

ANALISIS KEGAGALAN PERBAIKAN TANAH GAMBUT/ ORGANIK MENGGUNAKAN METODE *RIGID INCLUSION* DI NAGARI KASANG, KECAMATAN BATANG ANAI, PADANG PARIAMAN

N. Dhiya Almassyah¹, Andriani^{2*}, Abdul Hakam³

^{1,2,3} Program Studi S2 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas
Jl. Limau Manis, Kec. Pauh, Kota Padang, 25175

Email: nayungdhiya25@gmail.com¹, andriani@eng.unand.ac.id, Ahakam@eng.unand.ac.id

*Corresponding author, email : andriani@eng.unand.ac.id

ABSTRAK

Tanah gambut merupakan jenis tanah yang memiliki sifat fisik dan kimia yang unik, sehingga memerlukan perbaikan khusus untuk meningkatkan stabilitas dan kekuatannya. Rigid inclusion dapat menjadi salah satu alternatif untuk memperbaiki tanah gambut. Pelaksanaan rigid inclusion ini harus memenuhi kriteria perencanaan yang telah ditentukan, salah satunya adalah tercapainya efek arching yang efektif sehingga sistem perbaikan tanah dapat bekerja sesuai dengan fungsinya. Konstruksi awal yang telah dilaksanakan pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Padang – Sicincin STA 4+400 – 4+600 tepatnya pada Nagari Kasang, Kecamatan Batang Anai, Padang Pariaman mengalami kegagalan akibat tidak tercapainya efek arching ini, sehingga diperlukan analisis lebih lanjut. Analisis ini dilakukan pada data dan parameter konstruksi awal berupa parameter tanah, mutu material, dan rencana kerja yang digunakan. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa kegagalan konstruksi sebelumnya disebabkan oleh ketidak sesuaian parameter tanah yang digunakan dengan kondisi asli lapangan, mutu material yang tidak mencukupi, dan rencana kerja yang kurang tepat. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah menghitung tingkat keberhasilan hasil evaluasi ini dengan melakukan implementasi lapangan menggunakan instrumentasi geoteknik yang mendukung.

Kata Kunci : Tanah Gambut, *Rigid Inclusion*, Efek Arching, Instrumentasi Geoteknik

ABSTRACT

Peat soil is a type of soil that has unique physical and chemical properties, so it requires special repairs to increase its stability and strength. Rigid inclusion can be one of the alternatives to improve peat soil. The implementation of rigid inclusion must meet predetermined planning criteria, one of which is the achievement of an effective arching effect so that the soil improvement system can work according to its function. The initial construction that has been carried out on the Padang - Sicincin Toll Road Development Project STA 4+400 - 4+600 precisely in Nagari Kasang, Batang Anai District, Padang Pariaman has failed due to not achieving this arching effect, so further analysis is needed. This analysis was carried out on the initial construction data and parameters in the form of soil parameters, material quality, and work plans used. The results of the analysis showed that the previous construction failure was caused by the incompatibility of the soil parameters used with the original field conditions, insufficient material quality, and inappropriate work plans. The recommendation for future research is to calculate the success rate of these evaluation results by conducting field implementation using supporting geotechnical instrumentation.

Keywords: Peat soil, *Rigid Inclusion*, Arching Effect, Geotechnical Instrumentation

1. PENDAHULUAN

Jalan Tol Trans Sumatera merupakan proyek strategis nasional yang bertujuan meningkatkan konektivitas dan mendukung pertumbuhan ekonomi, khususnya di Pulau Sumatera yang menyumbang 22.21% PDB nasional

[1] . Salah satu ruasnya, yakni Pekanbaru–Padang seksi Padang–Sicincin sepanjang 36.6 km, melewati wilayah dengan kondisi tanah yang bervariasi, termasuk tanah lunak di Nagari Kasang, Kabupaten Padang Pariaman. Investigasi geoteknik mengidentifikasi keberadaan tanah organik dan pasir lanauan dengan karakteristik kompresibilitas tinggi.

Berdasarkan Peta Geologi Indonesia Lembar Padang, lokasi pelaksanaan tersebut terdiri dari tanah endapan permukaan berjenis Aluvium. Tanah Aluvium terdiri dari lanau, pasir, dan endapan rawa. Dimana tanah ini akan mengalami penurunan kekuatan jika diberi pembebanan secara terus menerus [2].

Hasil investigasi tanah langsung yang telah dilakukan, terdapat lapisan organic berbutir halus termasuk gambut sampai dengan kedalaman lebih dari 6 meter, dan lapisan pasir lanauan dengan konsistensi lepas ke konsistensi kaku yang bersifat lensa pada lapisan kedalaman 25 meter sampai dengan 36 meter. Dimana hal ini mengkonfirmasi tanah memiliki sifat lunak dengan komprebilitas tinggi dan tertunda. Didalam [3] juga menyatakan bahwa tanah gambut mempunyai sifat yang kurang meguntungkan dari segi teknik karena memiliki daya dukung yang rendah dan potensi penurunan yang besar, sehingga menyebabkan kerusakan pada konstruksi jalan.

Berdasarkan [4] , berbagai metode perbaikan tanah direkomendasikan untuk kondisi tersebut. Pada lokasi ini dipilih metode *rigid inclusion*, teknologi yang dikembangkan di Eropa dan dinilai efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah lunak tanpa mengubah massa tanah secara signifikan. Inklusi kaku (*Rigid Inclusions*) adalah teknologi perbaikan tanah yang digunakan untuk menopang struktur di atas tanah yang bersifat kompresibel [5]. metode ini terdiri dari elemen vertikal yang ramping dan dipasang dalam pola teratur, biasanya terbuat dari material berbasis semen [5]. *Rigid inclusion* menggabungkan keunggulan dari fondasi tiang dan fondasi dangkal secara ekonomis [6]. Metode ini hemat biaya, cepat untuk diterapkan, dan mampu menahan beban besar[7]. *Rigid inclusion* merupakan suatu perkuatan tanah lunak yang dikenal sebagai *piled embankment*, yang biasa diaplikasikan pada timbunan jalan, rel kereta, jembatan, dinding penahan tanah, turbin angin, tangki minyak, dan kawasan industri [8].

