

ANALISIS STABILITAS TANAH DENGAN PENERAPAN RIGID INCLUSION PADA FENOMENA LIKUIFAKSI DI YOGYAKARTA INTERNATIONAL AIRPORT

SOIL STABILITY ANALYSIS WITH THE APPLICATION OF RIGID INCLUSION IN THE PHENOMENON OF LIQUEFACTION AT YOGYAKARTA INTERNATIONAL AIRPORT

Twe Endo M Apriadi¹, Agus Sulaeman²

¹ Mahasiswa Prodi Magister Teknik Sipil, Universitas Jenderal Achmad Yani

² Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad

Yani Email : ferdianfaizal80@gmail.com¹

ABSTRACT

Yogyakarta International Airport (YIA), located in a coastal alluvial area, is characterized by loose saturated sandy soils with high susceptibility to earthquake-induced liquefaction. Although rigid inclusion (RI) has been widely applied as a ground improvement method, its effectiveness in optimizing spacing configuration for liquefaction mitigation under site-specific conditions such as YIA has not been comprehensively evaluated. This study aims to assess the liquefaction potential beneath the runway area and to evaluate the performance of rigid inclusion with different spacing configurations. A two-dimensional dynamic numerical analysis was conducted using PLAXIS 2D under a Peak Ground Acceleration (PGA) of 0.30 g. Four modeling scenarios were analyzed: without reinforcement and with rigid inclusion spacing of 3 m, 2.5 m, and 2 m. The results indicate that the unreinforced condition exhibits severe liquefaction potential, characterized by excess pore pressure ratio (RU) exceeding 1.0 and a safety factor (SF) below 1.0. The installation of rigid inclusion significantly reduces pore pressure development and improves soil stability. The most effective configuration is achieved at 2 m spacing, resulting in RU reduction to 0.19 and an increase in SF up to 5.29. These findings demonstrate that closer rigid inclusion spacing substantially enhances liquefaction resistance and provide a practical basis for optimizing ground improvement design in liquefaction-prone airport infrastructure.

Keywords: liquefaction mitigation, rigid inclusion, soil stabilization, numerical modeling, PLAXIS 2D.

ABSTRAK

Yogyakarta International Airport (YIA) yang berlokasi pada kawasan aluvial pesisir dicirikan oleh tanah pasir lepas jenuh air dengan kerentanan tinggi terhadap likuifaksi akibat gempa bumi. Meskipun rigid inclusion (RI) telah banyak diterapkan sebagai metode perbaikan tanah, efektivitasnya dalam mengoptimalkan konfigurasi jarak pemasangan untuk mitigasi likuifaksi pada kondisi tanah spesifik seperti di YIA belum dievaluasi secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk menilai potensi likuifaksi di bawah area runway serta mengevaluasi kinerja rigid inclusion dengan variasi jarak pemasangan. Analisis numerik dinamis dua dimensi dilakukan menggunakan PLAXIS 2D dengan pembebanan gempa sebesar Peak Ground Acceleration (PGA) 0,30 g. Empat skenario pemodelan dianalisis, yaitu tanpa perkuatan serta dengan rigid inclusion berjarak 3 m, 2,5 m, dan 2 m. Hasil menunjukkan bahwa kondisi tanpa perkuatan memiliki potensi likuifaksi yang tinggi, ditandai dengan rasio tekanan air pori berlebih (RU) melebihi 1,0 dan faktor keamanan (SF) kurang dari 1,0. Penerapan rigid inclusion secara signifikan mampu menekan perkembangan tekanan air pori dan meningkatkan kestabilan tanah. Konfigurasi paling efektif diperoleh pada jarak 2 m dengan penurunan RU hingga 0,19 dan peningkatan SF mencapai 5,29. Temuan ini menunjukkan bahwa jarak rigid inclusion

yang lebih rapat secara substansial meningkatkan ketahanan terhadap likuifaksi serta memberikan dasar praktis dalam optimasi desain perbaikan tanah pada infrastruktur bandara di kawasan rawan likuifaksi.

Kata Kunci: liquefaction mitigation, rigid inclusion, soil stabilization, numerical modeling, PLAXIS 2D.

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur modern, khususnya bandara internasional, merupakan salah satu elemen krusial dalam menopang pertumbuhan ekonomi dan konektivitas suatu negara. Pembangunan dan keberlanjutan operasional fasilitas ini memerlukan perencanaan geoteknik yang sangat matang, terutama di wilayah yang memiliki risiko gempa tinggi dan kondisi tanah yang rentan terhadap fenomena likuifaksi. Indonesia, sebagai negara yang terletak di Cincin Api Pasifik, secara inheren memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi, menjadikannya zona rawan gempa (Kohar & Prihatiningsih, 2020). Fenomena likuifaksi, yang didefinisikan sebagai perubahan material tanah butiran dari kondisi padat menjadi cair akibat peningkatan tekanan air pori saat gempa (Kusumawardani et al., 2023; Mona et al., 2023), telah menjadi ancaman serius bagi stabilitas struktur dan infrastruktur di berbagai wilayah. Ini terbukti dari berbagai kejadian likuifaksi yang menimbulkan dampak masif, seperti di Palu pada tahun 2018 (Syofyan et al., 2022) dan bahkan di Yogyakarta pada tahun 2006 (Kusumawardani et al., 2023).

