



Analisis Potensi Likuifaksi dan Strategi Mitigasi Menggunakan Metode Rigid Inclusion Melalui Pendekatan Elemen Hingga

Neila Nafilah¹, Ristianti², Lisa Fitriyana³, Abdul Rochim⁴
^{1,2,3,4}Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung

neilanafilah78@gmail.com¹, ristiantiristianti02@gmail.com², lisa.fitriyana@unissula.ac.id³,
abdulrochim@unissula.ac.id⁴

Abstrak

Indonesia merupakan wilayah yang memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi karena letaknya di pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Salah satu dampak dari gempa bumi adalah likuifaksi, yaitu fenomena di mana tanah kehilangan kekuatan geser akibat meningkatnya tekanan air pori akibat beban siklik, sehingga tanah yang semula solid berubah menjadi cair. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis nilai Safety Factor dan penurunan tanah sebelum dan sesudah perkuatan Rigid Inclusion pada Sirkuit Mandalika. Penelitian ini memanfaatkan pendekatan numerik dengan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) menggunakan Software Plaxis 2D V24 untuk memodelkan potensi likuifaksi serta mengevaluasi efektivitas mitigasi menggunakan Rigid Inclusion di area Sirkuit Mandalika. Pemodelan dilakukan dengan variasi diameter, jarak, dan ketebalan Load Transfer Platform (LTP), untuk memperoleh analisis yang lebih mendalam dan representatif terhadap perilaku tanah dan struktur. Untuk diameter yang digunakan sebesar 0,42 m; untuk jarak yang digunakan yaitu 2,5 m, 2 m, dan 1,26 m; sedangkan untuk tebal LTP yaitu 1,5 m, 1,2 m, dan 0,7 m. Percepatan gempa yang digunakan yaitu 0,5 g dengan durasi waktu 5 sekon. Berdasarkan analisis menggunakan Plaxis 2D V24, tanah asli di Sirkuit Mandalika memiliki nilai Safety Factor (SF) < 1 sehingga berpotensi likuifaksi, sedangkan perkuatan Rigid Inclusion terbukti meningkatkan SF dan menurunkan settlement, dengan Pemodelan 1 sebagai variasi paling optimal dan efektif secara teknis.

Kata kunci: Likuifaksi, Rigid Inclusion, FEM, Plaxis 2D V24, Mitigasi Gempa, Load Transfer Platform

1. Latar Belakang

Indonesia termasuk dalam negara yang rentan terhadap bencana alam, terutama gempa bumi. Hal ini dapat dilihat dari letak geografisnya yang berada di pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, menyebabkan mayoritas wilayah Indonesia memiliki risiko tingkat tinggi terjadinya gempa bumi. Gempa bumi merupakan suatu fenomena alam yang sering terjadi di Indonesia. Akibat yang ditimbulkan dari getaran gempa dapat menyebabkan hilangnya kekuatan tanah, gempa juga mengakibatkan rusaknya bangunan, konstruksi dan dapat merubah topografi bumi. Salah satu fenomena yang sering terjadi akibat gempa bumi adalah likuifaksi (Alfian et al., 2022).

Menurut (Alfian et al., 2022), likuifaksi merupakan kejadian dimana tanah kehilangan kekuatan geser karena meningkatnya tegangan air pori yang disebabkan oleh beban siklik (beban gempa) yang terjadi dengan sangat cepat dan dalam kurun waktu yang singkat. Karena kehilangan kekakuan serta tegangan geser mengakibatkan sifat tanah yang awalnya solid menjadi liquid. Likuifaksi biasanya terjadi di tanah non kohesif (Granular), tanah bertipe seperti kerikil, pasir, atau lanau dengan sedikit atau tidak ada kandungan lempung.

Berbagai metode mitigasi sudah banyak dikembangkan untuk mengurangi risiko likuifaksi, salah satunya metode Rigid Inclusion. Rigid Inclusion merupakan teknik perkuatan tanah menggunakan elemen-elemen kaku seperti kolom beton yang ditanam ke dalam tanah lunak untuk meningkatkan kekuatan dan mengurangi deformasi saat terjadi pembebanan siklik.

Dengan berkembangnya kemajuan teknologi dibidang numerik, khususnya pendekatan elemen hingga (Finite Element Method/FEM) melalui perangkat lunak Plaxis 2D V24, pemodelan potensi likuifaksi dan simulasi strategi mitigasi dalam dilakukan secara lebih teliti. Pemodelan dilakukan agar dapat mengevaluasi efektivitas perkuatan tanah menggunakan Rigid Inclusion pada area Sirkuit Mandalika dengan berbagai variasi

konfigurasi, seperti diameter Rigid Inclusion, jarak Rigid Inclusion, dan tebal Load Transfer Platform (LTP). Melalui pemodelan inilah penelitian ini difokuskan untuk menganalisis potensi likuifaksi serta dapat menilai efektivitas dari metode Rigid Inclusion sebagai strategi mitigasi, khususnya di wilayah rawan gempa di Indonesia.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari studi sebelumnya yang menggunakan metode Rigid Inclusion dalam menganalisis likuifaksi (Saputra & Susanto, 2023), dengan tetap mengacu pada penelitian tersebut, penelitian ini mengombinasikannya dengan 3 variasi pada pendekatan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) untuk memperoleh analisis yang lebih mendalam dan representatif terhadap respon tanah dan struktur. Diharapkan kombinasi metode ini dapat memberikan gambaran perilaku yang lebih akurat terhadap kondisi di lapangan.

2. Metode Penelitian

Pembuatan model pada Tugas Akhir ini bertujuan sebagai program perancangan Rigid Inclusion dengan pendekatan Finite Element Method di daerah Lombok tepatnya di Sirkuit Mandalika. Dengan mempertimbangkan besaran besar gempa di Sirkuit Mandalika, terjadinya likuifaksi dan kedalaman muka air tanahnya (MAT). Tahap pemodelan dan analisis data menggunakan program software Plaxis 2D V24.

Literatur yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir ini berdasarkan hasil kajian penelitian para ahli yang telah melaksanakan penelitian tentang potensi Likuifaksi di Sirkuit Mandalika dan perencanaan dengan tambahan beberapa literatur yang relevan dengan isi pembahasan yang memiliki persamaan permasalahan tanah likuifaksi yang berada di Sirkuit Mandalika. Literatur yang digunakan berupa jurnal, paper, diktat, makalah, laporan data dari pemerintah dan beberapa tambahan literatur lainnya. Dengan didapatkannya beberapa literatur tersebut digunakan sebagai salah satu dasar materi dalam penyusunan landasan teori dan sebagai acuan dalam penentuan metode yang akan digunakan dalam menganalisis besarnya likuifaksi yang terjadi di Sirkuit Mandalika, Lombok.

Dalam melakukan analisis permasalahan yang ada maka di perlukan adanya data di lapangan. Dimana data yang diperoleh harus di dapatkan di lapangan secara langsung dengan cara mengadakan beberapa tindakan penelitian dengan metode yang telah di tentukan agar dapat mengetahui kondisi tanah secara langsung di lapangan. Metode pengumpulan data yang diambil pada penelitian ini yaitu data Sekunder. Data sekunder yang digunakan yaitu data N-SPT di Sirkuit Mandalika STA 4+000, dengan data yang diperoleh dijadikan dasar dalam pembuatan model analisis. Berikut data hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 1.

Kedalaman [m]	Konsistensi	N-SPT	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	φ (°)	Kuat (kN/dag)	ν	f_{lim}	C_r
0.0 - 5.6	Loose Sand	7	1000	8	25	4.300E-03	0.300	0.8	-
6.6 - 7.4	Medium Dense	11	11000	5	35	0.086	0.300	0.8	-
7.4 - 10.8	Medium	11	11000	18	18	4.500E-03	0.314	0.8	-
10.8 - 12.8	Loose Sand	8	8500	8	16	4.300E-03	0.300	0.8	-
12.8 - 17.4	Medium Dense	21	21140	5	35	0.086	0.300	0.8	-
17.4 - 18.4	Dense	35	35500	2	40	0.086	0.300	0.6	-

Gambar 1 Data N-SPT di Sirkuit Mandalika STA 4+000

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan membuat permodelan melalui perangkat lunak *Plaxis 2D V24* menggunakan pendekatan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) dengan menambahkan 3 variasi. Pemodelan dilakukan agar dapat mengevaluasi efektivitas perkuatan tanah menggunakan *Rigid Inclusion* pada area Sirkuit Mandalika dengan berbagai variasi konfigurasi, seperti diameter *Rigid Inclusion*, jarak antar *Rigid Inclusion*, dan tebal *Load Transfer Platform (LTP)*. Masing-masing variasi dianalisis untuk memperoleh nilai *Safety Factor* serta melihat pola deformasi dan distribusi tegangan yang terjadi pada tanah.

Hasil dari setiap variasi dibandingkan dengan kondisi eksisting (tanpa perkuatan) untuk mengetahui tingkat efektivitas masing-masing skenario. Selain itu, dilakukan perhitungan selisih nilai *Safety Factor* antara kondisi sebelum dan sesudah diberi perkuatan yang paling efektif guna mengetahui besarnya peningkatan stabilitas tanah yang dihasilkan dari penerapan metode *Rigid Inclusion*.

Pengolahan data dalam penelitian ini berupa data *bore log* tanah Sirkuit Madalika. Data ini kemudian diolah menjadi parameter input yang dibutuhkan dalam proses pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak *Plaxis 2D V24*. Pengolahan data ini dilakukan proses analisis untuk setiap variasi perkuatan rigid inclusion guna memperoleh nilai *Safety Factor* dan pola deformasi tanah.

