *rigid inclusion*

Pada tahun 2005 di Perancis, diluncurkan proyek ASIRI sebagai program penelitian dan pengembangan, di mana perilaku sistem fondasi *rigid inclusion* dipelajari dengan pengukuran lapangan dan simulasi numerik. Sehingga, panduan perhitungan *rigid inclusion* tercipta. (Lödör & Móczár, 2020).

Perbaikan tanah dengan sistem *rigid inclusion* dapat digunakan untuk seluruh jenis tanah. Sistem ini terbukti efektif dalam mengatasi kasus tanah dengan kemampuan *bearing capacity* yang rendah seperti: tanah lempung, tanah lumpur, dan tanah gambut. Sistem ini dapat menyebarkan beban struktur di mana intensitas beban menyebar di area yang luas serta dapat digunakan pada struktur yang sensitif terhadap perbedaan penurunan sebagai contoh: bangunan-bangunan industri dan agrikultur, tangki-tangki (air, minyak, dan bahan kimia), fondasi timbunan, dan fondasi *heavy-duty hall floor*. (Lödör & Móczár, 2020).

Mekanisme *rigid inclusion* dibagi menjadi beberapa interaksi yaitu: interaksi antara struktur dan *load transfer platform*, interaksi antara *transfer platform* dan blok tanah yang diperkuat (terdiri dari tanah lunak dan *rigid inclusion*), interaksi antarmuka antara tanah lunak dan inklusi (*negative friction* lalu menjadi *positive friction* sepanjang kedalaman), dan interaksi antara ujung inklusi dengan tanah yang menahan beban. (ASIRI, 2011).

Komponen dalam *rigid inclusion* dibagi menjadi 2 komponen utama yaitu: *load transfer platform* (LTP) atau lapisan granular dan tiang/kolom dapat dilihat pada Gambar 2. Untuk perkuatan pada LTP merupakan pilihan, sehingga tidak selalu lapisan LTP diberikan perkuatan.

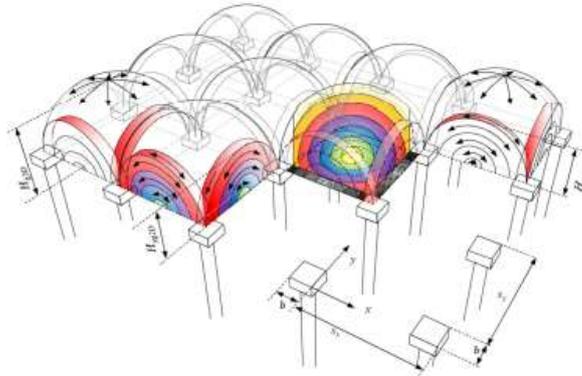


Gambar 2 Komponen *rigid inclusion* (Sumber: ASIRI:2011)

Kolom-kolom pada sistem *rigid inclusion* bukan merupakan elemen struktural, yang artinya terdapat perbedaan konsep dengan fondasi tiang rakit.

LTP berfungsi untuk menyalurkan beban struktural menuju kepala inklusi dan menuju tanah antara kolom-kolom *rigid inclusion*. LTP untuk kasus timbunan harus memiliki tebal yang cocok dan dipadatkan dengan baik, sehingga dalam lapisan LTP terjadi *arching effect* seperti pada Gambar 3. Dengan tercapainya efek ini maka memberikan elemen perkuatan kemampuan menahan beban yang lebih besar dibandingkan rasio permukaannya. Sehingga, lapisan

tanah yang lebih kaku akan menerima penurunan yang lebih rendah, sekaligus bagian signifikan dari beban pengaku dipindahkan menuju lapisan penahan beban. (Lödör & Móczár, 2020).



Gambar 3 *Arching effect* pada bagian LTP Van Eekelen *et al* 2013 (Sumber: Pham:2018)

LTP terdiri dari bahan granular atau bahan yang diperlakukan dengan pengikat hidrolik. Karakteristik lapisan ini dapat ditentukan dari kekuatan bahan-bahan pembuatnya dan kombinasi jarak antar tiang. LTP juga dapat diperkuat dengan geosintetik. Proyek nasional ASIRI mendirikan parameter-parameter dari deformasi dan geser untuk beberapa material yang representatif (kerikil industri, kapur dan semen dengan lanau). (Dupla *et al*, 2007; Okyay *et al*, 2010). (ASIRI, 2011).

Pada kasus *rigid inclusion* digunakan tiang khusus untuk menopang sistem *rigid inclusion*. Tiang tersebut adalah tiang CFG (*Cement Flyash Gravel*), tiang ini terbuat dari kombinasi semen, abu terbang, dan kerikil-kerikil. Tiang ini merupakan tiang yang murah, cepat, dan cukup kaku untuk menerima beban aksial. Kelebihan dari tiang ini adalah tidak diperlukan tulangan untuk menopang struktur di atasnya, tetapi sebagai gantinya diperlukan lapisan matras/lapisan granular untuk mendistribusikan tegangan dan meningkatkan kapasitasnya.