Yogyakarta International Airport (YIA), yang terletak di Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, merupakan salah satu proyek infrastruktur strategis nasional yang vital. Lokasi pembangunan YIA berada di area pesisir yang seringkali dicirikan oleh endapan tanah aluvial berupa pasir lepas dan muka air tanah dangkal, kondisi yang sangat kondusif bagi terjadinya likuifaksi. Data geoteknik awal di lokasi ini, sebagaimana diindikasikan oleh beberapa studi pendahuluan, menunjukkan adanya lapisan tanah dengan nilai Standard Penetration Test (SPT) yang rendah, berkisar antara $N=2$ hingga $N=12$, pada kedalaman antara 4 hingga 8 meter (Febriyanti et al., 2020). Nilai N -SPT yang rendah ini secara langsung mengindikasikan kepadatan tanah yang lepas, yang sangat rentan terhadap kehilangan kekuatan geser dan deformasi masif ketika terjadi pembebanan siklik akibat gempa bumi. Selain itu, muka air tanah yang dangkal semakin memperburuk potensi likuifaksi karena kondisi jenuh air merupakan prasyarat utama terjadinya fenomena ini (Beddu et al., 2022; He, 2013). Mengingat potensi gempa regional dengan magnitudo signifikan, contohnya 7,5 SR yang pernah terjadi di wilayah tersebut (Febriyanti et al., 2020), risiko likuifaksi di area YIA menjadi perhatian utama yang memerlukan mitigasi efektif guna menjamin keamanan dan keberlanjutan operasional bandara.

Konsekuensi dari likuifaksi sangatlah merusak. Ketika tanah mengalami likuifaksi, ia kehilangan daya dukungnya secara drastis, menyebabkan penurunan tanah (settlement) yang

ekstensif, lateral spreading, bahkan kegagalan struktur yang fatal (Cardina Listiyanti et al., 2022; Kohar & Prihatiningsih, 2020). Untuk struktur sepenting bandara, kegagalan semacam ini dapat berarti kerugian ekonomi yang sangat besar, hilangnya nyawa, dan terganggunya mobilitas regional maupun internasional. Oleh karena itu, identifikasi potensi likuifaksi dan implementasi strategi perbaikan tanah yang tepat adalah langkah esensial dalam tahap perencanaan dan konstruksi infrastruktur di daerah rawan gempa seperti YIA.

Berbagai metode perbaikan tanah telah dikembangkan untuk mengatasi masalah likuifaksi, antara lain vibro-kompaksi, stone column, grouting, dan drainase vertikal (Cardina Listiyanti et al., 2022; Fajarwati & Kusuma, 2021; He, 2013; Ramadhan et al., 2021). Namun, setiap metode memiliki karakteristik, efektivitas, dan batasan biaya yang berbeda, tergantung pada kondisi tanah spesifik, kedalaman lapisan likuifaksi, serta jenis struktur yang akan dibangun. Dalam konteks tanah pasir lepas dan muka air tanah dangkal, seperti yang diduga di YIA, metode perbaikan tanah harus mampu secara efektif meningkatkan kepadatan tanah, mengurangi tekanan air pori berlebih, atau menyediakan jalur drainase yang cepat untuk mencegah build-up tekanan air pori. Salah satu pendekatan yang semakin populer dan menunjukkan efektivitas tinggi dalam mitigasi likuifaksi, terutama untuk aplikasi di bawah fondasi dangkal atau slab, adalah penerapan Rigid Inclusion (RI). Rigid Inclusion adalah kolom kaku yang diinstal ke dalam lapisan tanah yang lemah atau likuifaksi untuk mentransfer beban ke lapisan tanah yang lebih kuat di bawahnya, sekaligus meningkatkan kekakuan massa tanah dan mengurangi potensi deformasi (Abdel Jawad et al., 2022; Polańska & Rainer, 2020).

Penerapan Rigid Inclusion (RI) menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan metode perbaikan tanah lainnya. Pertama, RI dapat secara signifikan meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi settlement pasca-likuifaksi dengan mendistribusikan beban secara lebih merata ke lapisan tanah yang lebih dalam dan stabil (Abdel Jawad et al., 2022). Kedua, RI dapat mengurangi potensi likuifaksi itu sendiri dengan meningkatkan kekakuan lateral massa tanah dan memberikan efek penguatan pada tanah di sekitarnya. Ketiga, metode ini seringkali lebih cepat dan lebih bersih dalam pelaksanaannya dibandingkan dengan metode lain yang membutuhkan penggalian atau penambahan material dalam jumlah besar (Polańska & Rainer, 2020). Meskipun demikian, studi mendalam mengenai efektivitas RI dalam kondisi tanah spesifik di YIA, khususnya untuk mitigasi likuifaksi, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada analisis stabilitas tanah dengan penerapan Rigid Inclusion sebagai solusi mitigasi fenomena likuifaksi di area Yogyakarta International Airport, dengan harapan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap perencanaan geoteknik yang aman dan ekonomis.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji potensi likuifaksi dan metode perbaikan tanah seperti stone column, grouting, maupun drainase vertikal, sebagian besar studi tersebut berfokus pada evaluasi faktor keamanan berbasis pendekatan empiris atau metode simplified procedure. Beberapa penelitian terkait rigid inclusion juga telah menunjukkan peningkatan daya dukung dan reduksi deformasi tanah pada kondisi statik maupun pseudo-statik. Namun demikian, kajian yang secara spesifik mengevaluasi pengaruh variasi jarak rigid inclusion terhadap respons tekanan air pori berlebih (excess pore pressure ratio/RU) dan faktor keamanan (SF) melalui analisis numerik dinamis berbasis time-dependent loading masih terbatas, khususnya pada kondisi tanah pasir lepas jenuh di kawasan pesisir Indonesia.