3. Hasil dan Diskusi

Pada penelitian ini penulis menggunakan data yang didapat dari Sirkuit Mandalika STA 4+000 sebagai sampel penelitian untuk pengolahan data sekunder dengan menggunakan bantuan *software Plaxis 2D V24*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kondisi kestabilan tanah akibat potensi likuifaksi sebelum dan penerapan perkuatan *Rigid Inclusion* (RI) di Sirkuit Mandalika STA 4+000.

Data Tanah

Setelah data – data yang diperlukan seperti data sondir, data gempa, dan N-SPT sudah didapat maka langkah selanjutnya mengolah data tersebut agar dapat dilakukan analisis dan ditarik kesimpulan dari permasalahan yang terjadi.

Data N-SPT

Data N-SPT yang digunakan untuk analisis pada Tugas Akhir ini adalah data N-SPT pada Sirkuit Mandalika STA 4+000. N-SPT pada STA 4+000 dilakukan sampai kedalaman tanah keras pada 18 meter. Data sondir dapat dilihat pada **Gambar 2** berikut:

Kedalaman (m)	Konsistensi	N-SPT	E (kN/m ²)	C (kN/m ²)	φ (°)	Ksat (m/day)	ν	μ_{int}	C_r
0.0 – 6.6	Loose Sand	7	7000	8	25	4.300E-03	0.300	0.8	-
6.6 – 7.4	Medium Dense	11	11000	5	35	0.086	0.300	0.8	-
7.4 – 10.8	Medium	11	11000	18	16	4.500E-01	0.334	0.8	-
10.8 – 12.8	Loose Sand	8	8500	8	16	4.300E-03	0.300	0.8	-
12.8 – 17.4	Medium Dense	21	21140	5	35	0.086	0.300	0.8	-
17.4 – 18.4	Dense	35	35500	2	40	0.086	0.300	0.6	-

Gambar 2 Data N-SPT Sirkuit Mandalika STA 4+000 (Fitriyana, L,dkk 2025)

Parameter Tanah

Parameter tanah yang dimaksudkan disini meliputi berat volume basah, berat volume jenuh air, modulus young, *poisson ratio*, sudut geser dalam, kohesi dan data data hasil uji lab atau lapangan yang lain. Parameter tanah yang kami dapatkan berasal dari hasil uji lab dan lapangan tanah Sirkuit Mandalika STA 4+000:

Tabel 1 Parameter Tanah (Bagian 1)

Lapisan	Kedalaman (m)	Tanah	Konsistensi	<i>Drained Type</i>	NSPT (kN)	γ kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³
1	0,0 - 6,6	<i>Sand</i>	<i>Loose Sand</i>	<i>Drained</i>	7	17	19
2	6,6 - 7,4	<i>Sand</i>	<i>Medium Dense</i>	<i>Drained</i>	11	18	20
3	7,4 - 10,8	<i>Clay</i>	<i>Medium</i>	<i>Unrained A</i>	11	17	17

4	10,8 - 12,8	Sand	Loose Sand	Drained	8	17	19
5	12,8 - 17,4	Sand	Medium Dense	Drained	21	18	20
6	17,4 - 18,4	Sand	Dense	Drained	35	19	21

Tabel 2 Parameter Tanah (Bagian 2)

E' kN/m ²	C (MPa)	Ø (°)	Ksat (m/day)	v	e _{init}	Cr
7000	8	25	0,0043	0,3	0,8	-
11000	5	35	0,086	0,3	0,8	-
11000	18	16	0,0045	0,334	0,8	-
8500	8	16	0,0043	0,3	0,8	-
21140	5	35	0,086	0,3	0,8	-
35500	2	40	0,086	0,3	0,6	-

Parameter RI

Parameter *Rigid Inclusion* meliputi spesifikasi yang ada di dalam *Rigid Inclusion* tersebut guna memenuhi parameter yang sesuai pada pemodelan *Rigid Inclusion*. Berikut merupakan parameter *Rigid Inclusion*:

Tabel 3 Parameter *Rigid Inclusion* dalam Tanah LTP 1,5 m

Dept (m)	Tebal Lapisan (m)	NSPT (kN)	alpha	Jenis Tanah	Konsistensi	FS (kN/m ²)	axial skin resistense (kN/m)	Qskin	Qtip
0- 6,6	6,6	7	1	Sand	Loose	0,21	3,17	20,95	0,26
6,6 - 7,4	0,8	11	0,95	Sand	Medium Dense	0,33	4,99	3,79	0,41
7,4 - 10,8	3,4	11	0,6	Clay	Medium	0,33	4,99	10,18	0,41
10,8 - 12,8	2	8	1,1	Sand	Loose	0,24	3,63	7,98	0,30
12,8 - 13	0,2	21	0,6	Sand	Medium Dense	0,63	9,52	1,14	0,79
13 - 17,4	4,6	21	0,6	Sand	Medium Dense	0,63	9,52	26,29	0,79
17,4 - 18,4	1	35	0,47	Sand	Medium	1,05	15,87	7,46	1,31

Tabel 4 Parameter *Rigid Inclusion* dalam Tanah LTP 1,2 m

Dept (m)	Tebal Lapisan (m)	NSPT (kN)	alpha	Jenis Tanah	Konsistensi	FS (kN/m ²)	axial skin resistense (kN/m)	Qskin	Qtip
0- 6,6	6,6	7	1	Sand	Loose	0,21	3,28	21,62	0,26
6,6 - 7,4	0,8	11	0,95	Sand	Medium Dense	0,33	5,15	3,91	0,41
7,4 - 10,8	3,4	11	0,6	Clay	Medium	0,33	5,15	10,50	0,41
10,8 - 12,8	2	8	1,1	Sand	Loose	0,24	3,74	8,24	0,30
12,8 - 13	0,2	21	0,6	Sand	Medium Dense	0,63	9,83	1,18	0,79
13 - 17,4	4,6	21	0,6	Sand	Medium Dense	0,63	9,83	27,13	0,79
17,4 - 18,4	1	35	0,47	Sand	Medium	1,05	16,38	7,70	1,31

Tabel 5 Parameter *Rigid Inclusion* dalam Tanah LTP 0,7 m

Dept (m)	Tebal Lapisan (m)	NSPT (kN)	alpha	Jenis Tanah	Konsistensi	FS (kN/m ²)	axial skin resistense (kN/m)	Qskin	Qtip
0- 6,6	6,6	7	1	Sand	Loose	0,21	3,40	22,46	0,26
6,6 - 7,4	0,8	11	0,95	Sand	Medium Dense	0,33	5,35	4,07	0,41
7,4 - 10,8	3,4	11	0,6	Clay	Medium	0,33	5,35	10,91	0,41
10,8 - 12,8	2	8	1,1	Sand	Loose	0,24	3,89	8,56	0,30
12,8 - 13	0,2	21	0,6	Sand	Medium Dense	0,63	10,21	1,23	0,79
13 - 17,4	4,6	21	0,6	Sand	Medium Dense	0,63	10,21	28,18	0,79
17,4 - 18,4	1	35	0,47	Sand	Medium	1,05	17,02	8,00	1,31

Tabel 6 Parameter *Rigid Inclusion*

Model	D (m)	Luas (m ²)	Keliling (m)	Panjang (m)	Interval (m)	LTP (m)	Mutu (MPa)	Y	E (kN/m ²)	Mp (kNm)	Np (kN)	Fmax
1	0,42	0,14	15,118	11,5	2,5	1,5	30	24	1,15E+07	2,741	1000000	17,93
2	0,42	0,14	15,558	12	2,5	1,2	30	24	1,15E+07	2,70	1000000	20,07
3	0,42	0,14	16,208	12,3	2,5	0,7	30	24	1,15E+07	2,331	1000000	21,53
4	0,42	0,14	15,118	11,5	2	1,5	30	24	1,15E+07	2,883	1000000	17,93
5	0,42	0,14	15,558	12	2	1,2	30	24	1,15E+07	2,208	1000000	20,07
6	0,42	0,14	16,208	12,3	2	0,7	30	24	1,15E+07	2,104	1000000	21,53
7	0,42	0,14	15,118	11,5	1,26	1,5	30	24	1,15E+07	2,376	1000000	17,93
8	0,42	0,14	15,558	12	1,26	1,2	30	24	1,15E+07	1,190	1000000	20,07
9	0,42	0,14	16,208	12,3	1,26	0,7	30	24	1,15E+07	1,746	1000000	21,53

Parameter Perkerasan Jalan

Parameter perkerasan jalan yang digunakan dalam permodelan *Rigid Inclusion* adalah sebagai berikut:

Tabel 7 Parameter Perkerasan Jalan dalam Pemodelan *Rigid Inclusion*

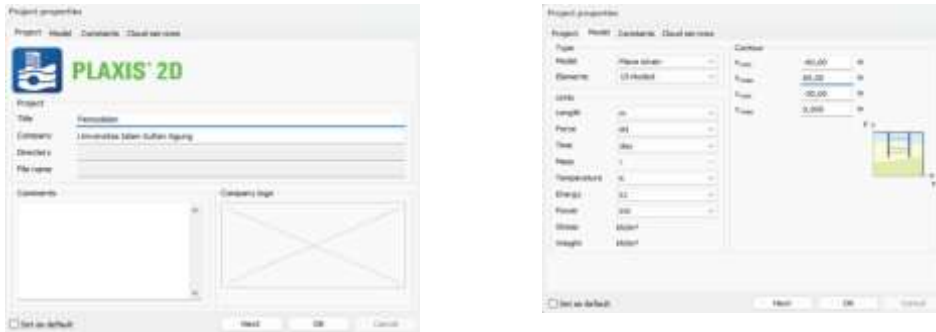
Parameter Beton fc 30 Mpa			
EA (kN/m)	EI (kN/m)	W (kN)	v
7,72E+06	5,79E+04	7	0,15

Pemodelan *Rigid Inclusion* pada *Software Plaxis 2D V24*

Pada pemodelan *software Plaxis 2D V24* penulis menggunakan parameter tanah di Sirkuit Mandalika untuk mengetahui berkurangnya dampak likuifaksi pada Sirkuit Mandalika.