Mekanisme kerja perbaikan menggunakan metode *rigid inclusion* berupa sebagai media transfer beban melalui efek lengkung tanah (*soil arching*) dan gesekan antara inklusi dengan tanah lunak, sehingga secara signifikan mengurangi penurunan tanah [9]. Keberadaan *rigid inclusion* mendistribusikan beban serta menghasilkan penurunan yang seragam [6]. Efek *rigid inclusion* terhadap distribusi tegangan bisa sangat kompleks. Dalam beberapa konfigurasi, inklusi tersebut dapat mengurangi tegangan puncak di area tertentu namun meningkatkan tegangan di area lainnya[10]. Sedangkan lapisan *load transfer platform* (*LTP*) akan meningkatkan efektivitas dari *rigid inclusion* dengan mendistribusikan beban secara lebih merata [11]. *LTP* akan membantu mengurangi potensi

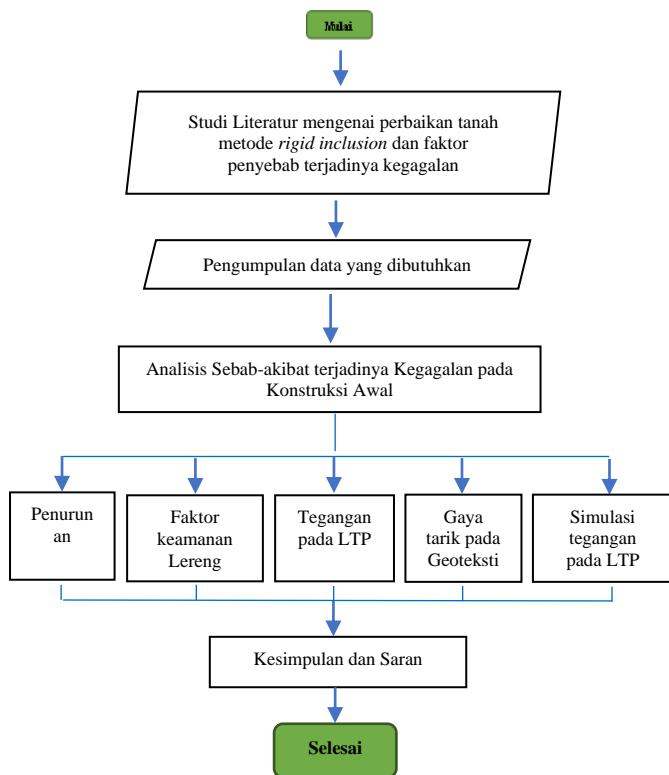
perbedaan penurunan antara titik-titik yang didukung oleh *rigid inclusion* dan tanah di sekitarnya[12]. Penambahan perkuatan menggunakan geosintetik pada *LTP* semakin meningkatkan efisiensi distribusi beban dan mengurangi penurunan tanah[9]. Fungsi utama *LTP* sebagai distributor beban secara merata dengan cara mendistribusikan beban vertikal dari jalan atau struktur di atasnya secara merata ke elemen *rigid inclusion* sehingga mengurangi tekanan langsung pada tanah lunak, dengan distribusi beban yang baik tersebut [13]. Perkuatan ini memberi tahanan terhadap gaya lateral melalui kapasitas tarik yang dimilikinya serta menahan tegangan saat proses konstruksi hingga arching terbentuk[14], [15], [16]. Dalam beberapa kasus, *rigid inclusion* dapat dimodelkan sebagai elemen kaku dalam media elastis, yang memungkinkan analisis distribusi tegangan serta penilaian terhadap potensi retak atau pelepasan ikatan pada sudut-sudut inklusi[17]. Penggunaan *rigid inclusion* dapat secara signifikan meningkatkan faktor penurunan, dengan peningkatan berkisar antara 2,88 hingga 58,10 [18]. Perbaikan tanah dengan metode ini tergolong teknologi baru diterapkan di Indonesia, dan telah diterapkan pada perbaikan tanah lempung lunak dengan metode *rigid inclusion-cement fly ash gravel* (CFG) dan geogrid pada pertambangan di Kalimantan Timur. Dimana perbaikan dilakukan pada timbunan bekas galian tambang, dan diperoleh bahwa perbaikan dengan metode tersebut dapat mengurangi deformasi pada daerah *radial pad* sebesar 84.15% [19]. Teknik ini semakin populer karena pelaksanaannya yang cepat, kapasitas daya dukung yang tinggi, dan efisiensi biaya [20].

Rigid inclusion juga dipilih sebagai perbaikan tanah pada Oprit Jembatan di atas tanah lunak pada jalan tol Pemalang Batang yang dilaksanakan oleh KSO Rekakarya-Menard. Dimana lokasi pekerjaan memiliki kedalaman tanah lunak besar dari 12 m dengan muka air tanah (MAT) pada kedalaman 1.94 m. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh penurunan timbunan selama 10 tahun hanya sebesar 8.11 cm dan faktor keamanan sebesar 1.656 [21].