Selain itu, penelitian terdahulu umumnya tidak mengkaji secara komparatif efektivitas konfigurasi jarak rigid inclusion dalam satu model numerik yang terkontrol, sehingga belum memberikan dasar kuantitatif yang jelas untuk menentukan jarak optimum sebagai parameter desain mitigasi likuifaksi. Pada konteks Yogyakarta International Airport (YIA), yang berada pada endapan aluvial pesisir dengan muka air tanah dangkal dan nilai N-SPT rendah, kajian optimasi jarak rigid inclusion berbasis analisis dinamis dua dimensi belum dilaporkan secara komprehensif dalam literatur.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (research gap) dalam hal evaluasi kinerja rigid inclusion terhadap reduksi rasio tekanan air pori (RU) dan peningkatan faktor keamanan (SF) secara simultan melalui pemodelan numerik dinamis menggunakan PLAXIS 2D dengan variasi jarak pemasangan yang sistematis. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi potensi likuifaksi pada area runway YIA, tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah berupa analisis komparatif variasi jarak rigid inclusion (3 m, 2,5 m, dan 2 m) untuk menentukan konfigurasi yang paling efektif dalam meningkatkan ketahanan tanah terhadap likuifaksi.

Dengan demikian, novelty penelitian ini terletak pada pendekatan optimasi jarak rigid inclusion berbasis parameter respons dinamis tanah (RU dan SF) pada kondisi tanah spesifik bandara pesisir yang berpotensi likuifaksi tinggi, sehingga hasilnya dapat menjadi dasar teknis dalam perencanaan perbaikan tanah yang lebih rasional dan terukur pada infrastruktur strategis.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menganut paradigma positivisme, yang berlandaskan pada pandangan bahwa realitas objektif dapat diukur, dijelaskan, dan diprediksi melalui pendekatan ilmiah yang sistematis (Creswell, 2014). Desain penelitian ini adalah kuantitatif dengan pendekatan eksperimental dan

komparatif. Pendekatan eksperimental dilakukan melalui simulasi numerik untuk menguji hipotesis mengenai efektivitas Rigid Inclusion dalam mengurangi potensi likuifaksi. Simulasi ini memungkinkan kontrol terhadap berbagai variabel seperti karakteristik tanah, geometri Rigid Inclusion, dan parameter gempa (Abdel Jawad et al., 2022).

Lokasi penelitian ini terfokus pada Yogyakarta International Airport (YIA) yang terletak di Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada beberapa pertimbangan krusial. Pertama, YIA merupakan infrastruktur strategis nasional yang rentan terhadap bencana alam, termasuk gempa bumi dan likuifaksi, mengingat lokasinya yang berada di zona seismik aktif Indonesia. Kedua, kondisi geologi dan geoteknik di sekitar YIA diketahui memiliki lapisan tanah aluvial yang didominasi oleh pasir lepas dan lanau, dengan muka air tanah yang relatif dangkal. Karakteristik tanah seperti ini sangat rentan terhadap fenomena likuifaksi ketika terjadi gempa bumi (Beddu et al., 2022)



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini hanya memakai dari data sekunder, yang diperoleh melalui pendekatan teknis dan analitis untuk menunjang proses pemodelan dan analisis likuifaksi serta evaluasi efektivitas metode *rigid inclusion*, dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Data Primer

Jenis Data	Nama Data	Sumber Data
Data SPT	Nilai N-SPT dan klasifikasi tanah	Laporan hasil uji SPT lapangan di area Bandara YIA
Data Muka Air Tanah	Kedalaman muka air tanah	laporan geoteknik proyek
Data Geoteknik	Parameter tanah: kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), E , ν	Laporan hasil laboratorium tanah
Data Seismik	Peak Ground Acceleration (PGA), spektrum respons, magnitude	Studi seismik sebelumnya
Peta Zonasi Gempa	Peta zonasi gempa wilayah DIY dan sekitarnya	Peta gempa Indonesia (PUSGEN 2017)