Pada tiang *rigid inclusion* digunakan tiang CFG dengan aturan berdasarkan (Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2002). Untuk perhitungan daya dukung tiang secara total untuk CFG dapat digunakan rumus-
rumus berikut:

$$f_{spk} = m(Ra/Ap) + \beta(1 - m)f_{sk} \quad (1)$$

Dengan

$$Ra = Up \sum_{i=1}^n q_{si} \cdot li + qp \cdot Ap \quad (2)$$

$$m = \frac{d^2}{de^2} \quad (3)$$

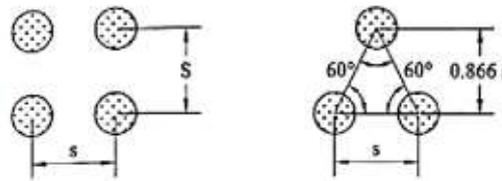
Dengan: f_{spk} = Kapasitas daya dukung dari fondasi komposit (kN), m = Area pergantian (%), Ra = Daya dukung vertikal pada 1 tiang (kN), Ap = Luas tiang (m^2), β = Koefisien reduksi dari kapasitas daya dukung antara tanah dengan tiang-tiang, f_{sk} = Kapasitas daya dukung dari fondasi komposit yang telah ditingkatkan (bisa diambil dari fondasi natural) (kN), Up = Keliling tiang (m), n = Jumlah lapisan tanah dalam sepanjang tiang, li = Tebal lapisan tanah (m), q_{si}, qp = Ketahanan lateral dari lapisan tanah ke n dan ketahanan ujung tiang (kPa), d = Diameter tiang (m), de = Spasi tiang (m).

Untuk desain kekuatan tiang digunakan pembatasan sebagai berikut:

$$f_{cu} \geq 3 \frac{Ra}{Ap} \quad (4)$$

Dengan: f_{cu} = Nilai kekuatan tekan rata-rata dari contoh blok material (kubus 150 mm) setelah 28 hari perawatan (kPa).

Berdasarkan (Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2002) ukuran umum tiang CFG berkisar antara 0,3 m hingga 0,6 m dan spasi tiang berjarak 3 hingga 5 kali diameter tiang. Dengan pola persebaran tiang yang umumnya dipakai berupa pola persegi dan segitiga seperti pada Gambar 4.



Gambar 4 Pola persebaran tiang persegi dan tiang (Gunnvard, 2016)

2. METODE PENELITIAN

Metode pengumpulan data

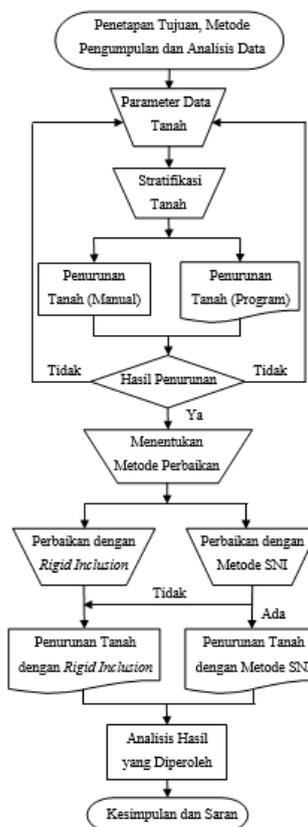
Untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan, dilakukan pengumpulan data yang berasal dari data primer. Data primer berupa hasil data tanah *bore log*, data laboratorium, data sondir, dan gambar kerja proyek. Data ini akan diolah agar didapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan dan untuk pemodelan pada program elemen hingga.

Metode analisis data

Untuk analisis data digunakan bantuan program *Microsoft Excel*, *AutoCAD*, dan program elemen hingga. *Microsoft Excel* digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung secara manual, untuk menghitung penurunan timbunan secara manual, dan mengolah hasil data yang diperoleh dari program elemen hingga. *AutoCAD* digunakan untuk menggambar hasil desain yang ditetapkan berdasarkan hasil perhitungan dan percobaan dari *Microsoft Excel* dan program elemen hingga untuk memperjelas visualisasi desain. Program elemen hingga digunakan untuk melakukan pemodelan dan perhitungan kompleks dari bentuk model yang diamati dan juga untuk melakukan “*trial and error*” pada ketebalan LTP sehingga dapat dihasilkan *arching effect* dengan tebal yang optimal.

Diagram alir

Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 5, sebagai berikut:



Gambar 5 Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil parameter untuk pemodelan

Adapun parameter-parameter pemodelan yang digunakan pada program elemen hingga untuk memodelkan tanah dan propertinya dapat dilihat pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 1 Parameter tanah *soft soil model (effective shear strength)*

Parameter	Jenis Tanah		
	<i>Very Soft Clay (0-12 m)</i>	<i>Soft Clay (12-16 m)</i>	<i>Medium-Hard Clay (16-21 m)</i>
γ_{wet} (kN/m ³)	16,7	17,5	18,2
γ_{sat} (kN/m ³)	17,2	18	19,5
λ^*	0,103073	0,07971	0,081087
κ^*	0,022489	0,021739	0,031739
ϕ' (°)	29	31	25
c' (kPa)	2,3	2,8	21
ψ (°)	0	1	0
OCR	1,8	1,5	5
e_0	1,32	1,4	1
OCR	1,8	1,5	5