Namun, setelah pelaksanaan awal perbaikan tanah menggunakan *rigid inclusion* pada Nagari Kasang Tol Padang-Sicincin, terjadi keruntuhan lereng timbunan dan kegagalan pada sistem *load transfer platform*, mengindikasikan potensi kegagalan perencanaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi penyebab kegagalan konstruksi dan merencanakan ulang bagian-bagian yang tidak memenuhi kriteria teknis berdasarkan hasil evaluasi tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Rancangan penelitian tesis ini disajikan pada Flowchart Tahapan Penelitian yang ditunjukan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan sebagai bahan analisis dan evaluasi nantinya. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT Hutama Karya Infrastruktur sebagai pihak penyedia jasa, dimana data tersebut meliputi sebagai berikut;

1. Lokasi penelitian yang akan dilakukan hanya pada STA 4+400 – 4+600
2. Data investigasi tanah berupa Borlog, dan pengujian laboratorium dengan parameter yang diperoleh berupa berat isi tanah, angka pori awal, indeks kompresi, indek rekompresi, rekompresi sekunder, kohesi efektif, sudut geser dalam, poisson ratio dan modulus elatisitas
3. Rencana awal konstruksi *rigid inclusion*; kolom dengan tanpa tulangan dengan kedalaman 15 m, jumlah dan letak titik kolom dengan tanpa tulangan dengan pola segi empat jarak pemasangan 1.6 m, dan dimensi tulangan baja yang digunakan

4. Beban yang bekerja ; timbunan dengan tinggi 6 m , jenis perkerasan yang digunakan merupakan *rigid pavement* dengan struktur perkerasan agregat kelas A setebal 15 cm, *lean concrete* setebal 10 cm, perkerasan beton 30 cm, dan besar lalu lintas

Analisis Sebab-Akibat Terjadinya Kegagalan

Kegagalan yang terjadi pada konstruksi awal akan dikaji dan dianalisis menggunakan *software PLAXIS2D*. Aspek-aspek yang akan ditinjau sebagai berikut;

1. Pembebanan yang telah diberikan di lapangan
2. Data investigasi dan parameter tanah yang digunakan pada rencana awal
3. Rencana awal *rigid inclusion* berupa ukuran diameter, jarak antar titik dan kedalaman kolom, mutu geosintetik, dan material LTP yang digunakan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Peristiwa Kegagalan Konstruksi

Kegagalan konstruksi timbunan ini telah terjadi sejauh 400 m yang berupa kelongsoran timbunan dominan di sebelah kanan badan jalan ditinjau dari STA kecil. Dokumentasi kelongsoran ini ditunjukkan oleh Gambar 2. Selanjutnya dilakukan observasi lapangan dan kajian lebih lanjut untuk mengetahui bentuk dan penyebab kelongsoran ini.



Gambar 2. Dokumentasi Keruntuhan Lereng STA 4+400 – 4+600

Hasil Observasi Lapangan

Setelah dilakukannya observasi lapangan, diketahui kelongsoran terjadi pada saat timbunan badan jalan telah mencapai ketinggian rencana. Hasil dari pengamatan lapangan, terlihat kelongsoran pada jalur sebelah kanan badan jalan, dan terlihat adanya *heaving/bulging* pada sisi kiri luar *Right of Way* (ROW) jalan tol. Selanjutnya dilakukan pengamatan lebih lanjut dengan membongkar timbunan. Berdasarkan hasil observasi lapangan yang telah dilakukan, kelongsoran ini diduga terjadi akibat, sebagai berikut:

1. Tidak tercapainya efek *arching* yang akan menghasilkan sistem transfer beban antara

lapisan LTP dengan kolom inklusi

Tabel 1. Parameter Awal Perencanaan

No.	Jenis Tanah	Elevasi		N-SPT	q_c	k (m/day)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	ϵ_u (kPa)	E_{50} (Mpa)	E_{sed} (Mpa)	E_{ur} (Mpa)
		Atas	Bawah										
1	FDC Column	0	-13			-	24	-	-	-	7	-	-
2	LTP Lapisan Pasir	1	0			8.64×10^{-1}	18	5	35	-	25	20	75
3	Timbunan Tanah	8	1			8.64×10^{-2}	17	5	30	50	25	25	125
Lapisan Tanah Eksisting													
1	Silt-1	0	-0.5	-	0.2	6.40×10^{-3}	16	2	32	15	3	2.4	15
2	Organic Silt-1	-0.5	-4	0	0.15	5.00×10^{-3}	16	1	18	11	1.5	1.2	7.5
3	Organic Silt-2	-4	-6.5	0	0.25	5.00×10^{-3}	16	2	18	18	2	1.6	10
4	Silt-2	-6.5	-9	2	0.15	5.00×10^{-3}	17	2	18	11	2.1	1.65	10.5
5	Silt-3	-9	-11	5	0.3	5.00×10^{-3}	17	2	21	22	5.5	4.4	27.5
6	Silty Sand-1	-11	-14	10	9	1.00×10^{-2}	17	2	33	-	15	12	75
7	Silty Sand-2	-14	-16	16	9	1.00×10^{-2}	17	2	35	-	22.5	18	112.5
8	Silty Sand-3	-16	-18	16	11	1.00×10^{-2}	17	2	35	-	27.5	22	137.5
9	Silt-4	-18	-19.5	-	2	5.00×10^{-3}	17	2	23	56	12.25	9.8	61.25
10	Silty Sand-2	-19.5	-22.5	22	11	1.00×10^{-2}	17	2	35	-	27.5	22	137.5
11	Silt-4	-22.5	-30	6	4	5.00×10^{-3}	17	2	23	48	12.25	9.8	61.25
12	Silty Sand-4	-30	-33	22	-	1.00×10^{-2}	17	2	35	-	26.4	21.12	132
13	Silty Sand-5	-33	-36	45	-	1.00×10^{-2}	17	2	40	-	54	43.2	270

2. Rendahnya elevasi top lapisan LTP dari elevasi muka air sawah/genangan yang ada di kaki timbunan sehingga mengindikasikan air tersebut masuk ke dalam konstruksi timbunan
3. Terjadinya *hydrocompaction* pada material timbunan akibat masuknya genangan air

Analisis Kegagalan

Analisis ini dilakukan berdasarkan data penyelidikan tanah, serta gambar kerja/*shop drawing* yang mengacu pada rencana awal pelaksanaan. Berdasarkan analisis ini akan diperoleh alasan dan besar kegagalan teknis yang terjadi.