Pengolahan data numerik diawali dengan pengumpulan data sekunder yang meliputi parameter geoteknik (hasil uji SPT, dan data bor), data seismik (peak ground acceleration, magnitude, dan data percepatan tanah), serta informasi stratigrafi tanah di kawasan Bandara YIA. Data ini kemudian digunakan sebagai input dalam perangkat lunak Plaxis 2D untuk memodelkan kondisi dinamis tanah terhadap beban gempa, baik sebelum maupun sesudah dilakukan perkuatan menggunakan rigid inclusion. Pemodelan dilakukan untuk mensimulasikan respons tanah terhadap gempa, mencakup distribusi tekanan pori berlebih, deformasi, serta potensi terjadinya likuifaksi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembangunan YIA sebagai bandara internasional membutuhkan fondasi yang stabil dan tahan gempa. Mengingat sebagian besar area pembangunannya terdiri dari tanah pasir lepas yang jenuh air, evaluasi potensi likuifaksi menjadi sangat krusial. Referensi historis menunjukkan bahwa Indonesia memiliki riwayat kejadian likuifaksi yang parah, seperti di Palu pada tahun 2018 (Syofyan et al., 2022) dan di Yogyakarta pada tahun 2006 (Kusumawardani et al., 2023). Hal ini menegaskan pentingnya mitigasi yang efektif. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji penerapan Rigid Inclusion (RI) sebagai salah satu metode perbaikan tanah yang potensial untuk mengurangi risiko likuifaksi dan meningkatkan stabilitas fondasi di YIA. Rigid Inclusion merupakan metode perbaikan tanah yang melibatkan instalasi elemen kolom kaku, umumnya terbuat dari beton, ke dalam lapisan tanah yang rentan likuifaksi. Metode ini bertujuan untuk mentransfer beban dari struktur atas ke lapisan tanah yang lebih kuat di bawahnya, serta meningkatkan kekakuan dan kekuatan tanah secara keseluruhan (Polanska & Rainer, 2020).

3.1 Parameter Penelitian

Analisis pada area runway Bandara YIA mengacu pada parameter tanah yang diadopsi dari penelitian TDA Asyiffa (2020) berbasis Cone Penetration Test (CPT) untuk evaluasi potensi likuifaksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa likuifaksi teridentifikasi pada lapisan tanah dangkal, yang menandakan tingginya kerentanan tanah permukaan terhadap pembebanan gempa. Parameter tanah hasil pengolahan data tersebut selanjutnya digunakan sebagai input pemodelan numerik pada perangkat lunak PLAXIS. Berdasarkan klasifikasi tanah, lapisan pada kedalaman 0–5 m merupakan tanah pasir dengan kondisi sangat lepas hingga sedang, yang memiliki potensi likuifaksi tinggi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Parameter Lapisan Tanah

No.	Kedalaman (m)	D	Konsistensi	Material Model	NSPT	E (kN/m ²)	V	Cc	Cs	c' (kN/m ²)	φ' (°)	ksat (m/day)	e _{init}	Y _{unsat}	Y _{sat}
1	0 - 1	1	Very Loose Sand	Mohr Coulumb	4	6000	0.3	-	-	0	25	1.10E-02	1.2	12	14
2	1 - 5	4	Medium Dense Sand	Mohr Coulumb	20	20000	0.3	-	-	0	32	8.60E-02	0.8	16	18
3	5 - 10	5	Very Dense Sand	Mohr Coulumb	51	76500	0.3	-	-	0	38	2.15E-03	0.4	17	19

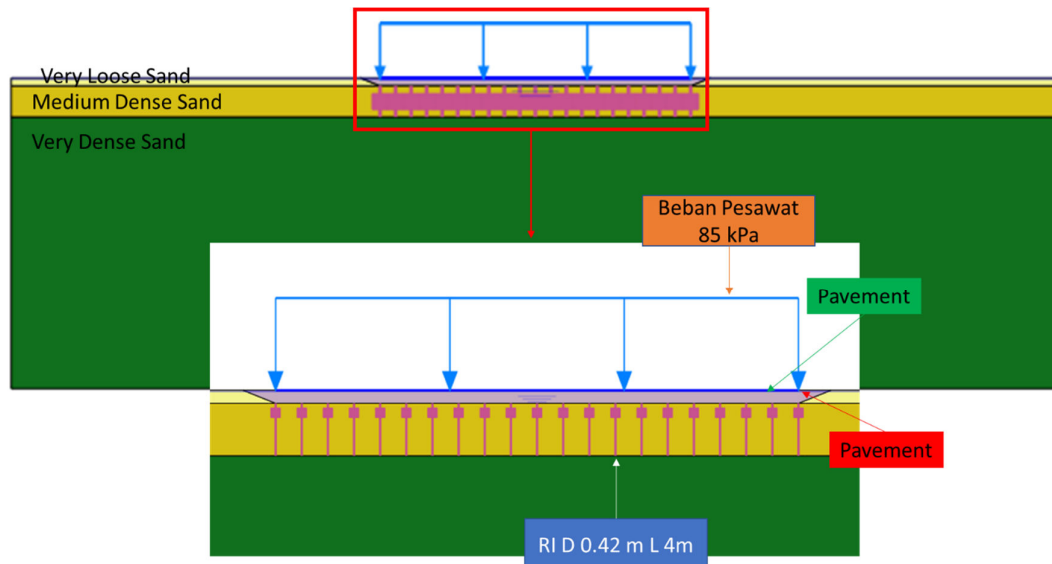
Two Endo M Apriadi, Agus Sulaeman - 52

Analisis Stabilitas Tanah dengan Penerapan Rigid Inclusion Pada Fenomena Likuifaksi ...

Pembebanan gempa dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan nilai Peak Ground Acceleration (PGA) dengan probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun yang mengacu pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017). Nilai PGA yang digunakan pada lokasi runway Bandara YIA sebesar 0,30 g, dan diterapkan sebagai input beban gempa dalam pemodelan numerik menggunakan PLAXIS.