Project Properties

Pada analisis ini penulis menggunakan model *plane strain* dan *element nodes* sejumlah 15. Dimensi geometri dibuat simetris terhadap sumbu tengah dengan jarak *boundary condition* ke arah kiri dan kanan masing-masing sebesar 60 meter. Penentuan jarak ini mempertimbangkan bahwa semakin jauh batas model, maka hasil analisis akan semakin teliti karena pengaruh batas terhadap area yang ditinjau semakin kecil, meskipun konsekuensi yang didapat waktu perhitungan menjadi lebih lama. Satuan yang digunakan dalam pemodelan adalah meter (m), disesuaikan dengan satuan pengukuran pada kondisi lapangan.

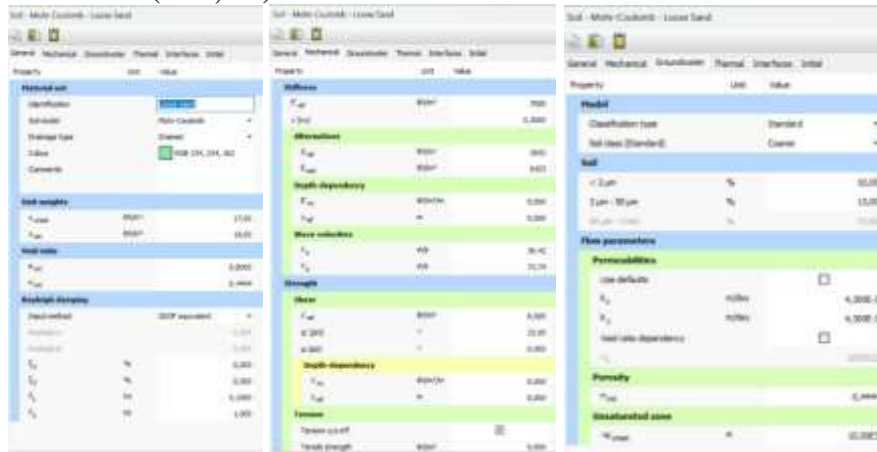


Gambar 3 Project Properties

Material Setting

Pada jendela soil dipilih *option show material* untuk memasukkan parameter tanah di Sirkuit Mandalika, model yang digunakan yaitu *soft soil material*. Untuk material yang digunakan yaitu:

Lapisan Tanah Loose Sand (0 – 6,6 m)



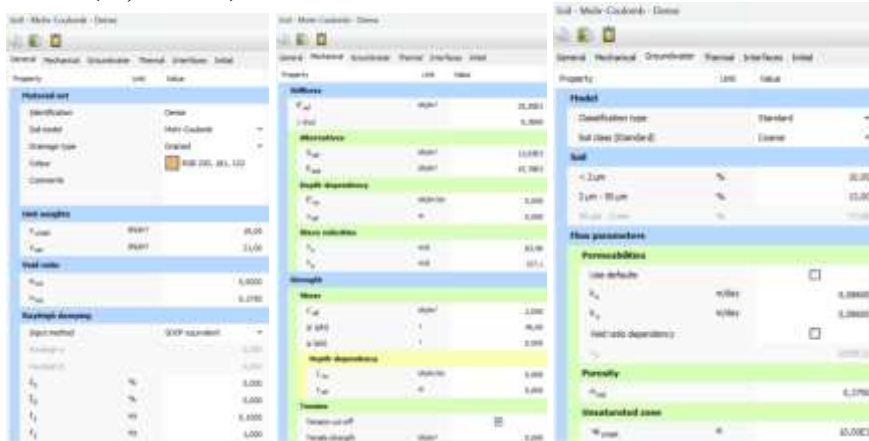
Gambar 4 Material Setting Loose Sand

Lapisan Tanah Medium Dense (6,6 – 7,4 m)



Gambar 5 Material Setting Medium Dense

Lapisan Tanah *Dense* (17,4 – 30 m)



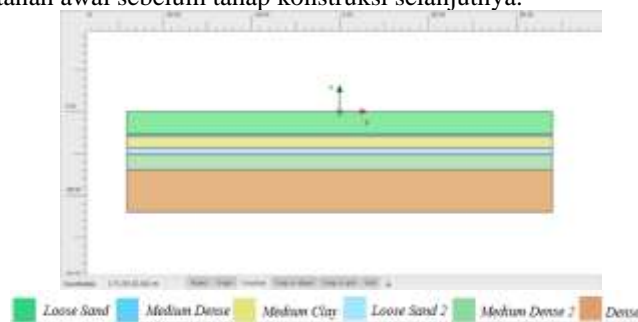
Gambar 9 Material Setting Dense

Pemodelan

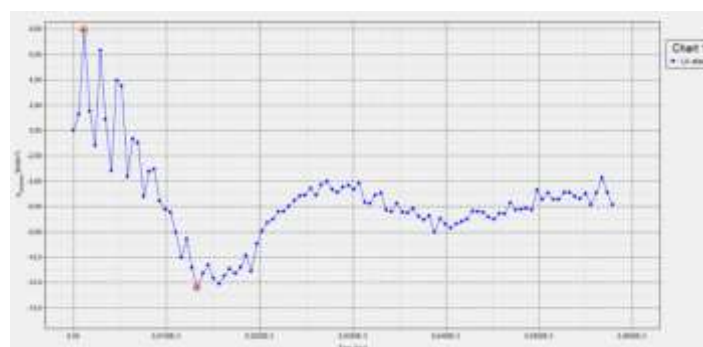
Setelah parameter material dan *project properties* ditentukan, selanjutnya dilakukan pemodelan yang dimulai dari pemodelan tanah asli dan dilanjutkan dengan pemodelan *Rigid Inclusion* sebagai bagian dari sistem perkuatan tanah.

Pemodelan Tanah Asli

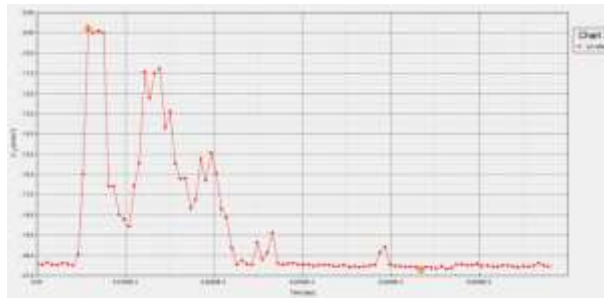
Pemodelan tanah asli dilakukan untuk menggambarkan kondisi tanah eksisting sebelum dilakukan perkuatan dengan *Rigid Inclusion*. Model dibuat sesuai dengan kondisi lapisan tanah pada Sirkuit Mandalika, menggunakan pendekatan *plane strain* serta kondisi batas (*boundary condition*) yang disesuaikan agar menggambarkan kondisi tanah awal sebelum tahap konstruksi selanjutnya.



Gambar 10 Pemodelan Tanah Asli



Gambar 11 Grafik P_{excess} Tanah Asli



Gambar 11 Grafik Tegangan Efektif Minor (σ'_3)Tanah Asli

Berdasarkan hasil analisis pada pemodelan tanah asli yang ditunjukkan pada grafik tekanan air pori berlebih (p_{excess}) dan tegangan efektif minor (σ'_3), terlihat bahwa nilai p_{excess} yang dihasilkan masih relatif kecil yang menandakan belum terjadinya peningkatan tekanan air pori akibat pembebanan. Selain itu, nilai tegangan efektif minor (σ'_3) yang masih rendah menunjukkan bahwa distribusi tegangan dalam tanah belum mengalami perubahan yang signifikan, akibat sebelum diberi perkuatan pada tahap pemodelan selanjutnya.

Pemodelan Rigid Inclusion

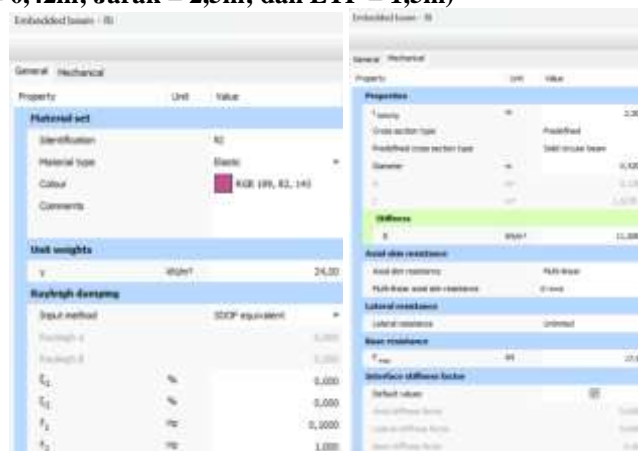
Pada jendela *structur option crate line* untuk membuat garis bantu dalam menggambar lapisan tanah, pilih *option embedded beam row* untuk membuat pemodelan *Rigid Inclusion* dan *option line load* untuk memberi beban pada pemodelan sebesar 15 kN/m² sesuai dalam SNI 8460 2017. Pada lapisan tanah terdapat timbunan LTP yang diisi gravel dan perkuatan *Rigid Inclusion* sesuai dengan tinggi yang sudah direncanakan. Untuk material yang digunakan yaitu:



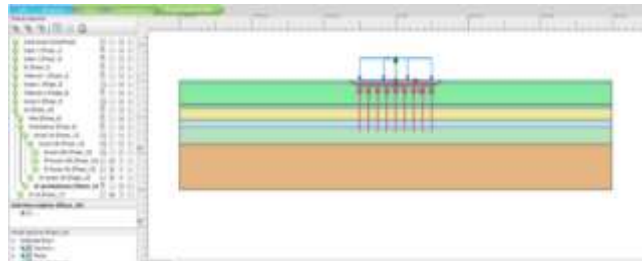
Gambar 12 Material LTP

Untuk pemodelan pada *Plaxis 2D V24* penulis membuat tiga percobaan pemodelan dengan variasi diameter, jarak dan tebal LTP, yaitu:

- 1) **Pemodelan 1 (D = 0,42m; Jarak = 2,5m; dan LTP = 1,5m)**

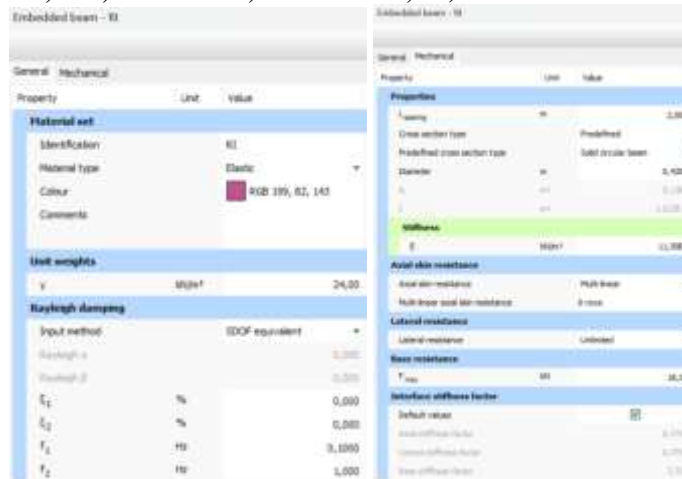


Gambar 13 Material RI Pemodelan 1

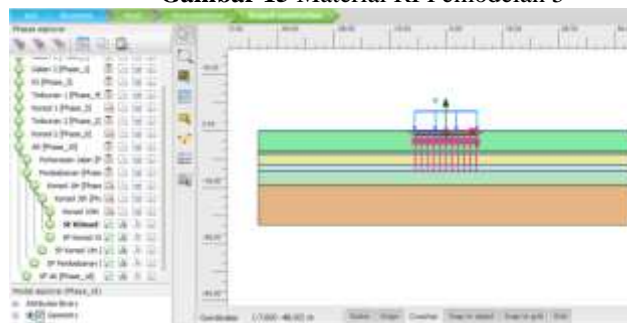


Gambar 14 Pemodelan 1

2) Pemodelan 5 ($D = 0,42\text{m}$; Jarak = 2m ; dan $LTP = 1,2\text{m}$)

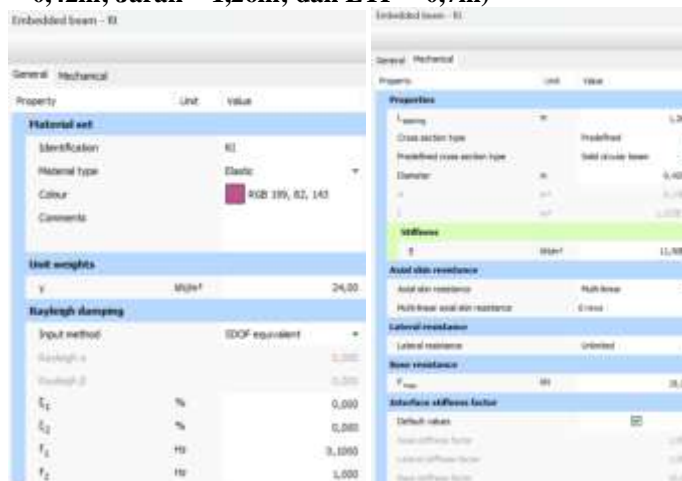


Gambar 15 Material RI Pemodelan 5

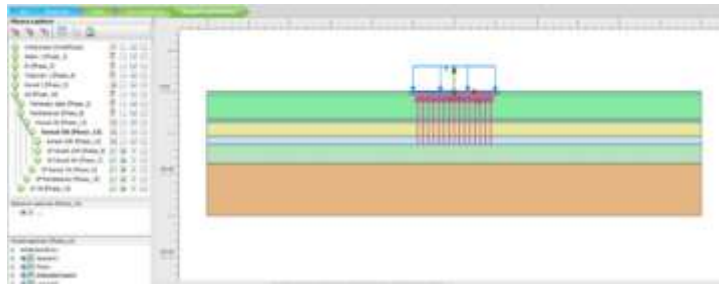


Gambar 16 Pemodelan 5

3) Pemodelan 9 ($D = 0,42\text{m}$; Jarak = $1,26\text{m}$; dan $LTP = 0,7\text{m}$)



Gambar 17 Material RI Pemodelan 9

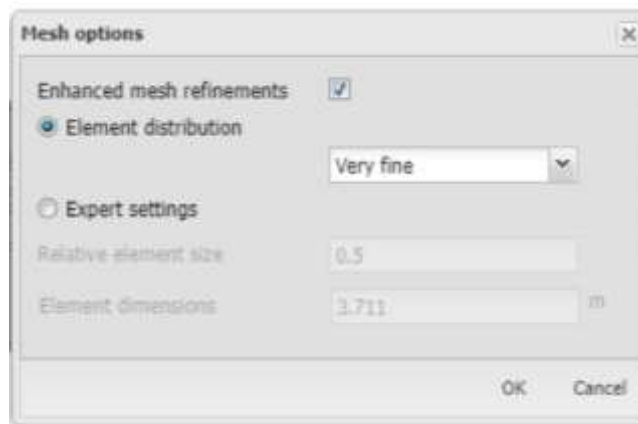


Gambar 18 Pemodelan 9

Setelah dilakukan pemodelan *Rigid Inclusion* seperti gambar di atas dilanjutkan ke tahapan berikutnya.

Mesh

Pada jendela *mesh*, pilih *very fine* pada *mesh option* untuk mendapatkan hasil yang baik dan agar perintah pada jendela struktur aktif.



Gambar 19 Jendela *Mesh Option*

Penentuan Titik Monitoring

Selanjutnya menentukan titik monitoring pada tanah *loose sand* untuk mengetahui detail hasil per lapisan tanah pada *output Plaxis 2D V24*.



Gambar 20 Titik Monitoring Pemodelan 1 ($D = 0,42$ m; Jarak = 2,5 m; dan LTP = 1,5 m)



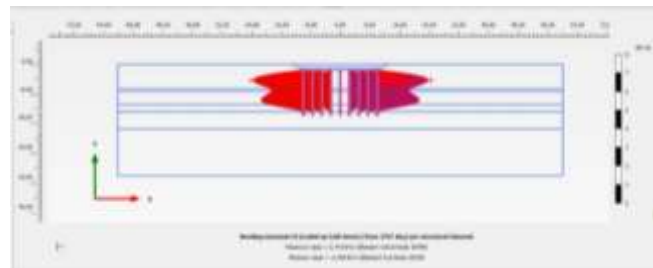
Gambar 21 Titik Monitoring Pemodelan 5 ($D = 0,42$ m; Jarak = 2 m; dan LTP = 1,2 m)



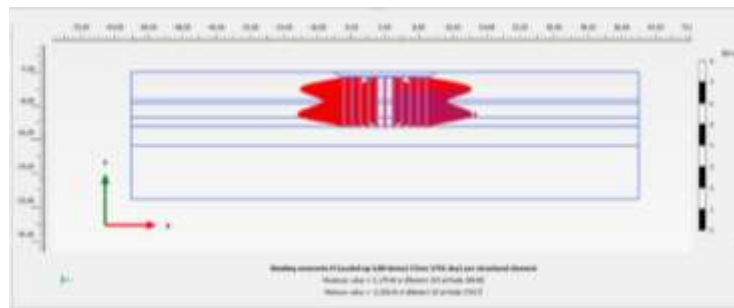
Gambar 22 Titik Monitoring Pemodelan 9 (D = 0,42 m; Jarak = 1,26 m; dan LTP = 0,7 m)

Elastic dan Elastoplastic

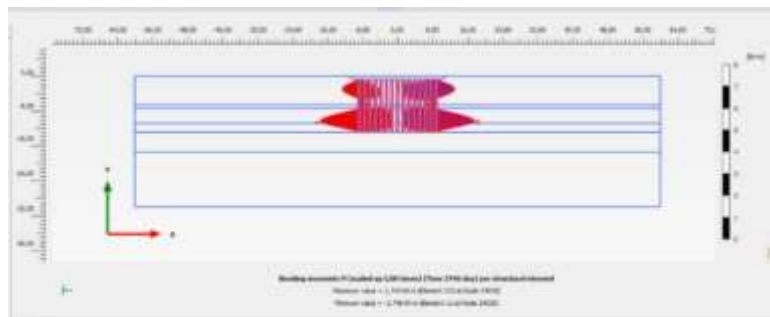
Sebelum masuk *calculate dynamic* kita mencari momen maksimum *Rigid Inclusion* pada *option* pemodelan *elastic*. Hasil momen maksimum dari pemodelan *elastic* dimasukkan pada parameter pemodelan *elastoplastic*.