Tabel 2 Parameter tanah *Mohr-Coulomb model (drained)*

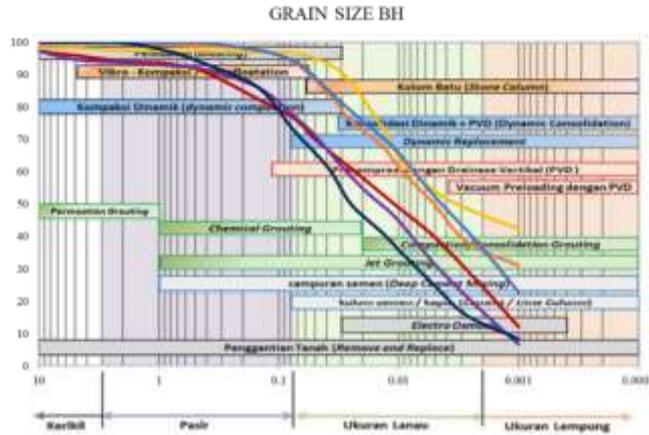
Parameter	Jenis Tanah		Lain-lainnya
	<i>Medium-Very Dense Sand (21-23 m)</i>	<i>Coal Embankment</i>	<i>Load Transfer Platform</i>
γ_{wet} (kN/m ³)	19	8,22235	19
γ_{sat} (kN/m ³)	21,6	8,22235	19
E' (MPa)	39	8	35
ν'	0,2	0,3	0,3
ϕ' (°)	35	40	35
c' (kPa)	-	1	1
ψ (°)	5	10	5
e_0	0,52	0,5	0,5

Tabel 3 Parameter tanah *Mohr-Coulomb model (undrained)*

Parameter	Parameter <i>deep cement mixing (0-12 m)</i>		
	<i>Deep Cement Mixing 1</i>	<i>Deep Cement Mixing 2</i>	<i>Deep Cement Mixing 3</i>
γ_{wet} (kN/m ³)	15,76019	16,2701	15,59679
γ_{sat} (kN/m ³)	15,76019	16,2701	15,59679
E' (MPa)	24,47146	17,22153	26,79471
ν'	0,26	0,26	0,26
Su (kPa)	98,18948	70,14468	107,1764
e_0	0,5	0,5	0,5

Hasil pengecekan metode SNI 8460:2017

Berdasarkan hasil pengecekan grafik distribusi ukuran butir tanah seperti pada Gambar 6 dan dengan pertimbangan kondisi lokasi, dipilih metode perbaikan *deep mixing*. *Deep mixing* yang dipilih menggunakan campuran *cement* sehingga disebut juga *deep cement mixing* (DCM).



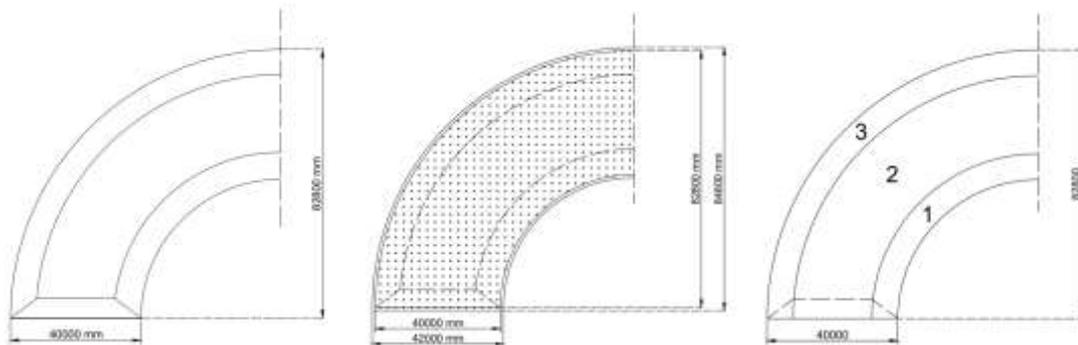
Gambar 6 Grain size BH 1 kedalaman 10 m (merah), BH 1 kedalaman 15 m (jingga), BH 2 kedalaman 10 m (ungu), BH 2 kedalaman 15 m (biru tua), BH 3 kedalaman 10 m (biru muda), BH 3 kedalaman 15 m (kuning)

Hasil desain dan pemodelan

Desain asli dari timbunan batubara berupa timbunan berbentuk setengah lingkaran, karena posisi timbunan batubara simetris sehingga hanya dimodelkan setengah bagiannya. Untuk dimensi pemodelan dapat dilihat pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9. Untuk pemodelan pada aplikasi dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 7 Dimensi timbunan batubara



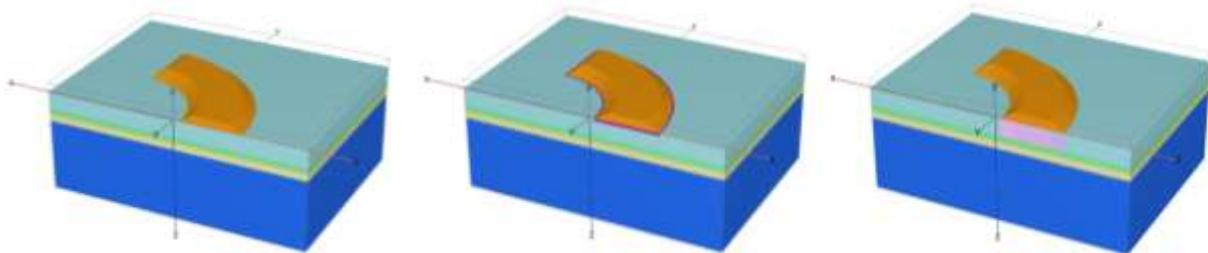
Gambar 8 Dimensi pemodelan timbunan batubara (kiri), dimensi timbunan batubara dengan rigid inclusion (tanpa/dengan geogrid) (tengah), timbunan batubara dengan zona deep mixing (kanan)