3.2 Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dalam penelitian ini dilakukan secara dua dimensi (2D) menggunakan PLAXIS 2D, yang dinilai memadai untuk menganalisis respons penampang melintang tanah dan rigid inclusion secara efisien dengan akurasi yang representatif terhadap kondisi planar. Untuk mendukung proses pemodelan, geometri dan tahapan konstruksi terlebih dahulu dibuat menggunakan AutoCAD, kemudian disimpan dalam format DXF dan diimpor ke dalam PLAXIS. Model penampang runway memiliki lebar 45 m, dengan rigid inclusion berdiameter 42 cm dan jarak center-to-center (c/c) 2,5 m, yang digunakan sebagai konfigurasi dasar dalam analisis.

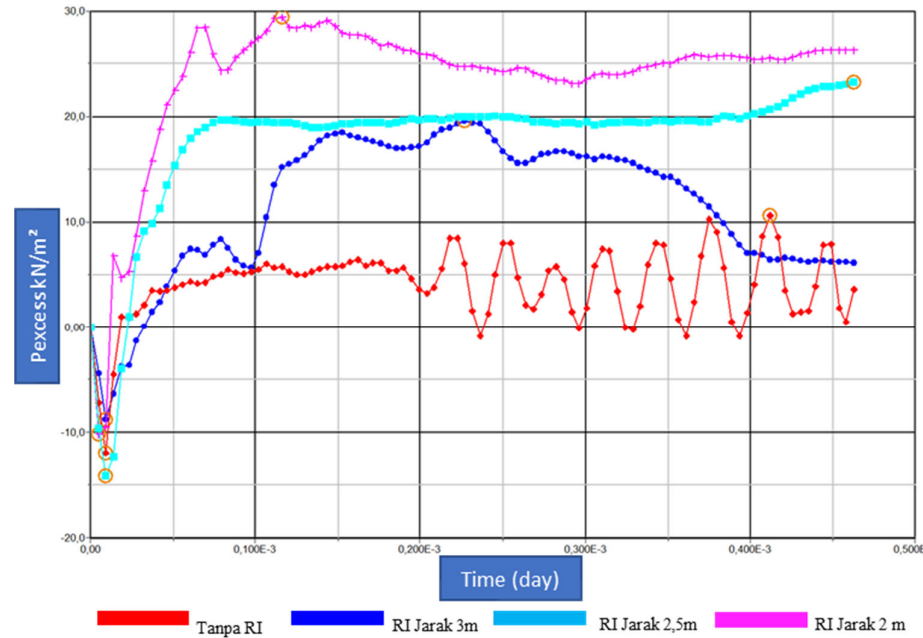


Gambar 2. Permodelan Plaxis

3.3 Output dari Permodelan Plaxis

Dalam perhitungan pada permodelan ada 4 percobaan yang dilakukan pada percepatan gempa 0.3 g, variasi perkuatan yang digunakan yaitu tanpa RI, Jarak RI 2 m, Jarak RI 2.5 m dan Jarak RI 3 m. Hasil analisis excess pore pressure (P_{excess}) dan Principal Effective Stress (σ_3). Berikut adalah hasil dari beberapa variasi perkuatan RI.

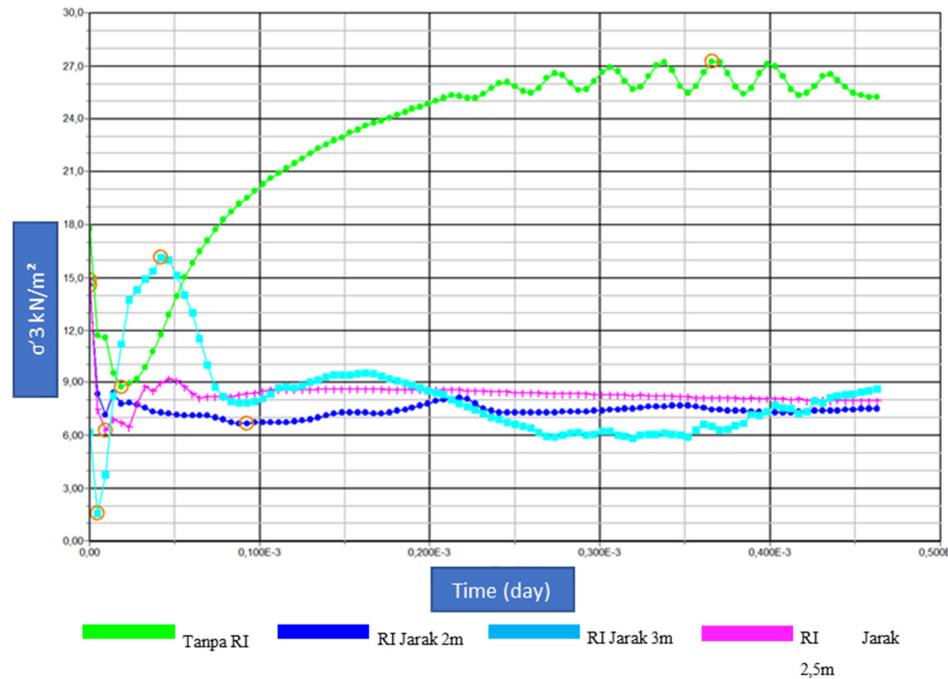
1. Hubungan P_{excess} vs Waktu



Gambar 3. P_{excess} vs Waktu

Grafik menunjukkan bahwa pemasangan RI secara signifikan meningkatkan dan menstabilkan nilai tekanan air pori berlebih (P_{excess}) terhadap waktu dibandingkan kondisi tanpa RI. Pada kondisi tanpa RI, P_{excess} relatif rendah dan berfluktuasi tajam, menandakan respons tanah yang tidak stabil. Pemasangan RI dengan jarak 3 m meningkatkan P_{excess} namun masih menunjukkan penurunan di waktu akhir, sedangkan jarak 2,5 m menghasilkan nilai yang lebih tinggi dan cenderung stabil. Nilai P_{excess} tertinggi dan paling stabil diperoleh pada RI dengan jarak 2 m, yang menunjukkan bahwa semakin rapat jarak RI, semakin efektif sistem dalam mempertahankan dan mendistribusikan tekanan air pori berlebih.