Gambar 23 Mp Pemodelan 1 (D = 0,42 m; Jarak = 2,5 m; dan LTP = 1,5 m)



Gambar 24 Mp Pemodelan 5 (D = 0,42 m; Jarak = 2 m; dan LTP = 1,2 m)



Gambar 4.25 Mp Pemodelan 9 (D = 0,42 m; Jarak = 1,26 m; dan LTP = 0,7 m)

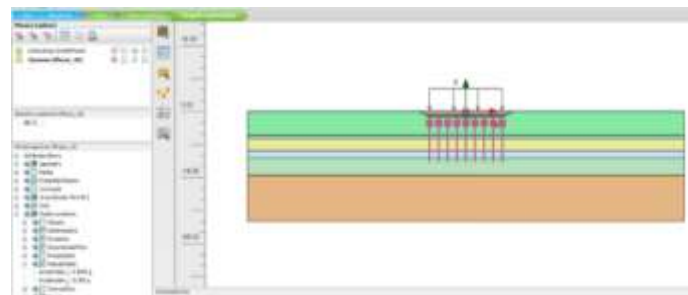
Tabel 8 Hasil Mp dari Pemodelan *Elastic*

Model	D (m)	Interval (m)	LTP (m)	Mp (kNm)
1	0,42	2,5	1,5	2,741
2	0,42	2,5	1,2	2,70
3	0,42	2,5	0,72	2,331
4	0,42	2	1,5	2,883

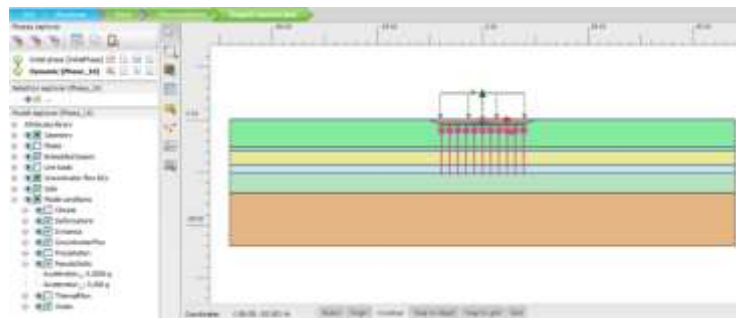
Model	D (m)	Interval (m)	LTP (m)	Mp (kNm)
5	0,42	2	1,2	2,208
6	0,42	2	0,72	2,104
7	0,42	1,26	1,5	2,376
8	0,42	1,26	1,2	1,190
9	0,42	1,26	0,72	1,746

Calculate Type

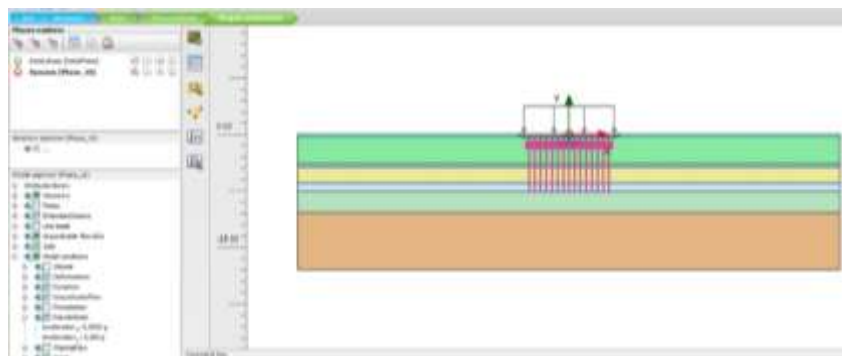
Setelah *elastic* dan *elastoplastic*, dilanjutkan *calculate dynamic*. Pada tahap ini penulis menggunakan option *Pseudostatic Acceleration 0,5g* di pemodelan tanah asli dan RI untuk mengetahui air pori pada tanah *loose sand* sesudah terjadi gempa. Pada *calculate dynamic service load* dimatikan.



Gambar 26 Stage Contruccion Dynamic Pemodelan 1 (D = 0,42 m; Jarak = 2,5 m; dan LTP = 1,5 m)



Gambar 27 Stage Contruccion Dynamic Pemodelan 5 (D = 0,42 m; Jarak = 2 m; dan LTP = 1,2 m)



Gambar 28 Stage Contruccion Dynamic Pemodelan 9 (D = 0,42 m; Jarak = 1,26 m; dan LTP = 0,7 m)

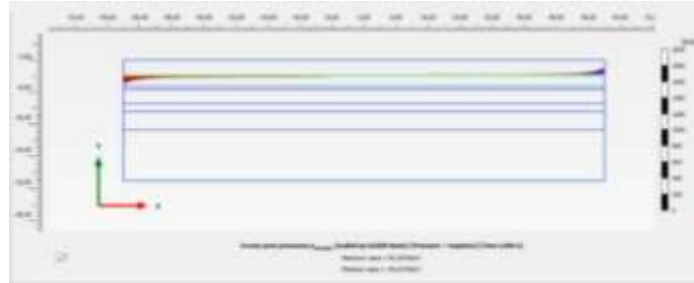
Diskusi

Dalam analisis ini penulis membuat 9 percobaan pemodelan dengan 3 variasi yaitu diameter, jarak dan tebal LTP, percepatan gempa yang digunakan yaitu 0,5g dengan durasi waktu 5 sekon, mengacu pada gempa Lombok tanggal 5 Agustus 2018. Berikut merupakan hasil analisis dari sembilan percobaan pemodelan.

Tanah Asli dan RI Acceleration 0,5g

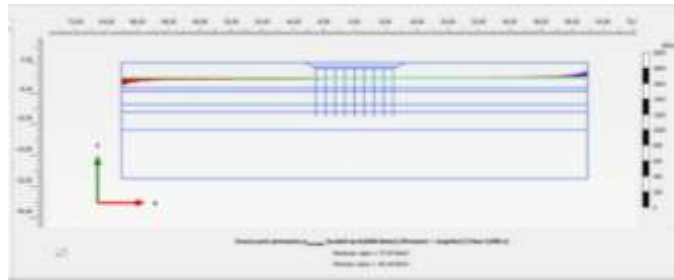
Setelah dilakukan analisis pada *software Plaxis 2D V24* didapatkan hasil analisis pada kondisi tanah asli dan RI dengan percepatan gempa 0,5g ditampilkan dalam bentuk gambar dan tabel. Visualisasi berupa gambar hanya ditampilkan pada satu model sebagai representative, sedangkan keseluruhan hasil dari Sembilan model disajikan dalam bentuk tabel guna memberikan perbandingan yang lebih sistematis. Gambar berikut merupakan hasil analisis pada tanah asli dan pemodelan satu.

- 1) Hasil nilai P_{excess} tanah asli pada lapisan *loose sand* sebesar 93,04 kN/m², dapat dilihat pada Gambar 29.



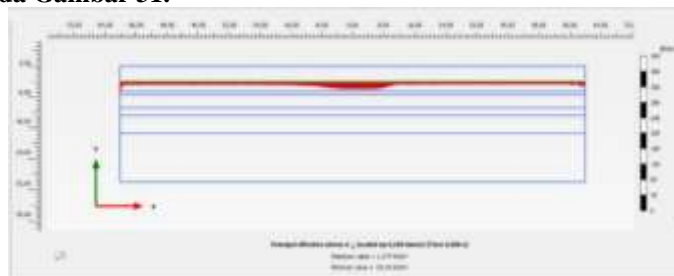
Gambar 29 P_{excess} Lapisan *Loose Sand* Tanah Asli

- 2) Hasil nilai P_{excess} *Rigid Inclusion* pada lapisan *loose sand* sebesar 94,45 kN/m², dapat dilihat pada Gambar 30.



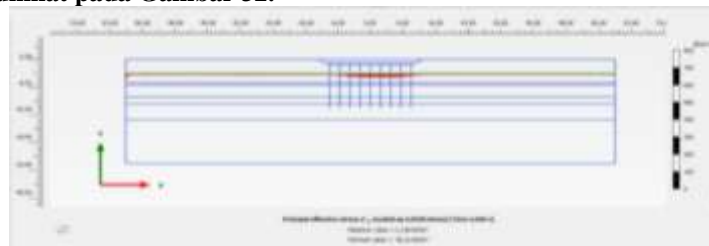
Gambar 30 P_{excess} Lapisan *Loose Sand* RI

- 3) Hasil nilai *principal effective stress* (σ'_3) tanah asli pada lapisan *loose sand* sebesar 33,41 kN/m², dapat dilihat pada Gambar 31.



Gambar 31 *Principal Effective Stress* (σ'_3) Lapisan *Loose Sand* Tanah Asli

- 4) Hasil nilai *principal effective stress* (σ'_3) *Rigid Inclusion* pada lapisan *loose sand* sebesar 40,21 kN/m², dapat dilihat pada Gambar 32.



Gambar 32 *Principal Effective Stress* (σ'_3) Lapisan *Loose Sand* RI

Seluruh hasil analisis dari sembilan model disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 9 Hasil Analisis Perbandingan Tanah Asli dan RI

Model	P_{excess} (kN/m ²)	Principal Effective Stress (σ'_3) (kN/m ²)
Tanah Asli	93,04	33,41
Model 1	94,45	40,21
Model 2	107,6	47,41
Model 3	108,3	51,69
Model 4	62,11	25
Model 5	88,65	23,7
Model 6	0,53	17,36
Model 7	102	33,78
Model 8	105,5	50,29
Model 9	92,65	25,07

Hasil Perbandingan Acceleration Tanah Asli dan Rigid Inclusion

Berdasarkan hasil analisis 9 percobaan pemodelan dengan 3 variasi yaitu diameter, jarak dan tebal LTP yang diperoleh dari *Plaxis 2D V24*, selanjutnya dilakukan pengolahan data yang bertujuan untuk mempermudah dalam melakukan perbandingan nilai percepatan antara pemodelan tanah asli dan tanah yang telah diperkuat menggunakan *Rigid Inclusion*.

Pemodelan 1 (D = 0,42m; Jarak = 2,5m; dan LTP = 1,5m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Inclusion*.

Tabel 10 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 1

Pemodelan 1 (D = 0,42 m ; Interval = 2,5 m ; LTP = 1,5 m)												
No	Time	Uo	P_{excess} Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_{excess} RI	σ'_3 RI	Uo + P_{excess} Tanah Asli	Uo + P_{excess} RI	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	8,91	21,64	20,23	16,89	0,89	1,28	1,13	0,78
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	11,93	22,29	17,76	13,87	0,93	1,61	1,07	0,62
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	13,66	17,70	17,22	12,14	0,63	1,46	1,58	0,69
4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	13,53	15,87	14,49	12,27	0,74	1,29	1,34	0,77
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	12,81	18,58	14,14	12,99	0,91	1,43	1,10	0,70

Pemodelan 2 (D = 0,42m; Jarak = 2,5m; dan LTP = 1,2m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Inclusion*.