Gambar 9 Pembagian pengerjaan zona DCM tiap 3 derajat dan dimensi DCM

Untuk desain *rigid inclusion* akan digunakan dicoba desain LTP dengan *geogrid* dan tanpa *geogrid*. Berdasarkan hasil simulasi tebal LTP yang digunakan setebal 2000 mm. Untuk desain dengan *geogrid* lapisan *geogrid* diletakan 300 mm di atas lapisan tanah yang diperbaiki. LTP buat lebih panjang 1000 mm ke arah luar timbunan batubara sehingga dapat memuat lebih banyak tiang di bawah LTP. Untuk tiang *rigid inclusion* digunakan ukuran 500 mm dengan jarak antara titik tengah tiang sejauh 2500 mm dan kedalaman pengeboran sedalam 16 m sehingga panjang tiang aktual sepanjang 14 m, juga digunakan mutu beton tiang $f_c' 30$ MPa. *Geogrid* yang digunakan dalam desain kekuatan tarik 20 kN/m dengan regangan maksimum 13%. Total tiang yang dimodelkan sejumlah 642 buah sehingga pada konstruksi nyata akan dilipat gandakan menjadi 1284 tiang.

Desain DCM digunakan untuk perbaikan tanah yang sedalam 12 m dengan penggantian tanah dibagi menjadi 3 bagian: bagian dalam ($A_p = 65,44585\%$), bagian tengah ($A_p = 42,26833\%$), dan bagian luar ($A_p = 72,8731\%$). Dengan komposisi material pengganti sesuai dengan kriteria yang telah disebutkan pada sub bab sebelumnya dan kombinasi pola tipe dinding dan pola tipe *grid*. Pola DCM dibuat tiap 3 derajat dari titik tengah radius.



Gambar 10 Model timbunan batubara (kiri), model timbunan batubara dengan *rigid inclusion* tanpa/dengan *geogrid* (tengah), model timbunan batubara *deep mixing* (kanan)

Hasil analisis deformasi secara keseluruhan model

Berdasarkan hasil perhitungan dengan bantuan program elemen hingga, diperoleh hasil deformasi aksial maupun lateral pada daerah tanah sekitar pada pemodelan timbunan batubara, timbunan batubara dengan *rigid inclusion* tanpa *geogrid*, timbunan batubara dengan *rigid inclusion* dengan *geogrid*, dan timbunan batubara dengan DCM. Hasil dari deformasi maksimum pada seluruh area model dapat dilihat pada Tabel 4.

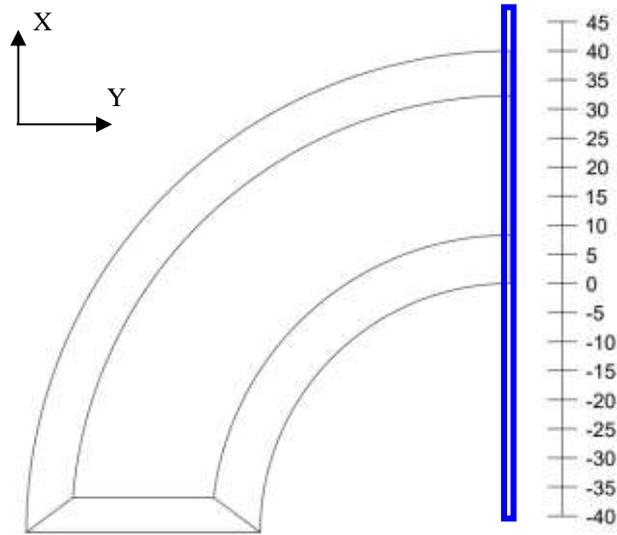
Tabel 4 Hasil deformasi maksimum dari seluruh bagian model

Pemodelan	$ u (m)$	U_{xmin} (m)	U_{xmax} (m)	U_{ymin} (m)	U_{ymax} (m)	U_{zmin} (m)	U_{zmax} (m)
Timbunan	0,6866	-0,1408	0,1201	-0,1245	0,09365	-0,6863	0,00022
RI (NG)	0,2182	-0,1722	0,1824	-0,08259	0,07225	-0,1217	0,05681
RI (G)	0,1278	-0,02689	0,02398	-0,02367	0,02337	-0,1265	0,00071
DCM	0,08794	0,01	0,01099	-0,01194	0,0003354	-0,08792	0,00034

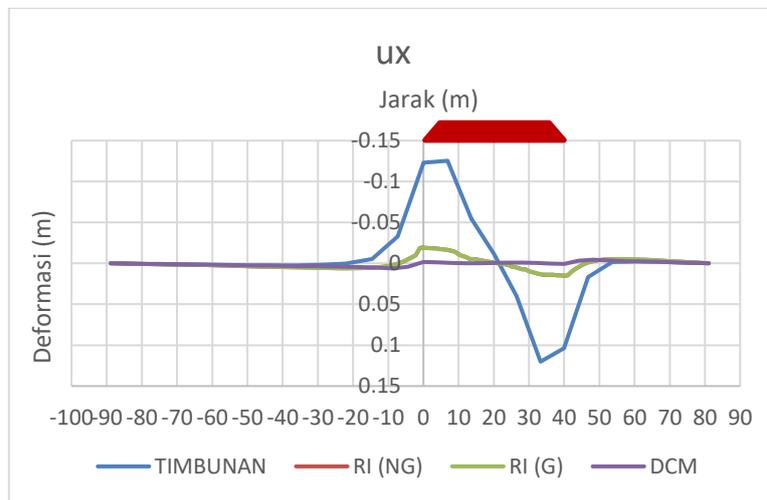
Keterangan: Timbunan = Timbunan batubara tanpa perbaikan, RI (NG) = Timbunan batubara dengan *rigid inclusion* tanpa *geogrid*, RI (G) = Timbunan batubara dengan *rigid inclusion* dengan *geogrid*, DCM = Timbunan batubara dengan *deep cement mixing*