Parameter yang digunakan pada awal perencanaan mengacu pada data tanah hasil penyelidikan *Borlog* dan *Standard Penetration Test* (SPT), serta laboratorium yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Berdasarkan uraian data tabel 1, dapat diperoleh bahwa tanah tersebut didominasi oleh jenis tanah organik yang bukan termasuk gambut sehingga input parameter yang digunakan adalah batas atas dari rata-rata hasil penetrasi tanah yang berdampak pada pemilihan indeks properties tanah dan tidak mempertimbangkan penurunan sekunder.

Sehingga hasil analisis kondisi tanah pada perencanaan awal lebih baik dari kondisi asli di lapangan. Setelah terjadinya kegagalan, maka dilakukan tinjauan parameter tanah ulang yang disesuaikan dengan kondisi asli lapangan yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Analisis Ulang secara Numerik

Analisis akan dilakukan pada potongan melintang STA 4+400 – 4+600, dengan tipikal potongan melintang ditunjukkan oleh Gambar 3. Berdasarkan tipikal ini diambil tinggi timbunan yang paling besar untuk mewakili beban timbunan yang bekerja dan berikut merupakan data teknis timbunan yang akan digunakan pada proses analisis:

Kedalaman kolom inklusi : 15 m

Tinggi timbunan tanah : 6 m

Tinggi matras : 1 m

Tinggi LTP : 1 m

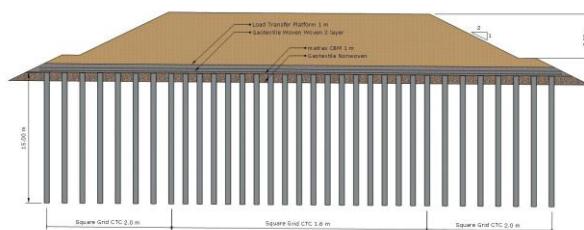
Spesifikasi geotekstil : 2 lapis

geotekstil woven 100 kN/m pada LTP secara transversal

Tebal Agregat Kelas A : 15 cm

Tebal Lean Concrete : 10 cm

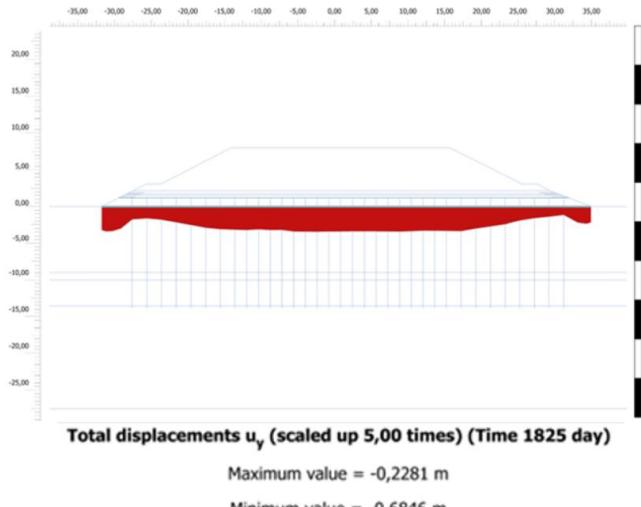
Tebal Perkerasan Beton : 30 cm



Gambar 3. Potongan Melintang Gambar Kerja/Shop Drawing Rencana Awal

Tabel 2. Parameter Tanah Hasil Evaluasi dengan Kondisi Lapangan

No	Jenis Tanah	Elevasi		Klasifikasi Tanah	Berat Isi Kering	Berat Isi Jenis	Angka Pori Inisial	Indeks Kompresi	Indeks Rekompreksi	Indeks Sekunder	Kohesi Efektif	Sudut Geser Dalam Efektif	Kohesi	Sudut Geser Dalam	Kekakuan saat energi 50%	Kekakuan	Poisson Rasio
		Atas	Bawah														
				USCS	γ_{unsat}	γ_{sat}	e_{init}	Cc	Cs	C α	c'_{ref}	ϕ'	c	ψ	E_{so}^{ref}	E'	v
A.	Tanah Timbunan Load Transfer Platform (Pasir Urug)	8.01	2.15			12.88	19.22							15	30	10000	0.35
B.		2.15	1.15			17.3	18.21							0.5	35	50000	0.3
C.	BH-03 STA 4+425																
1	Gambut/Tanah Organik	0	-9	3.5	OH	3.6	12	5.67	1.74	0.16	0.07	1.7	18.09				
2	Pasir Lanauan	-9	-10	5	SM	6.7	13.8							1	30.5	3.39	
3	Pasir Halus	-10	-13.55	9	SP	15	17							0.5	31.5	15000	0.3
4	Pasir Halus Lanau	-13.55	-27.55	18.43	SP	16	18							0.5	35	51000	0.3
5	dengan Pasir	-27.55	-30	7	ML	16	18	0.2	0.08	0.02		3.36	26.83				
6	Lanau	-30	-32	22	ML	19.5	21.5	0.2	0.08	0.02		10.56	35.98				
7	Pasiran	-32	-36	42		18	20							0.5	42.5	90000	0.3
D.	BH-04 STA 4+525																
1	Gambut/Tanah Organik Pasir	0	-11.55	1.8	OH	3	11.8	7.05	1.81	0.16	0.07	4.8	12.65				
2	dengan Lanau Lanau	-11.55	-25.55	16.86	SP-SM	16	18							1	34.5	2.91	
3	dengan Pasir Pasir	-25.55	-28	6.5	MH	7.7	14.2	1.86	0.93	0.05		3.12	26.4				
4	dengan Lanau	-28	-30	4	SP-SM	12	14.5							1	31.5	3.26	
5	Pasir	-30	-33.55	23		16	18							0.5	37.5	50000	0.3
6	Pasir	-33.55	-36	48.5		21	23							0.5	40.5	90000	0.3

**Gambar 4.** Penurunan Maksimum pada Konstruksi Awal

Hasil Analisis

Pemodelan dilakukan berdasarkan data teknis dan parameter diatas dengan fase pasca konstruksi selama 365 hari atau 1 tahun sesuai dengan lama pelaksanaan dilapangan. Selanjutnya hasil pemodelan yang telah dilakukan dibandingkan dengan kriteria perencanaan *rigid inclusion* yang telah disebutkan sebelumnya. Hasil perbandingan ini yang selanjutnya akan menentukan tingkat keberhasilan perencanaan.