Tabel 11 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 2

Pemodelan 2 (D = 0,42 m ; Interval = 2,5 m ; LTP = 1,2 m)												
No	Time	Uo	P_{excess} Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_{excess} RI	σ'_3 RI	Uo + P_{excess} Tanah Asli	Uo + P_{excess} RI	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	20,40	14,42	20,23	5,40	0,89	2,67	1,13	0,37
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	9,15	27,10	17,76	16,65	0,93	1,63	1,07	0,61
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	18,76	14,37	17,22	7,04	0,63	2,04	1,58	0,49

4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	15,74	26,34	14,49	10,06	0,74	3,26	1,34	0,31
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	16,14	26,17	14,14	9,66	0,91	2,71	1,10	0,37

Pemodelan 3 (D = 0,42m; Jarak = 2,5m; dan LTP = 0,7m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Incusion*.

Tabel 12 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 3

Pemodelan 3 (D = 0,42 m ; Interval = 2,5 m ; LTP = 0,7 m)												
No	Time	Uo	P_{excess} Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_{excess} RI	σ'_3 RI	Uo + P_{excess}	Uo + P_{excess}	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	21,15	14,03	20,23	4,65	0,89	3,01	1,13	0,33
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	9,45	26,09	17,76	16,35	0,93	1,60	1,07	0,63
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	19,22	13,46	17,22	6,58	0,63	2,05	1,58	0,49
4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	13,37	26,00	14,49	12,43	0,74	2,09	1,34	0,48
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	18,19	24,96	14,14	7,61	0,91	3,28	1,10	0,31

Pemodelan 4 (D = 0,42m; Jarak = 2m; dan LTP = 1,5m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Incusion*.

Tabel 13 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 4

Pemodelan 4 (D = 0,42 m ; Interval = 2 m ; LTP = 1,5 m)												
No	Time	Uo	P_{excess} Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_{excess} RI	σ'_3 RI	Uo + P_{excess}	Uo + P_{excess}	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	16,80	15,56	20,23	9,00	0,89	1,73	1,13	0,58
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	9,88	16,13	17,76	15,92	0,93	1,01	1,07	0,99
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	20,22	6,46	17,22	5,58	0,63	1,16	1,58	0,86
4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	20,52	11,78	14,49	5,28	0,74	2,23	1,34	0,45
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	19,16	6,30	14,14	6,64	0,91	0,95	1,10	1,05

Pemodelan 5 (D = 0,42m; Jarak = 2m; dan LTP = 1,2m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Incusion*.

Tabel 14 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 5

Pemodelan 5 (D = 0,42 m ; Interval = 2 m ; LTP = 1,2 m)												
No	Time	Uo	P_excess Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_excess RI	σ'_3 RI	Uo + P_excess	Uo + P_excess	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	10,52	15,72	20,23	15,28	0,89	1,03	1,13	0,97
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	14,40	15,52	17,76	11,40	0,93	1,36	1,07	0,74
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	15,18	10,71	17,22	10,62	0,63	1,01	1,58	0,99
4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	14,42	11,54	14,49	11,38	0,74	1,01	1,34	0,99
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	13,75	12,18	14,14	12,06	0,91	1,01	1,10	0,99

Pemodelan 6 (D = 0,42m; Jarak = 2m; dan LTP = 0,7m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Incusion*.

Tabel 4.15 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 6

Pemodelan 6 (D = 0,42 m ; Interval = 2 m ; LTP = 0,7 m)												
No	Time	Uo	P_excess Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_excess RI	σ'_3 RI	Uo + P_excess	Uo + P_excess	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	0,74	16,97	20,23	26,54	0,89	0,64	1,13	1,56
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	0,87	16,80	17,76	24,93	0,93	0,67	1,07	1,48
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	0,34	17,07	17,22	26,14	0,63	0,65	1,58	1,53
4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	1,07	17,07	14,49	24,73	0,74	0,69	1,34	1,45
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	0,01	16,62	14,14	25,79	0,91	0,64	1,10	1,55

Pemodelan 7 (D = 0,42m; Jarak = 1,26m; dan LTP = 1,5m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Incusion*.

Tabel 16 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 7

Pemodelan 7 (D = 0,42 m ; Interval = 1,26 m ; LTP = 1,5m)												
No	Time	Uo	P_excess Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_excess RI	σ'_3 RI	Uo + P_excess	Uo + P_excess	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	17,91	9,60	20,23	7,89	0,89	1,22	1,13	0,82
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	13,41	17,55	17,76	12,39	0,93	1,42	1,07	0,71
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	20,33	6,96	17,22	5,47	0,63	1,27	1,58	0,79

4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	4,81	17,41	14,49	20,99	0,74	0,83	1,34	1,21
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	14,80	17,27	14,14	11,00	0,91	1,57	1,10	0,64

Pemodelan 8 (D = 0,42m; Jarak = 1,26m; dan LTP = 1,2m)

Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Inclusion*.

Tabel 17 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 8

Pemodelan 8 (D = 0,42 m ; Interval = 1,26 m ; LTP = 1,2 m)												
No	Time	Uo	P_excess Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_excess RI	σ'_3 RI	Uo + P_excess	Uo + P_excess	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	23,74	16,02	20,23	2,06	0,89	7,78	1,13	0,13
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	15,47	25,21	17,76	10,33	0,93	2,44	1,07	0,41
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	14,19	12,66	17,22	11,61	0,63	1,09	1,58	0,92
4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	9,12	25,12	14,49	16,68	0,74	1,51	1,34	0,66
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	21,05	25,18	14,14	4,75	0,91	5,30	1,10	0,19

Pemodelan 9 (D = 0,42m; Jarak = 1,26m; dan LTP = 0,7m)

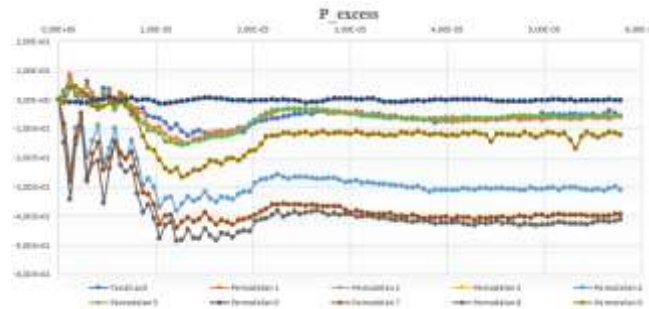
Berikut adalah tabel perbandingan antara tanah asli dan tanah yang sudah diberi perkuatan tanah *Rigid Inclusion*.

Tabel 18 Perbandingan P_{excess} dan σ'_3 Pemodelan 9

Pemodelan 3 (D = 0,42 m ; Interval = 1,26 m ; LTP = 0,7 m)												
No	Time	Uo	P_excess Tanah Asli	σ'_3 Tanah Asli	P_excess RI	σ'_3 RI	Uo + P_excess	Uo + P_excess	SF		RU	
	(Day)	kPa	(kN/m ²) (A)		(kN/m ²) (c)		Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI	Tanah Asli	RI
1	9,26E-06	25,8	5,57	17,99	16,46	18,12	20,23	9,34	0,89	1,94	1,13	0,52
2	1,10E-05	25,8	8,04	16,56	23,55	21,47	17,76	2,25	0,93	9,53	1,07	0,10
3	1,22E-05	25,8	8,58	10,93	23,62	21,50	17,22	2,18	0,63	9,87	1,58	0,10
4	1,39E-05	25,8	11,31	10,78	20,74	21,53	14,49	5,07	0,74	4,25	1,34	0,24
5	1,50E-05	25,8	11,66	12,88	23,24	17,45	14,14	2,56	0,91	6,81	1,10	0,15

Grafik Monitoring P_{excess} Antara Tanah Asli, Pemodelan 1 Sampai dengan Pemodelan 9

Grafik monitoring nilai *excess pore water pressure* (P_{excess}) pada tanah asli, pemodelan 1 sampai dengan pemodelan 9 bertujuan untuk membandingkan respons tekanan air pori berlebih pada setiap kondisi pemodelan serta mengevaluasi pengaruh penggunaan rigid inclusion terhadap potensi terjadinya likuifaksi.

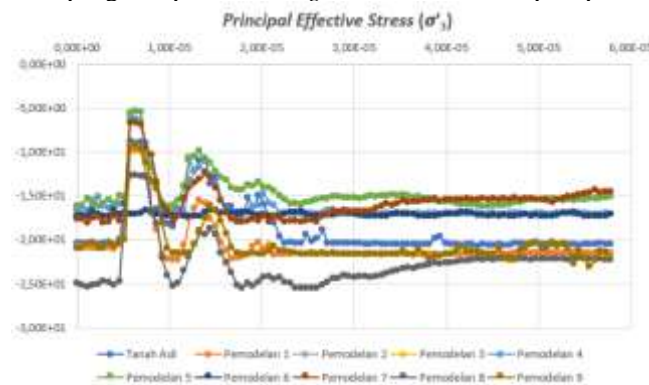


Gambar 33 Grafik P_{excess} Lapisan Loose Sand pada Tanah Asli dan RI

Dari grafik P_{excess} tersebut terlihat bahwa seluruh pemodelan mengalami peningkatan tekanan air pori berlebih pada awal pembebanan dinamik, kemudian diikuti penurunan seiring bertambahnya waktu.