Hasil analisis deformasi pada potongan

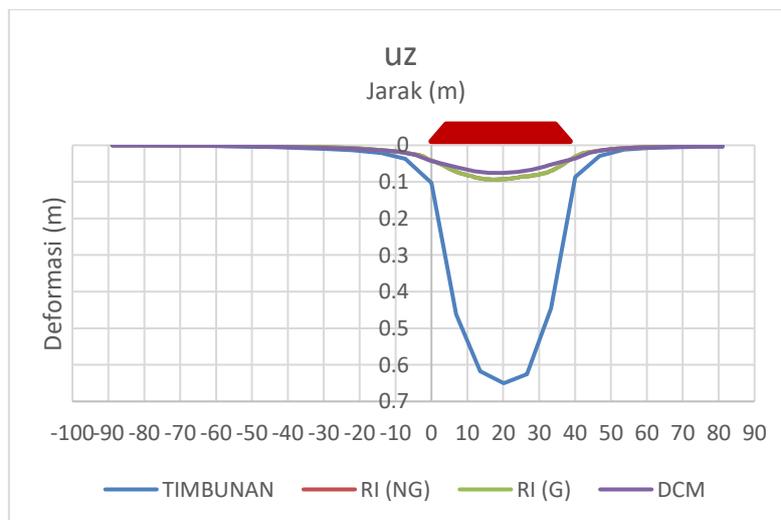
Untuk memudahkan pengecekan deformasi maksimum dan untuk mengecek keseragaman penurunan yang terjadi dipilih 1 potongan lokasi yang dianggap paling mewakili. Lokasi untuk seksi yang ditinjau dipilih berdasarkan pada daerah yang dianggap akan menerima deformasi yang besar yang menyebabkan rusaknya struktur bangunan pada daerah sekitarnya seperti struktur *radial pad*, berdasarkan hasil pemodelan, lokasi potongan tanah dipilih pada bagian pada Gambar 11. Pada deformasi lateral potongan yang ditinjau hanya ditinjau arah x karena arah desakan timbunan tegak lurus terhadap sumbu y sehingga inersia terbesar terjadi pada arah sumbu x, akibatnya deformasi timbunan yang ditinjau berdasarkan lokasi potongan hanya yang arah x dan arah z. Hasil deformasi dapat dilihat pada Gambar 12 hingga Gambar 13.



Gambar 11 Lokasi potongan



Gambar 12 Deformasi arah x pada sepanjang potongan

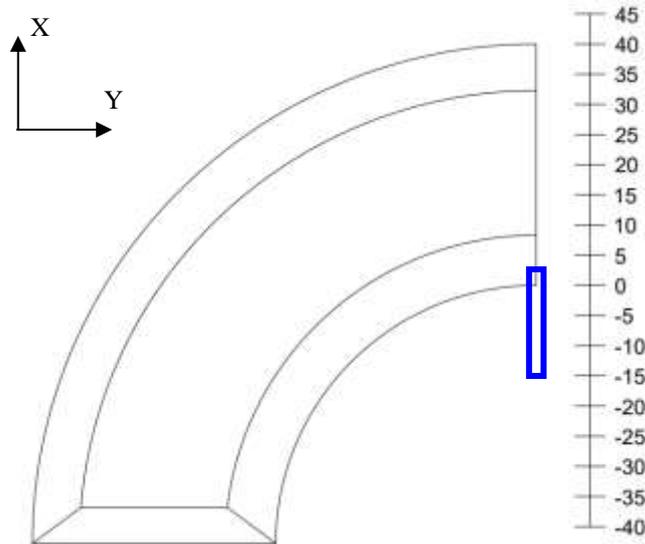


Gambar 13 Deformasi arah z pada sepanjang potongan

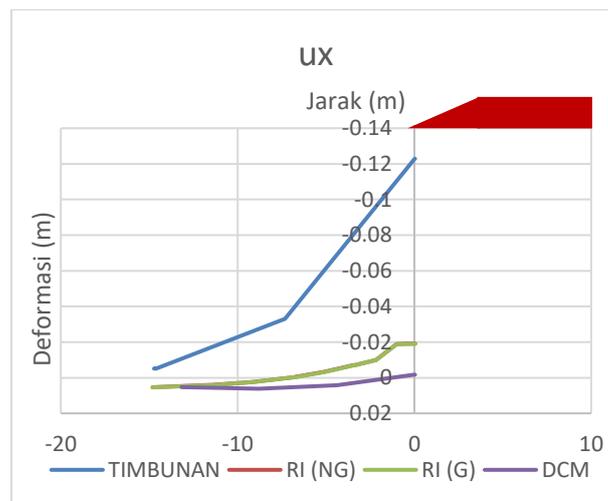
Pada jarak 0 hingga 40 m merupakan jarak penimbunan dimana dapat dilihat deformasi yang semakin besar di jarak 20 m (titik tengah timbunan). Pada deformasi akibat beban timbunan batubara tanpa perbaikan dapat dilihat deformasi total maksimal dapat mencapai lebih dari 0,6 m. Dimana didominasi oleh deformasi arah z dan deformasi lateral. Pada perbaikan dengan *rigid inclusion* tanpa *geogrid* pada deformasi keseluruhan model masih menerima efek desakan lateral tetapi deformasi arah znya sudah berkurang, sementara pada perbaikan *rigid inclusion* dengan *geogrid* dan perbaikan dengan DCM deformasi lateral dan deformasi aksial sudah berkurang banyak. Pada potongan tinjau hasil deformasi arah x dan z pada perbaikan timbunan batubara dengan *rigid inclusion* tanpa *geogrid* maupun dengan *geogrid* memberikan hasil yang menyerupai, pada DCM memberikan hasil yang lebih baik.