2. Hubungan Tegangan Efektif Horizontal vs Waktu



Gambar 4. *Principal Effective Stress σ_3 vs Waktu*

Grafik hubungan σ_3 terhadap waktu menunjukkan bahwa kondisi tanpa RI menghasilkan nilai σ_3 paling tinggi dan terus meningkat hingga mencapai kisaran $\pm 25\text{--}27 \text{ kN/m}^2$, yang menandakan tegangan lateral tanah berkembang bebas tanpa pengendalian. Sebaliknya, pemasangan RI secara signifikan menurunkan dan menstabilkan nilai σ_3 . RI dengan jarak 2 m menunjukkan nilai σ_3 terendah dan paling stabil, diikuti oleh RI jarak 2,5 m dan 3 m yang masih memperlihatkan fluktuasi lebih besar. Hasil ini menegaskan bahwa semakin rapat jarak RI, semakin efektif pengendalian tegangan lateral tanah, sehingga deformasi dan ketidakstabilan dapat diminimalkan.

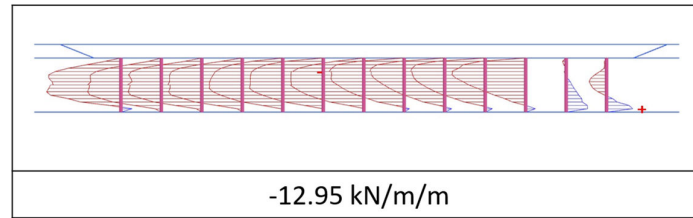
3. Kapasitas Lentur Rigid Inclusion

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan PLAXIS, diperoleh output gaya dalam pada elemen rigid inclusion berupa gaya aksial dan momen lentur. Nilai momen lentur maksimum ($M_{\max}$) dievaluasi dari hasil embedded beam force pada kondisi pembebanan kombinasi beban runway dan beban gempa, yang selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi kapasitas lentur rigid inclusion sebagai elemen beton bertulang.

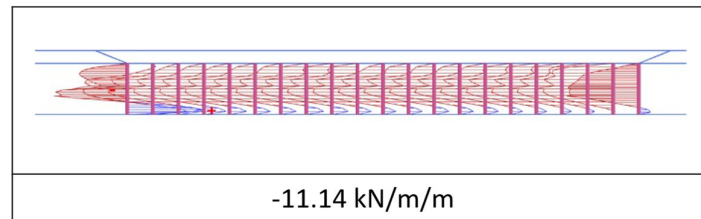
$$A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (0,4)^2}{4} = 0,126 \text{ m}^2$$

Rigid inclusion direncanakan dengan diameter 40 cm, sehingga luas penampang beton dihitung sebesar $A = 0,126 \text{ m}^2$, sedangkan modulus penampang penampang lingkaran diperoleh sebesar $W = 0,00628 \text{ m}^3$. Dengan mutu beton $f'_c = 30 \text{ MPa}$ dan kontribusi tulangan longitudinal, kapasitas momen rencana rigid inclusion diperoleh sebesar $\pm 175 \text{ kN}\cdot\text{m}$.

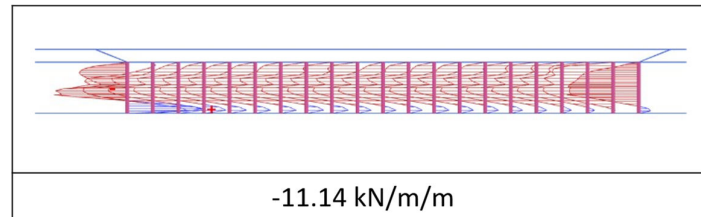
$$W = \frac{\pi D^3}{32} = \frac{\pi (0,4)^3}{32} = 0,00628 \text{ m}^3$$



Gambar 5. Output Bending Moment RI jarak 3 m



Gambar 6. Output Bending Moment RI jarak 2 m



Gambar 7. Output Bending Moment RI jarak 2.5 m

Hasil analisis PLAXIS untuk seluruh variasi jarak rigid inclusion menunjukkan bahwa momen lentur maksimum yang terjadi lebih kecil dari kapasitas momen rencana, sehingga seluruh elemen rigid inclusion masih berada dalam kondisi elastis. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rigid inclusion tidak mengalami retak (*cracking*) dan aman secara struktural terhadap kombinasi beban yang bekerja.