Grafik Monitoring *Principal Effective Stress* (σ'_3) Antara Tanah Asli, Pemodelan 1 Sampai dengan Pemodelan 9

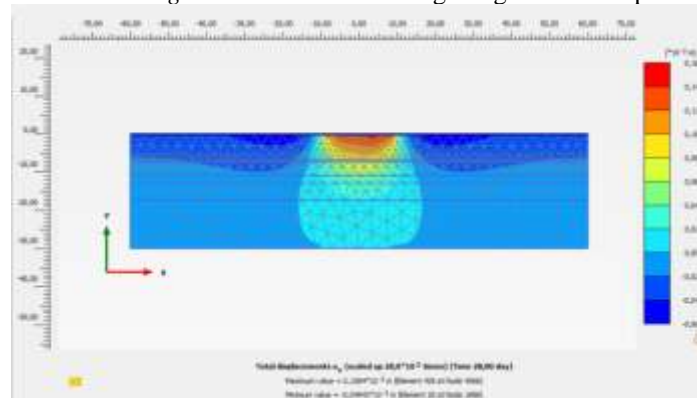
Grafik monitoring nilai *principal effective stress* (σ'_3) pada tanah asli, pemodelan 1 sampai dengan pemodelan 9 bertujuan untuk membandingkan perubahan tegangan efektif minimum pada setiap kondisi pemodelan serta mengevaluasi pengaruh perkuatan *Rigid Inclusion* terhadap respons tanah akibat beban gempa.



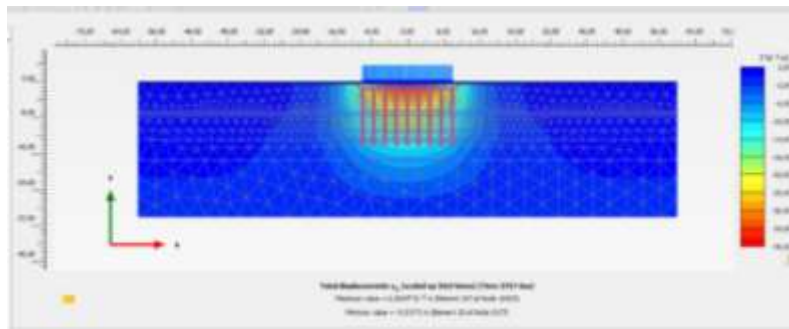
Gambar 34 Grafik *Principal Effective Stress* (σ'_3) Lapisan Loose Sand pada Tanah Asli dan RI

Hasil Analisis Penurunan (*Settlement*)

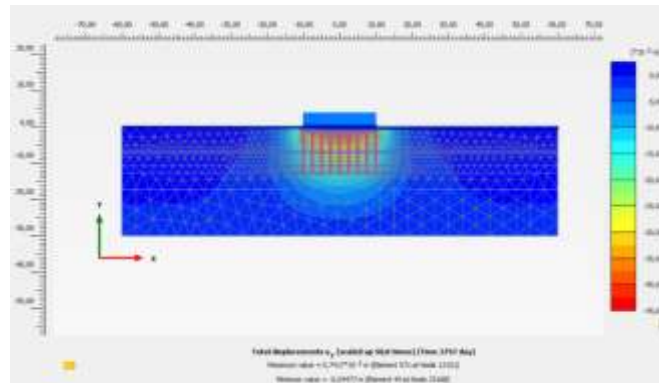
Setelah analisis dinamik dilakukan, evaluasi dilanjutkan pada besarnya deformasi vertikal (U_y) sebagai indikator penurunan tanah akibat peningkatan tekanan air pori selama proses likuifaksi. Hasil penurunan ini digunakan untuk menilai efektivitas *Rigid Inclusion* dalam mengurangi deformasi permanen tanah.



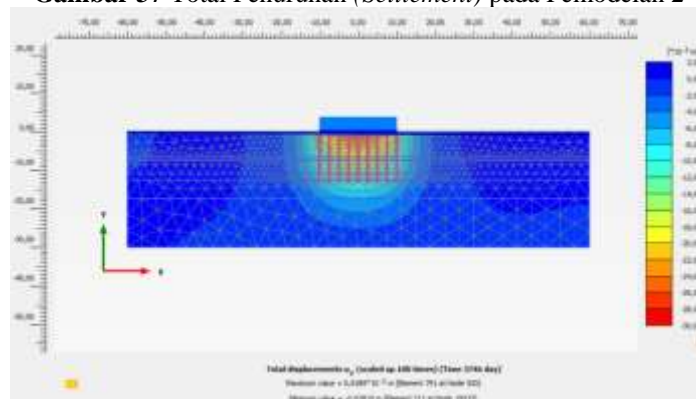
Gambar 35 Total Penurunan (*Settlement*) pada Tanah Asli



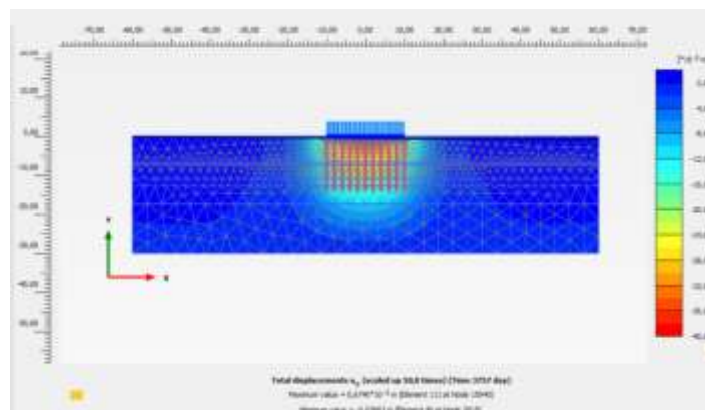
Gambar 436 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 1



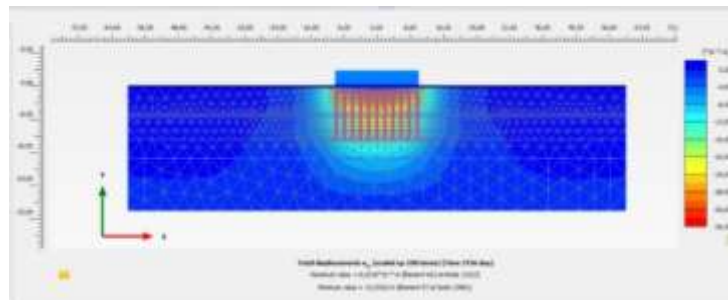
Gambar 37 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 2



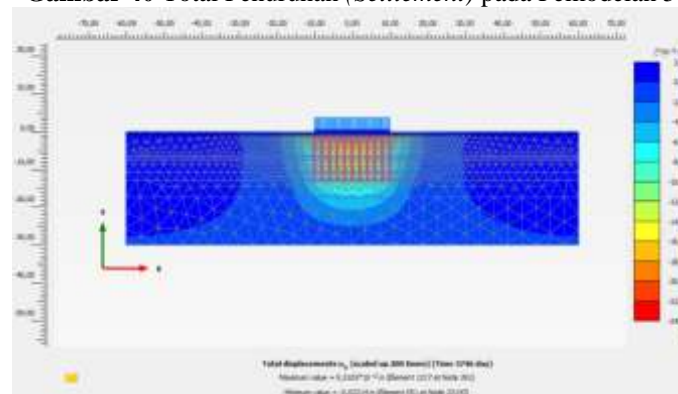
Gambar 38 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 3



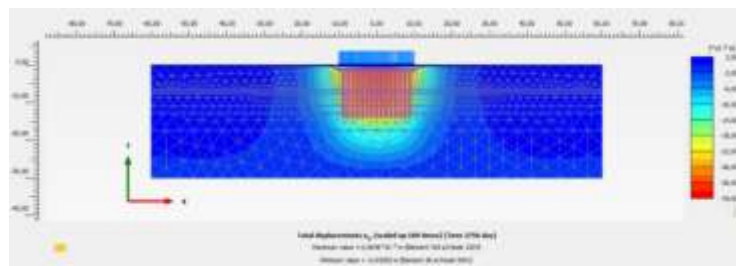
Gambar 39 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 4



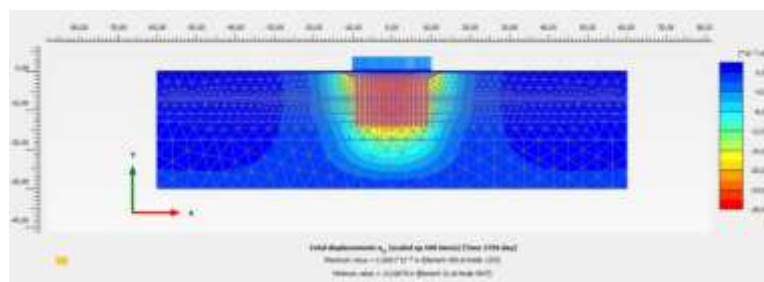
Gambar 40 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 5



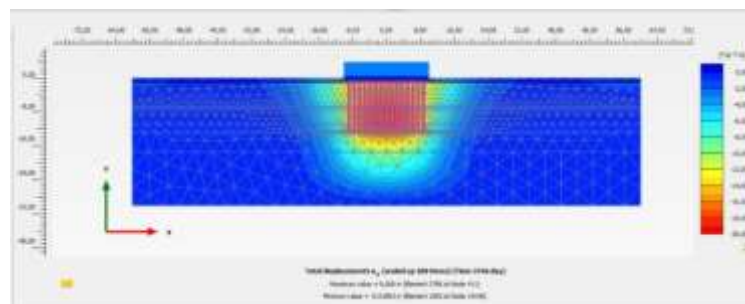
Gambar 41 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 6



Gambar 42 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 7



Gambar 43 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 8



Gambar 44 Total Penurunan (*Settlement*) pada Pemodelan 9

Tabel 19 Perbandingan Penurunan (*Settlement*)