1. Penurunan Maksimum

Hasil pemodelan perencanaan awal, diperoleh besar penurunan yang terjadi setelah 1 tahun masa operasional sebesar 0.69 m atau 690 mm ditunjukkan oleh Gambar 4. Penurunan ini melebihi batas maksimum yaitu kecil dari 20 mm atau 2 cm.

2. Faktor Keamanan Lereng Timbunan

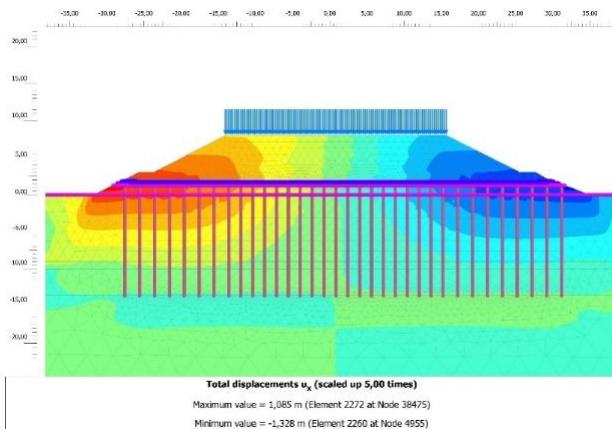
Hasil pemodelan perencanaan awal, diperoleh angka keamanan lereng yang dimiliki hanya sebesar 1.28 sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 5. Angka keamanan ini tidak memenuhi batas minimal yang ditentukan yaitu besar dari 1.5.

3. Tegangan pada LTP

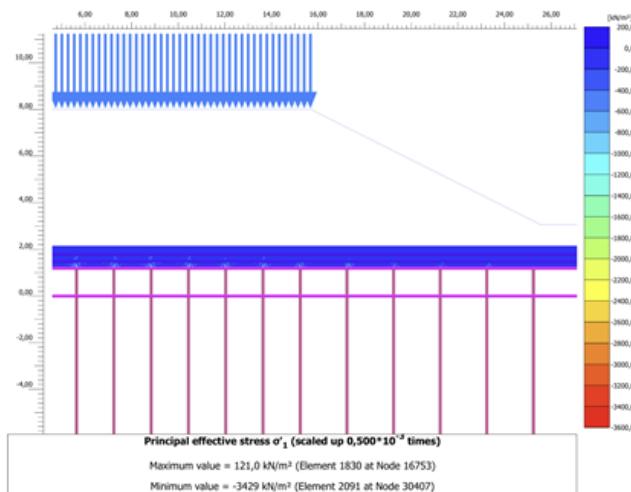
Tegangan yang terjadi pada LTP sebesar 121 kN/m² ditunjukkan dalam Gambar 6. Tegangan yang terjadi ini hampir mencapai tegangan maksimum material granular sebesar 125 kN/m² sehingga diperlukan evaluasi ketebalan LTP agar dapat mencapai efektifitas maksimum dalam penyebaran beban yang akan diterima kolom inklusi.

4. Gaya Tarik pada Geosintetik

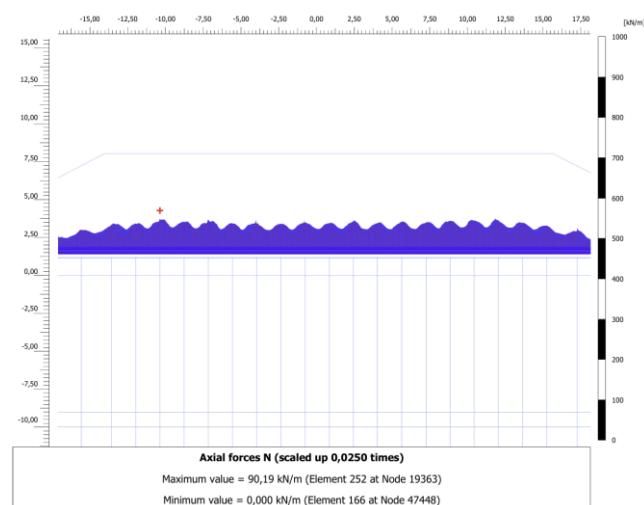
Hasil pemodelan perencanaan awal, diperoleh gaya tarik yang terjadi pada geotektil woven sebesar 90 kN/m ditunjukkan dalam Gambar 7. Gaya tarik ini telah melebihi kuat tarik ijin yang dapat dicapai oleh geotekstil woven dengan kuat tarik awal 100 kN/m dan batas regangan 5% yaitu sebesar 56 kN/m.