Hasil analisis deformasi pada potongan *radial pad*

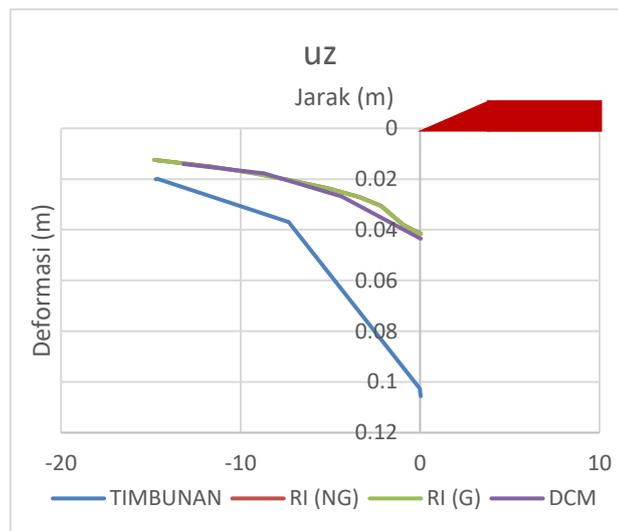
Radial pad merupakan salah satu bagian yang paling dekat dengan lokasi timbunan, selain berdekatan lokasi ini juga tidak bisa terlalu jauh dari lokasi timbunan karena sistem pengangkutan batubara dari *radial stacker* akan langsung membawa batubara menuju lokasi timbunan sehingga dengan keberadaannya yang saling terkait diperlukan pengecekan terhadap lokasi *radial pad* ini. Pengecekan deformasi pada area *radial pad* berdasarkan potongan yang dibuat dilakukan dari titik 0 hingga titik -15 m dapat dilihat pada Gambar 14 (daerah *radial pad* pada gambar kerja). Untuk deformasi yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 15 hingga Gambar 16.



Gambar 14 Lokasi pengecekan daerah *radial pad*



Gambar 15 Deformasi arah x pada potongan area *radial pad*



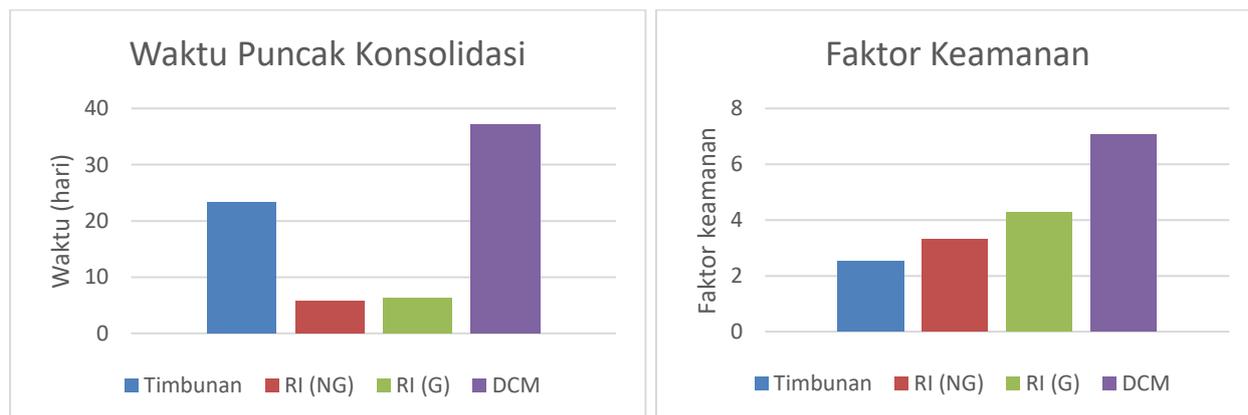
Gambar 16 Deformasi arah z pada potongan area radial pad

Berdasarkan hasil deformasi pada daerah radial pad, deformasi yang diakibatkan timbunan batubara menyebabkan beban tambahan pada radial pad, dapat dilihat dari deformasi total antara 0,02 m hingga 0,16 m deformasi ini dominan disebabkan pergerakan tanah ke arah x dan ke arah z. Hasil perbaikan rigid inclusion tanpa geogrid (RI (NG)) cenderung menghasilkan hasil yang sama dengan rigid inclusion dengan geogrid (RI (G)). Hasil perbaikan dengan deep mixing (DCM) cenderung menghasilkan deformasi yang paling kecil baik secara lateral maupun arah aksial tetapi tidak terlalu berbeda jauh dengan perbaikan menggunakan rigid inclusion baik tanpa geogrid (RI (NG)) maupun dengan geogrid (RI (G)).

Hasil waktu konsolidasi dan faktor keamanan

Untuk mengetahui berapa lama waktu yang dibutuhkan tanah setelah dibebani untuk mengeluarkan air porinya dan mencapai tegangan air pori minimum sehingga penurunan jangka panjang tergolong relatif aman, maka dilakukan pengecekan waktu konsolidasi.