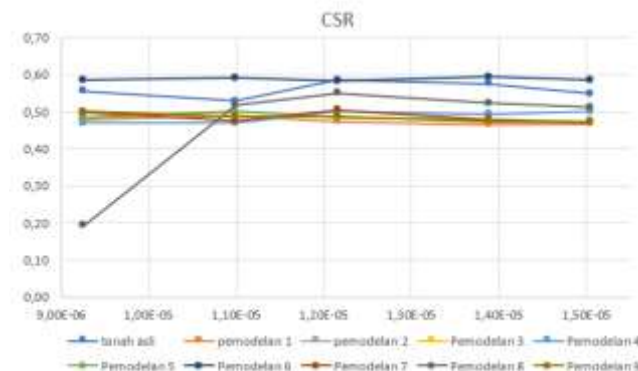
Tanah Asli	Pem 1	Pem 2	Pem 3	Pem 4	Pem 5	Pem 6	Pem 7	Pem 8	Pem 9
0,049	0,037	0,045	0,028	0,038	0,035	0,022	0,032	0,027	0,019

Analisis Cyclic Stress Ratio (CSR)

Analisis *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dilakukan untuk mengetahui potensi likuifaksi pada kondisi tanah asli dan tanah dengan perkuatan *Rigid Inclusion*. Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai CSR sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 20 Analisis CSR pada *Loose Sand*

Time	Tanah Asli	Pem 1	Pem 2	Pem 3	Pem 4	Pem 5	Pem 6	Pem 7	Pem 8	Pem 9
9,26E-06	0,56	0,48	0,57	0,56	0,47	0,48	0,59	0,50	0,19	0,50
1,10E-05	0,53	0,49	0,53	0,52	0,47	0,50	0,59	0,48	0,52	0,49
1,22E-05	0,58	0,47	0,56	0,56	0,50	0,48	0,58	0,51	0,55	0,49
1,39E-05	0,58	0,46	0,54	0,53	0,49	0,48	0,59	0,48	0,52	0,47
1,50E-05	0,55	0,47	0,53	0,52	0,50	0,47	0,59	0,47	0,51	0,47



Gambar 45 Grafik CSR

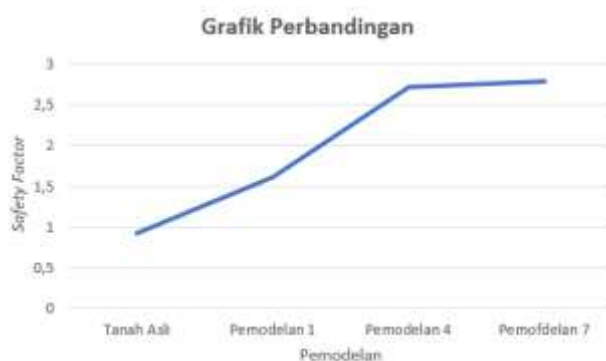
Berdasarkan hasil tersebut, terlihat bahwa nilai CSR pada tanah asli lebih besar dibandingkan dengan tanah yang telah diperkuat menggunakan *Rigid Inclusion*. Semakin kecil nilai CSR, maka nilai *safety factor* akan semakin besar karena *safety factor* merupakan perbandingan antara CRR dan CSR. Jika CSR menurun sementara CRR tetap, hasil perbandingan tersebut menjadi lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *Rigid Inclusion* efektif dalam menurunkan potensi terjadinya likuifaksi.

Rekapitulasi Pembahasan

Rekapitulasi hasil analisis disusun dalam bentuk tabel untuk mempermudah perbandingan antara tanah asli dan pemodelan dengan *Rigid Inclusion* berdasarkan parameter-parameter utama yang dianalisis.

Tabel 21 Rekapitulasi Pembahasan

Parameter	Tanah Asli	Pemodelan 1 Jarak 2,5 m	Pemodelan 4 Jarak 2 m	Pemodelan 7 Jarak 1,26 m
SF	0,93	1,61	2,71	2,79
RU	1,07	0,62	0,37	0,36



Gambar 46 Perbandingan *Safety Factor* pada LTP 1,5 m

Berdasarkan tabel rekapitulasi hasil analisis, tanah asli menunjukkan kondisi paling kritis dengan nilai *Safety Factor* (SF) sebesar 0,91 (<1) yang mengindikasikan terjadinya likuifaksi. Nilai RU yang melebihi 1 serta CSR sebesar 0,51 menunjukkan peningkatan tekanan air pori yang signifikan. Setelah diberikan perkuatan *Rigid Inclusion*, terjadi peningkatan nilai SF pada seluruh pemodelan. Pemodelan 1 dinilai paling efektif karena telah memenuhi kriteria keamanan tanpa menghasilkan nilai yang terlalu berlebihan. Dimana hal ini juga dipengaruhi dengan ketebalan LTP. Dimana bahwa semakin tebal LTP, semakin besar nilai SF likuifaksi yang diperoleh, karena peningkatan berat lapisan tersebut meningkatkan tegangan efektif tanah dan memperkecil potensi kehilangan kuat geser akibat gempa.

4. Kesimpulan

Dari hasil output Plaxis 2D V24, dapat dilihat bahwa di Sirkuit Mandalika nilai *Safety Factor* (SF) tanah asli sebelum perkuatan menunjukkan nilai SF < 1 yang menandakan berpotensi likuifaksi khususnya pada lapisan tanah loose sand atas. Hasil analisis output Plaxis 2D V24 dengan perkuatan *Rigid Inclusion* menggunakan variasi jarak, diameter, dan tebal LTP, terjadi peningkatan nilai *Safety Factor* (SF) serta penurunan nilai settlement pada seluruh variasi. Artinya RI dapat mengurangi dampak likuifaksi di Sirkuit Mandalika. Berdasarkan hasil perbandingan, Pemodelan 1, 4, dan 7 dinilai sebagai variasi yang paling optimal karena memberikan peningkatan *Safety Factor* yang memenuhi kriteria keamanan serta penurunan yang masih dalam batas yang dapat diterima, hal ini dipengaruhi oleh nilai LTP yang lebih besar, di mana peningkatan LTP berkontribusi terhadap peningkatan *Safety Factor*, sehingga secara teknis dan efisiensi perencanaan lebih efektif dibandingkan variasi lainnya.

Referensi

1. Arry, M. F. M., Iskandar, A., & Pranata, G. (2022). Analisis Finite Element Deformasi Rigid Inclusion Dengan Dan Tanpa Inclusion Caps Di Timbunan Batubara. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(2), 425–434. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i2.17039>
2. Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik*. Penerbit Erlangga, 1–300.
3. Das, B. M., & Sivakugan, N. (2016). *Introduction to Geotechnical Engineering* (2nd ed.). Cengage Learning.
4. Fahriana, N., Ismida, Y., Lydia, E. N., & Ariesta, H. (2019). Analisis Klasifikasi Tanah Dengan Metode Uscs (Meurandeh Kota Langsa). *Jurnal Ilmiah Jurutera*, 6(2), 005–013. <https://ejournalunsam.id/index.php/jurutera/article/view/1622/1284>
5. Fitriyana, Lisa. 2025. Model Perkuatan Tanah dengan Rigid Inclusion untuk Perkerasan Jalan yang Berpotensi Likuifaksi. Tesis. Universitas Islma Sultan Agung, Semarang.
6. Javianto, J. E., Pranata, G., & Iskandar, A. (2022). Analisis Perbaikan Deformasi Tanah Pertambangan Kalimantan Timur Dengan Metode Rigid Inclusion. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(1), 233–246. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i1.16894>
7. Kuswandi, Y., Erwindi, J., Dwi Hadian, M. S., & Muslim, D. (2020). Disaster Mitigation for Palu City Residents in Dealing with Liquefaction Disasters in Accordance of Spatial Patterns of Palu City, Central Sulawesi Province, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 5(4), 219–226. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2020.5.4.5653>
8. Lonteng, C. V. D., Balamba, S., Monintja, S., & Sarajar, A. N. (2013). Analisis Potensi Likuifaksi di PT. PLN (Persero) UIP KIT Sulmapa PLTU 2 Sulawesi Utara 2 x 25 MW Power Plant. *Jurnal Sipil Statik*, 1(11), 705–717. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/jss/article/view/3801>
9. Lutfunnisa, D., & Sabilla, F. R. (2025). ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI DI JEPARA DENGAN METODE SIMPLIFIED PROCEDURE.
10. Mangunpraja, D. M., & Prihatiningsih, A. (2019). Analisis Perbaikan Tanah Sebagai Bentuk Mitigasi Bencana Likuifaksi Yang Dapat Diaplikasikan Masyarakat Di Palu. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 2(4), 95. <https://doi.org/10.24912/jmts.v2i4.6167>
11. Pranata, S., & Kurniadin, N. (2021). Identifikasi Perubahan Indeks Kerapatan Bangunan Pasca Likuifaksi Di Kota Palu. *Buletin Poltanesa*, 22(1). <https://doi.org/10.51967/tanesa.v22i1.469>
12. Saputra, Z. A. E., & Susanto, T. A. (2023). Perancangan Rigid Inclusion Untuk Mengurangi Dampak Likuifaksi Sirkuit Mandalika. <http://repository.unissula.ac.id/id/eprint/32525>
13. Tanah, D., Likuifaksi, B., Soeratinoyo, A. H., Manoppo, F. J., & Mandagi, A. T. (2022). *jm_tekno,+12.+Alfian+Soeratinoyo*. 20, 189–201.

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.8843>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

14. Tijow, K. C., Sompie, O. B. A., & Ticoh, J. H. (2018). Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standart Penetration Test (Spt) Studi Kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 6(7), 491–500.
15. Verbrugge, J.-C., & Schroeder, C. (2018). *Geotechnical Correlations for Soils and Rocks* Jean-Claude Verbrugge. ISTE Ltd & John Wiley & Sons, Inc.