Gambar 5. Analisa faktor keamanan Lereng

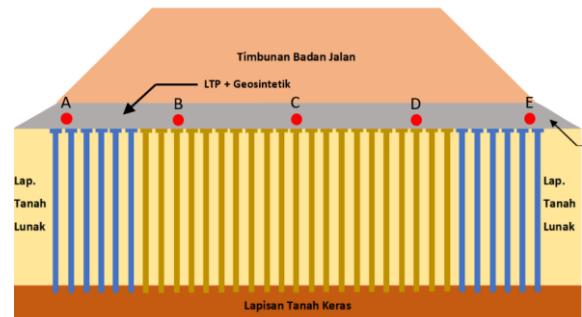


Gambar 6. Analisa tegangan yang terjadi pada LTP



Gambar 7. Analisa gaya tarik yang terjadi pada geotekstil

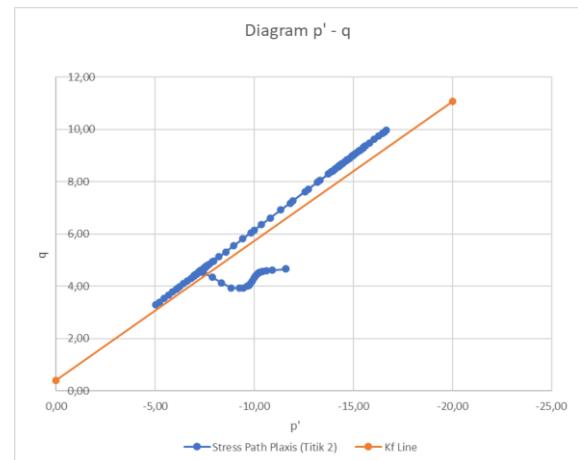
Selanjutnya dilakukan simulasi tegangan dan penurunan pada LTP pada konstruksi awal selama beban bekerja diatasnya, dengan dilakukan simulasi ini dapat diketahui efektifitas dari penyebaran beban dan penurunan yang terjadi. Analisis dilakukan pada lima titik yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Titik Tinjauan Simulasi tegangan LTP

1. Simulasi tegangan LTP pada Titik A

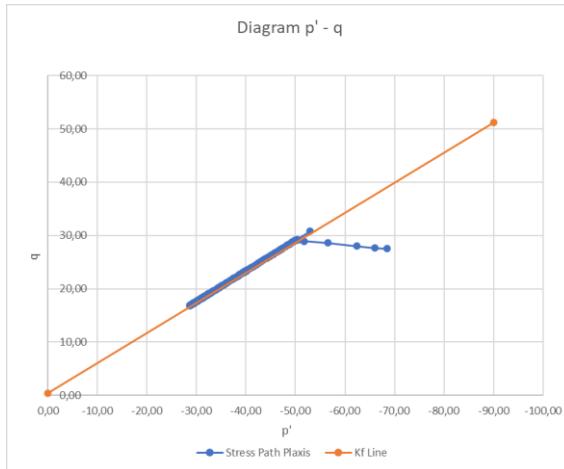
Diagram tegangan pada titik A yang ditunjukkan oleh Gambar 9. menghasilkan lintasan tegangan (garis biru) yang melampaui garis kegagalan (Kf line). Ini menunjukkan bahwa LTP berada dalam kondisi kegagalan, akibat mengalami perubahan tegangan yang signifikan dari pemberian beban pada fase konsolidasi. Hal ini juga menunjukkan bahwa penyebaran tegangan mulai terjadi pada fase konsolidasi, sehingga penyebaran beban tidak mencapai efektif.



Gambar 9. Diagram Tegangan LTP titik A

2. Simulasi tegangan LTP pada Titik B

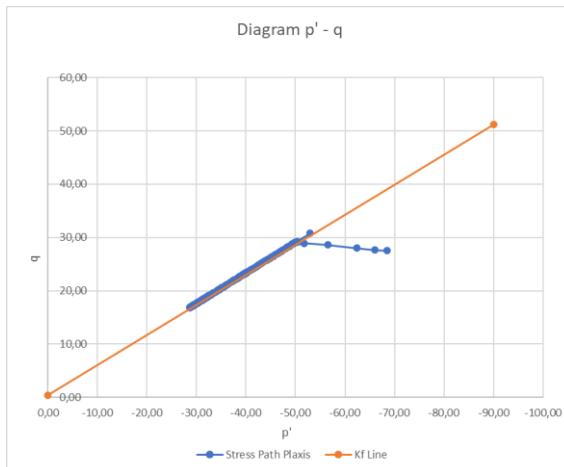
aDiagram tegangan pada titik B yang ditunjukkan oleh Gambar 10. menghasilkan lintasan tegangan (garis biru) yang melampaui garis kegagalan (Kf line). Ini menunjukkan bahwa LTP berada dalam kondisi kegagalan, akibat mengalami perubahan tegangan yang signifikan dari pemberian beban pada fase konsolidasi 1 tahun sampai dengan 10 tahun. Hal ini juga menunjukkan bahwa penyebaran tegangan mulai terjadi pada fase konsolidasi 1 tahun



Gambar 10. Diagram Tegangan LTP titik B

3. Simulasi tegangan LTP pada Titik C

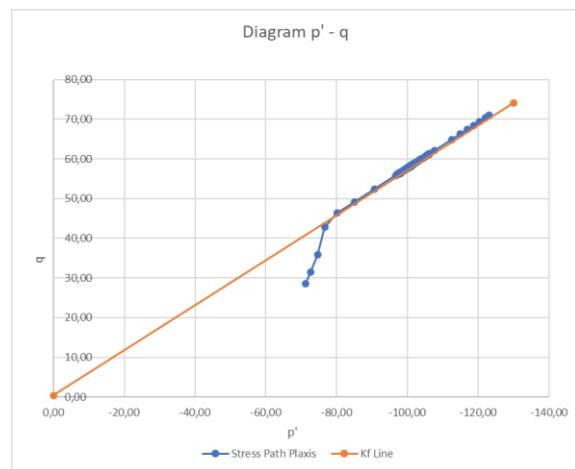
Diagram tegangan pada titik C yang ditunjukkan oleh Gambar 11. menghasilkan lintasan tegangan (garis biru) yang melampaui garis kegagalan (Kf line). Ini menunjukkan bahwa LTP berada dalam kondisi kegagalan, akibat mengalami perubahan tegangan yang signifikan dari pemberian beban pada fase konsolidasi 1 tahun sampai dengan 10 tahun. Hal ini juga menunjukkan bahwa penyebaran tegangan mulai terjadi pada fase konsolidasi 1 tahun.