3.4 Rekapitulasi Hasil

Hasil rekapitulasi menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi tanpa rigid inclusion dan rigid inclusion dengan jarak 3 m dalam mengendalikan respons tekanan air pori akibat pembebanan gempa. Pada kondisi tanpa perkuatan, nilai P_{excess} meningkat dari $1,00 \text{ kN/m}^2$ hingga $26,60 \text{ kN/m}^2$, yang menyebabkan $U_0 + P_{\text{excess}}$ mencapai $25,52 \text{ kN/m}^2$. Kondisi ini menghasilkan RU maksimum sebesar 4,90 dan SF minimum 0,20, yang mengindikasikan kondisi

tanah sangat tidak stabil dan berpotensi tinggi mengalami likuifaksi.

Sebaliknya, penerapan rigid inclusion jarak 3 m mampu menekan Pexcess secara signifikan pada rentang 0,00–10,64 kN/m², dengan $U_0 + \text{Pexcess}$ maksimum 19,47 kN/m². Nilai RU maksimum hanya 0,90, seluruhnya berada di bawah ambang likuifaksi, sementara SF meningkat hingga 3,03, yang menunjukkan kondisi tanah berada dalam kategori aman.

Secara kuantitatif, rigid inclusion jarak 3 m mampu menurunkan RU lebih dari 80% dan meningkatkan SF lebih dari lima kali lipat dibandingkan kondisi tanpa perkuatan. Hasil ini menegaskan bahwa rigid inclusion efektif dalam mereduksi tekanan air pori berlebih dan meningkatkan kestabilan tanah, khususnya pada area di luar elemen perkuatan.

Tabel 3. Hasil Perhitungan RU dan SF Tanpa Rigid dan Rigid Jarak 3m

no	Time	U_0	Pexcess Tanpa RI	Tanpa RI	Pexcess 3 m	3 m
	(Day)	kpa	(kN/m ²)		(kN/m ²)	
1	1,85E-05	8,83	1,002	8,766	1,040	6,875
2	9,72E-05	8,83	5,316	19,933	5,744	8,432
3	2,50E-04	8,83	8,047	25,875	16,687	8,425
4	3,75E-04	8,83	10,316	26,601	10,641	8,128
5	4,63E-04	8,83	3,676	25,228	0,000	7,949

Tabel 4. Hasil Perhitungan RU dan SF Tanpa Rigid dan Rigid Jarak 3m (lanjutan)

$U_0 + \text{Pexcess}$ Tanpa RI	$U_0 + \text{Pexcess}$ 3 m	RU		SF	
		Tanpa RI	3 m	Tanpa RI	3 m
9,831	9,869	0,89	0,70	1,12	1,44
14,145	14,573	1,41	0,58	0,71	1,73
16,876	25,516	1,53	0,33	0,65	3,03
19,145	19,470	1,39	0,42	0,72	2,40
5,153	8,829	4,90	0,90	0,20	1,11

Tabel 5. Hasil Perhitungan RU dan SF Rigid Jarak 2m dan Rigid Jarak 2,5m

no	Time	U_0	Pexcess 2.5 m	2.5 m	Pexcess 2 m	2 m
	(Day)	kpa	(kN/m ²)		(kN/m ²)	
1	1,85E-05	8,83	1,044	7,876	4,721	11,191
2	9,72E-05	8,83	19,454	6,705	26,964	7,923
3	2,50E-04	8,83	19,991	7,292	24,337	6,613
4	3,75E-04	8,83	19,841	7,407	25,805	6,545
5	4,63E-04	8,83	0,000	7,537	0,000	8,660

Tabel 6. Hasil Perhitungan RU dan SF Rigid Jarak 2m dan Rigid Jarak 2,5m (Lanjutan)

$U_0 + \text{Pexcess}$ 2.5 m	$U_0 + \text{Pexcess}$ 2 m	RU		SF	
		2.5 m	2 m	2.5 m	2 m
9,873	13,550	0,80	0,83	1,25	1,21
28,283	35,793	0,24	0,22	4,22	4,52
28,820	33,166	0,25	0,20	3,95	5,02
28,670	34,634	0,26	0,19	3,87	5,29
8,829	8,829	0,85	0,98	1,17	1,02

Hasil rekapitulasi menunjukkan perbedaan respons tanah yang jelas antara rigid inclusion jarak 2,5 m dan 2 m dalam mengendalikan tekanan air pori selama pembebanan gempa. Pada jarak 2,5 m, nilai Pexcess masih relatif tinggi dengan maksimum 19,99 kN/m², sehingga $U_0 + \text{Pexcess}$ mencapai 28,82 kN/m². Kondisi ini menghasilkan RU pada rentang 0,24–0,85 dan SF sebesar 1,17–4,22, yang menunjukkan kondisi tanah umumnya aman namun dengan tingkat keamanan yang

masih berfluktuasi pada beberapa tahap waktu.

Sebaliknya, rigid inclusion dengan jarak 2 m menunjukkan kinerja yang lebih efektif dengan P_{excess} yang lebih rendah pada rentang 6,55–7,54 kN/m². Meskipun nilai $U_0 + P_{\text{excess}}$ maksimum mencapai 35,79 kN/m², nilai RU tetap terkontrol pada rentang 0,19–0,98 dan tidak melampaui ambang likuifaksi. Sejalan dengan itu, nilai SF meningkat signifikan hingga 5,29, yang menunjukkan tingkat kestabilan tanah tertinggi dibandingkan variasi lainnya.