Untuk memastikan bahwa tanah memenuhi kriteria kestabilan diperlukan parameter keamanan yaitu faktor keamanan. Untuk analisis faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan program elemen hingga 2D, untuk memberikan harga faktor keamanan yang lebih kecil dan lebih aman.



Gambar 17 Hasil waktu puncak konsolidasi dan faktor keamanan

Keterangan: Timbunan = Timbunan batubara tanpa perbaikan, RI (NG) = Timbunan batubara dengan rigid inclusion tanpa geogrid, RI (G) = Timbunan batubara dengan rigid inclusion dengan geogrid, DCM = Timbunan batubara dengan deep cement mixing

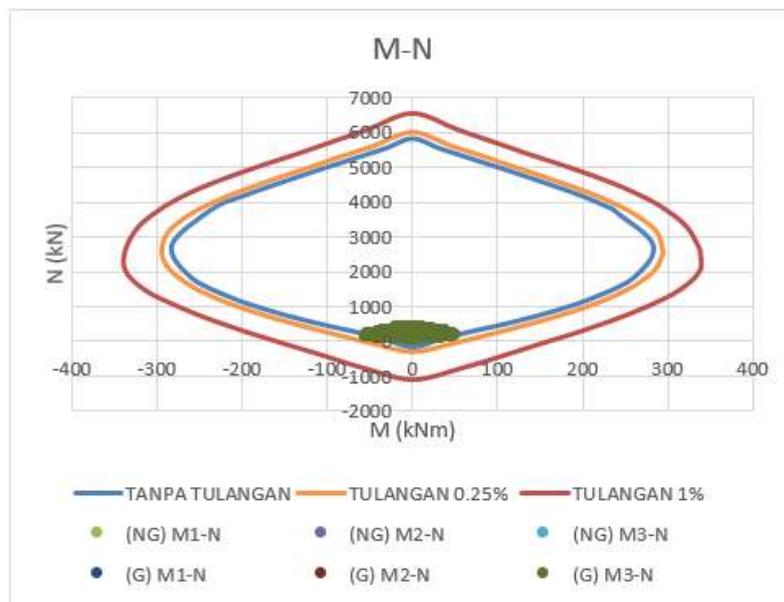
Berdasarkan hasil pengamatan, dapat dilihat pada Gambar 17 bahwa waktu konsolidasi paling lama berada pada deep mixing (DCM) sementara, yang paling cepat pada rigid inclusion tanpa geogrid (RI (NG)). Untuk nilai faktor

keamanan *deep mixing* (DCM) memberikan performa keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan *rigid inclusion* (RI (NG)) / (RI (G)).

Hasil analisis tiang-tiang *rigid inclusion*

Berbeda dengan kolom beton, tiang CFG umumnya didesain tanpa tulangan. Karena CFG berupa tiang yang kaku. Namun karena model tiang CFG cukup sulit untuk dimodelkan sehingga tiang CFG diasumsikan sebagai tiang beton dengan tulangan minimum 1% (15D13) (SNI 2847:2019). Kemudian tiang CFG juga dicoba di tulangan 0,25% (4D13) untuk membuat tiang kaku tetapi dengan tulang paling sedikit. Sehingga berdasarkan hasil pemodelan tiang CFG cukup mampu menahan momen yang ada, hasil dapat dilihat pada Gambar 18. Dimana, M1 menandakan momen torsi, M2 menandakan momen arah x, M3 menandakan momen arah y.

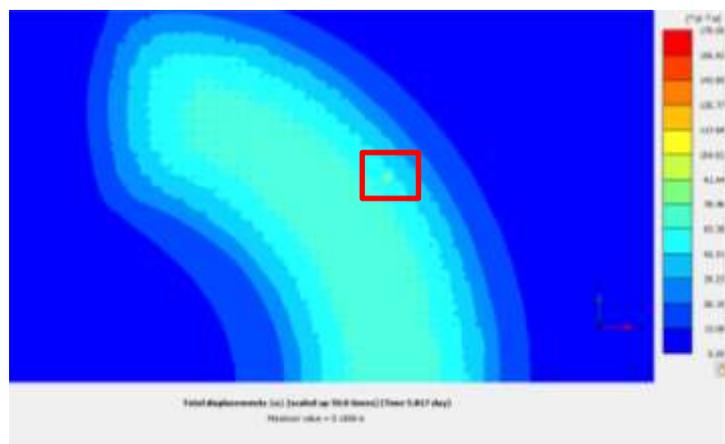
Berdasarkan hasil desain nilai f_c' yang diperlukan dan f_c' desain telah memenuhi kriteria untuk menahan beban aksial sehingga desain ukuran tiang dan desain kekuatan sudah dapat digunakan.



Gambar 18. Hasil diagram interaksi tiang *rigid inclusion*

Hasil pengecekan *geogrid*

Untuk mengetahui apakah desain *rigid inclusion* memerlukan *geogrid* atau tidak dilakukan pengecekan keseragaman deformasi tanah. Berdasarkan hasil peninjauan potongan pada kedalaman 2,5 m dari permukaan tanah (dapat dilihat Gambar 19), terdapat area yang tidak rata pada *rigid inclusion* tanpa *geogrid* sementara pada *rigid inclusion* dengan *geogrid* cenderung lebih rata. Sehingga untuk keamanan digunakan *geogrid* pada desain *rigid inclusion* ini.