Gambar 11. Diagram Tegangan LTP titik C

4. Simulasi tegangan LTP pada Titik D

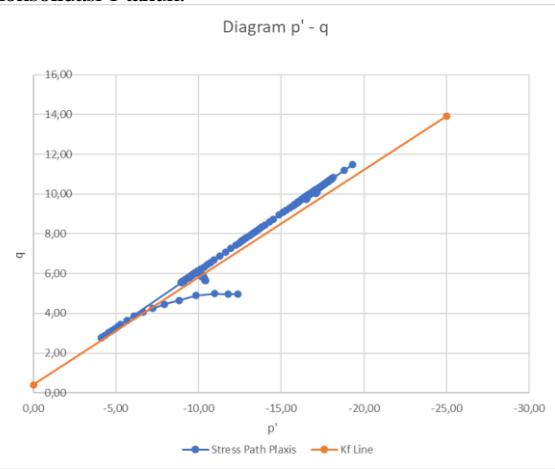
Diagram tegangan pada titik D yang ditunjukkan oleh Gambar 12. menghasilkan lintasan tegangan (garis biru) yang melampaui garis kegagalan (Kf line). Ini menunjukkan bahwa LTP berada dalam kondisi kegagalan, akibat mengalami perubahan tegangan yang signifikan dari pemberian beban pada fase konsolidasi 1 tahun sampai dengan 10 tahun. Hal ini juga menunjukkan bahwa penyebaran tegangan mulai terjadi pada fase konsolidasi 1 tahun.



Gambar 12. Diagram Tegangan LTP titik D

5. Simulasi tegangan LTP pada Titik E

Diagram tegangan pada titik E yang ditunjukkan oleh Gambar 13. menghasilkan lintasan tegangan (garis biru) yang melampaui garis kegagalan (Kf line). Ini menunjukkan bahwa LTP berada dalam kondisi kegagalan, akibat mengalami perubahan tegangan yang signifikan dari pemberian beban pada fase konsolidasi 1 tahun sampai dengan 10 tahun. Hal ini juga menunjukkan bahwa penyebaran tegangan mulai terjadi pada fase konsolidasi 1 tahun.



Gambar 13. Diagram Tegangan LTP titik E

Setelah dilakukan observasi lapangan dan analisis numerik, diperoleh hasil yang saling mengkonfirmasi bahwa kegagalan terjadi akibat tidak tercapainya efek arching pada lapisan LTP dan perkuatan geotekstil. Hal ini terjadi akibat ketebalan LTP yang kurang efektif dan mutu geotekstil yang digunakan tidak mampu untuk menahan beban yang bekerja sehingga terjadi kerusakan berupa sobek atau robek. Ketidak tercapaiannya efek arching juga disebabkan tidak adanya capping (kepala kolom) sehingga kolom menusuk geotekstil dan menambah robekan.

Selain itu berdasarkan analisis numerik, timbunan perlu adanya perkuatan lereng karena faktor keamanan lereng yang ditetapkan tidak tercapai. Hal ini juga dikarenakan

timbunan badan jalan yang cukup tinggi sehingga potensi keruntuhan lereng lebih tinggi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil observasi lapangan, kegagalan pada sistem perbaikan tanah menggunakan metode *rigid inclusion* diketahui disebabkan oleh beberapa faktor utama. Pertama, sistem transfer beban antara kolom inklusi dengan lapisan tanah penyesuai (LTP) tidak bekerja secara optimal. Kedua, ditemukan adanya masuknya air ke dalam timbunan yang sebagian besar terdiri dari material pasir, sehingga menyebabkan fenomena *hydrocompaction*. Kedua kondisi ini kemungkinan besar dipicu oleh adanya kerusakan pada geosintetik, material mortar kolom inklusi yang tidak homogen, serta tidak terbentuknya *arching effect* yang seharusnya menjadi bagian penting dalam mekanisme perbaikan tanah dengan metode ini. Untuk mengonfirmasi temuan-temuan dari lapangan tersebut, dilakukan analisis ulang secara numerik. Hasil dari analisis ini, yang dilakukan pada fase 365 hari setelah konstruksi, menunjukkan penurunan sebesar 690 mm, jauh melebihi ambang batas 20 mm. Selain itu, nilai keamanan lereng pada timbunan hanya mencapai 1.28, di bawah standar yang disyaratkan yaitu $SF > 1.5$. Tegangan pada LTP tercatat sebesar 121 kN/m², masih di bawah batas maksimal 125 kN/m², namun gaya tarik pada geosintetik mencapai 90 kN/m, yang berada di bawah nilai allowable sebesar 100 kN/m serta penyebaran beban pada lapisan LTP yang ditinjau pada lima titik menunjukkan hasil tidak mencapai efektif. Semua hasil ini mengindikasikan bahwa penyebab utama kegagalan terletak pada tidak efektifnya pembentukan *arching effect* dalam sistem perbaikan yang diterapkan..

Untuk pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini, terdapat beberapa saran yang perlu dipertimbangkan. Pertama, disarankan untuk dilakukan uji coba lapangan guna mengonfirmasi efektivitas dari hasil perencanaan evaluasi yang telah disusun. Dengan penerapan langsung di lapangan, keakuratan dan kelayakan desain dapat dievaluasi secara nyata dalam kondisi aktual.

Kedua, pemasangan instrumen geoteknik sangat diperlukan sebagai langkah tambahan untuk memantau dan mengevaluasi kinerja sistem secara lebih akurat. Instrumen ini akan memberikan data lapangan yang konkret mengenai perilaku tanah dan struktur, sehingga tingkat keberhasilan dari perencanaan evaluasi dapat diukur secara lebih komprehensif.

Ketiga, sebagai alternatif pendekatan perbaikan tanah lunak, khususnya tanah gambut atau organik, disarankan untuk mengeksplorasi metode lain seperti

penggunaan struktur *pile slab* yang didukung oleh fondasi tiang pancang. Pendekatan ini dapat memberikan basis perbandingan yang lebih luas terhadap efektivitas berbagai metode perbaikan tanah, sehingga memungkinkan pemilihan solusi yang paling optimal untuk kondisi tanah tertentu.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS, "Statistik Indonesia," 2015.
- [2] A. Hasan, N. Ismail, Y. Chuo, and L. J. Lee, "Cyclic simple shear behavior of a tropical alluvial soil," *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, vol. 129, p. 103305, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.pce.2022.103305.
- [3] Andriani, H. G. Putra, and M. S. N. Hadie, "Pengaruh Penambahan Tanah Mineral Dan Semen Terhadap Nilai California Bearing Ratio (Cbr) Tanah Gambut," 2019.
- [4] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 8460:2017 tentang "Persyaratan perancangan geoteknik."* jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- [5] M. J. SMITH, "Selection and Design of Rigid Inclusions," *DFI J. - J. Deep Found. Inst.*, vol. 17, no. 2, 2023.
- [6] Y. Shayah, "Seismic Behavior of Rigid Inclusion Foundation System," *Int. Conf. Civil, Struct. Transp. Eng.*, vol. 52, no. 109, p. 11159, 2023, doi: 10.11159/icccste23.109.
- [7] M. David, K. Ken, E. Fathey, and Z. Yan, "Rigid Inclusions Ground Improvement for a New Energy Facility: Design, Construction, and Full-Scale Embankment Load Testing and Results," in *Geo-Congress 2019*, in Proceedings. , 2019, pp. 101–114. doi: doi:10.1061/9780784482117.009.
- [8] V. H. Pham and D. Dias, "3D Numerical Modeling of Rigid Inclusion-Improved Soft Soils Under Monotonic and Cyclic Loading—Case of a Small-Scale Laboratory Experiment," *Appl. Sci.*, vol. 11, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11041426.
- [9] R. Alsirawan, "Analysis of Embankment Supported by Rigid Inclusions Using Plaxis 3D," *Acta Tech. Jaurinensis*, vol. 14, Aug. 2021, doi: 10.14513/actatechjaur.00615.
- [10] T. Hoshino *et al.*, "Mechanical stress analysis of a rigid inclusion in distensible material: a model of atherosclerotic calcification and plaque vulnerability," *Am. J. Physiol. Circ. Physiol.*, vol. 297, no. 2, pp. H802–H810, Aug. 2009, doi: 10.1152/ajpheart.00318.2009.
- [11] V. D. Tran, J.-J. Richard, and T. Hoang,

- [11] "Soft Soil Improvement Using Rigid Inclusions: Toward an Application for Transport Infrastructure Construction in Vietnam BT - New Prospects in Geotechnical Engineering Aspects of Civil Infrastructures," H. Khabbaz, H. Youn, and M. Bouassida, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 89–99.
- [12] S. Kumar, "Effect of Load Transfer Platforms on Soft Soil Stabilization," *Int. J. Civ. Eng.*, 2021.
- [13] A. Khelifa, "Soil-Structure Interaction in Rigid Inclusion Foundations," *J. Geotech. Eng.*, 2020.
- [14] E. Gartung, J. Verspohl, D. Alexiew, and F. Bergmair, "Geogrid Reinforced Railway Embankment on Piles-Monitoring," *Proc. first Eur. Geosynth. Conf. Eurogeo 1*, pp. 251–258, 1996.
- [15] C. Heitz, J. Lüking, and H. Kempfert, *Geosynthetic Reinforced and Pile supported Embankments under Static and Cyclic Loading*. 2008.
- [16] Y. Oh and E. Shin, "Reinforcement and Arching Effect of Geogrid-Reinforced and Pile-Supported Embankment on Marine Soft Ground," *Mar. Georesources Geotechnol.*, vol. 25, pp. 97–118, Apr. 2007, doi: 10.1080/10641190701359591.
- [17] H. Norio, U. Minoru, I. Yoshihiro, and N. Takuji, "A Crack Initiating from Rhombic Rigid Inclusion," *J. Eng. Mech.*, vol. 115, no. 12, pp. 2738–2748, Dec. 1989, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:12(2738).
- [18] M. Samy, A. Abdelfattah, A. Fayed, T. Sorour, and M. Hammad, "Prediction of the settlement associated with construction on soft clay improved using rigid inclusions considering the installation effect," *Eng. Res. Express*, vol. 5, Mar. 2023, doi: 10.1088/2631-8695/acc3de.
- [19] J. Javianto, G. Pranata, and A. Iskandar, "Analisis Perbaikan Deformasi Tanah Pertambangan Kalimantan Timur Dengan Metode Rigid Inclusion," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, pp. 233–246, Feb. 2022, doi: 10.24912/jmts.v5i1.16894.
- [20] B. Simon, "Projet National De Recherche Et Developpement. Amelioration Des Sols Par Inclusions Verticales Rigides," 2009. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:192530181>
- [21] A. K. Afif, M. R. Ahmad, and H. Rekardi, "Studi Kasus Kolom Grout Modular (KGM) terhadap Penurunan dan Stabilitas Timbunan Oprit Jembatan di Atas Tanah Lunak pada Jalan Tol Pemalang Batang," *Annu. Natl. Conf. Geotech. Eng. Jakarta - Indones.*, no. November, pp. 46–51, 2019.