Gambar 19 Potongan *rigid inclusion* tanpa *geogrid* pada kedalaman -2,5 m

Berdasarkan pemodelan pada *rigid inclusion* dengan *geogrid*, *geogrid* perlu dicek kapasitasnya terhadap beban yang terjadi. Hasil dari pengecekan *geogrid* dapat dilihat pada Tabel 5 sebagai berikut:

Tabel 5 Hasil perhitungan *geogrid* dari program elemen hingga

Parameter	<i>Geogrid</i>
$ u (m)$	0,09237
Uxmin (m)	-0,0248
Uxmax (m)	0,02217
Uymin (m)	-0,02187
Uymax (m)	0,02206
Uzmin (m)	-0,09228
Uzmax (m)	-0,01159
N1 min (kN/m)	-0,3326
N1 max (kN/m)	1,196
N2 min (kN/m)	-0,2557
N2 max (kN/m)	1,529
Q12 min (kN/m)	-0,5132
Q12 max (kN/m)	0,5592

Keterangan: (1) arah z, (2) arah x

Berdasarkan hasil yang ada, nilai N1, N2, dan Q12 dari *geogrid* tidak ada yang melebihi batas kekuatan tarik desain *geogrid* yaitu 20 kN/m, sehingga *geogrid* dapat dikatakan sangat mencukupi kriteria desain.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pemodelan, penyebab dari kerusakan struktur sekitar, disebabkan daya dukung tanah tidak dapat mendukung beban batubara yang direncanakan, hal ini dikarenakan tanah pada kedalaman 0-16 m didominasi tanah lunak sehingga tanah mengalami deformasi aksial maksimum yang dapat mencapai 0,6863 m dan deformasi lateral maksimum arah x sebesar 0,1408 m serta arah y sebesar 0,1245 m. Hal ini mungkin menjadi penyebab pergeseran pada struktur sekitar.
2. Berdasarkan hasil pengamatan, *rigid inclusion* tanpa menggunakan *geogrid* mampu mengurangi deformasi pada daerah *radial pad* sebesar 84,15%, *rigid inclusion* tanpa menggunakan *geogrid* mampu mengurangi deformasi pada daerah *radial pad* sebesar 84,16%, sedangkan *deep cement mixing* sebesar 87,04%.

Saran

1. Melakukan analisis pemodelan dengan program elemen hingga dengan jumlah nodal dan elemen yang lebih banyak sehingga hasil menjadi lebih akurat.
2. Memiliki spesifikasi komputer yang memiliki RAM yang besar dan memori yang luas, serta memiliki prosesor yang mampu menjalankan program grafis dengan sangat baik.
3. Perhitungan faktor keamanan seharusnya dilakukan secara 3D.
4. Memodelkan daerah sekitar timbunan dengan lebih presisi. Seperti memodelkan bangunan dan fondasi sekitar, memodelkan terowongan, memodelkan *radial stacker*, dan lain sebagainya untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.
5. Jika memilih perbaikan dengan *rigid inclusion*, harus memastikan ketersediaan alat dan bahan untuk melakukan perbaikan tanah dengan metode ini. Hal ini dikarenakan metode ini tidak terdapat dalam SNI 8460:2017 sehingga mungkin akan sedikit sulit untuk menemukan alat-alatnya, selain itu alat dan bahan yang diperlukan harus mudah ditemukan dekat dengan lokasi proyek agar membuat biaya menjadi lebih murah. Mempertimbangkan pola segitiga untuk desain jangka lebih panjang, pola segitiga memiliki daya dukung dan

memberikan *arching effect* yang lebih baik dibandingkan pola persegi, tetapi lebih mahal karena pola ini akan membutuhkan lebih banyak tiang dibandingkan pola persegi.

6. Jika memilih perbaikan dengan *deep mixing*, harus memastikan tanah yang diperbaiki cocok dengan kriteria organik dan kriteria keasaman tanah. Karena pada data primer tidak terdapat kadar organik maupun keasaman tanah, diasumsikan kadar organik dan keasaman telah memenuhi persyaratan sehingga diperlukan peninjauan kembali terhadap metode ini. Memodelkan secara lebih spesifik pada model *deep mixing*, dikarenakan keterbatasan waktu pemodelan dilakukan secara konservatif sehingga diperlukan pemodelan yang lebih akurat untuk mendapatkan efek yang mendekati kenyataan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASIRI. (2011). *Recommendation for the Design, Construction and Control of Rigid Inclusion Ground Improvements*. Perancis: IREX.
- Bappeda Kalimantan Timur. (2019, Oktober 1). Diambil kembali dari RADGRK KALTIM 2010-2030: <https://bappeda.kaltimprov.go.id/storage/file/Yuv1h5m4gqYWUcx2.pdf>
- Gunnvard, P. (2016). *Evaluation of the Efficiency of the Standardized Norrland Method*. Luleå : Luleå University of Technology Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering Division of Mining and Geotechnical Engineering.
- Lódör, K., & Móczár, B. (2020). Design and Modelling Process of Soil Improvement with Concrete Strengthening Elements. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(1), 287-295.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. (2002). *Technical Code for Ground Treatment of Buildings JGJ 79-2002*. Beijing: China Academy of Building Research.
- Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur. (2017). Diambil kembali dari Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur Berani Untuk Kaltim Berdaulat: <https://kaltimprov.go.id/halaman/kondisi-wilayah>
- SNI 2847:2019. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.