Secara kuantitatif, penerapan rigid inclusion dengan jarak 2 m mampu menurunkan RU sekitar 20% dan meningkatkan SF lebih dari 35% dibandingkan jarak 2,5 m. Hasil ini menegaskan bahwa jarak rigid inclusion yang lebih rapat memberikan efektivitas mitigasi likuifaksi yang lebih optimal, khususnya pada area tanah di luar elemen perkuatan.

3.5. Diskusi Hasil

Secara mekanistik, efektivitas rigid inclusion dalam mereduksi potensi likuifaksi tidak semata-mata disebabkan oleh penurunan nilai tekanan air pori berlebih, tetapi terutama oleh peningkatan kekakuan sistem tanah secara keseluruhan dan redistribusi tegangan akibat adanya elemen kolom kaku. Pemasangan rigid inclusion meningkatkan modulus komposit tanah–kolom, sehingga beban gempa tidak sepenuhnya ditransfer ke matriks tanah pasir lepas, melainkan sebagian dialihkan ke elemen kolom yang lebih kaku. Kondisi ini menghasilkan peningkatan tegangan efektif tanah di antara kolom dan membatasi perkembangan deformasi geser siklik yang memicu pembentukan tekanan air pori berlebih. Semakin rapat jarak rigid inclusion, semakin besar rasio kekakuan sistem komposit, sehingga mekanisme redistribusi tegangan dan pembatasan deformasi menjadi lebih efektif.

Perlu ditegaskan bahwa parameter yang dievaluasi dalam penelitian ini adalah excess pore pressure (P_{excess}) dan rasio tekanan air pori (RU). Pada beberapa grafik, terlihat bahwa nilai P_{excess} lokal pada zona tertentu dapat meningkat setelah pemasangan rigid inclusion. Namun, peningkatan lokal tersebut tidak serta-merta mengindikasikan peningkatan risiko likuifaksi. Hal yang menjadi indikator utama potensi likuifaksi adalah rasio RU (perbandingan tekanan air pori berlebih terhadap tegangan efektif awal). Hasil menunjukkan bahwa meskipun terdapat redistribusi tekanan air pori secara spasial, nilai RU secara keseluruhan menurun signifikan dan tetap berada di bawah ambang likuifaksi pada konfigurasi rigid inclusion, khususnya pada jarak 2 m. Dengan demikian, interpretasi mitigasi likuifaksi didasarkan pada kontrol terhadap RU dan peningkatan faktor keamanan (SF), bukan semata-mata pada nilai absolut P_{excess} di titik tertentu.

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme redistribusi tegangan, di mana rigid inclusion bertindak sebagai elemen pemikul beban utama, sehingga tegangan efektif tanah di

sekitarnya tetap terjaga meskipun terjadi fluktuasi tekanan air pori lokal.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan pada studi-studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa kolom kaku atau rigid inclusion mampu meningkatkan kestabilan tanah likuifaktif melalui peningkatan kekakuan komposit dan pengurangan deformasi lateral. Studi terdahulu umumnya melaporkan peningkatan faktor keamanan dan reduksi potensi deformasi pasca-likuifaksi pada tanah pasir jenuh yang diperkuat kolom kaku. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut tidak melakukan evaluasi komparatif variasi jarak secara sistematis dalam satu model numerik yang terkontrol, serta tidak secara simultan menganalisis parameter RU dan SF dalam kondisi pembebanan dinamis berbasis waktu.

Dalam konteks tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan berupa evaluasi kuantitatif pengaruh variasi jarak rigid inclusion (3 m, 2,5 m, dan 2 m) terhadap respons dinamis tanah, sehingga memberikan dasar yang lebih rasional dalam penentuan konfigurasi desain.

Dari sudut pandang perencanaan geoteknik, hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi jarak rigid inclusion berpengaruh signifikan terhadap ketahanan tanah terhadap likuifaksi. Peningkatan faktor keamanan hingga lebih dari lima kali lipat pada konfigurasi jarak 2 m menunjukkan bahwa pendekatan berbasis analisis numerik dinamis dapat digunakan sebagai dasar kuantitatif dalam menentukan jarak desain yang efisien. Hal ini penting terutama untuk infrastruktur strategis seperti runway bandara yang menuntut kinerja tanah yang stabil terhadap beban siklik berulang.

Meskipun hasil menunjukkan tren yang konsisten secara mekanistik, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Model yang digunakan merupakan pendekatan *plane strain*, sehingga tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi tiga dimensi sistem rigid inclusion yang sebenarnya. Interaksi spasial antar kolom dalam arah memanjang tidak dimodelkan secara eksplisit. Penggunaan model Mohr-Coulomb memberikan pendekatan konservatif, namun belum secara eksplisit memodelkan perilaku siklik lanjutan seperti degradasi kekakuan atau akumulasi regangan permanen.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan PLAXIS, dapat disimpulkan bahwa potensi likuifaksi pada kawasan Bandara YIA tanpa perkuatan tergolong tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh terbentuknya excess pore pressure (P_{excess}) yang sangat besar hingga 373,6 kN/m², nilai rasio tekanan pori (RU) > 1, serta faktor keamanan (SF) < 1, yang mengindikasikan hilangnya tegangan efektif tanah akibat pembebanan gempa dan kondisi tanah yang sangat tidak

stabil.

Selanjutnya, hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan rigid inclusion efektif dalam menurunkan potensi likuifaksi dan meningkatkan kestabilan tanah. Penggunaan rigid inclusion mampu mereduksi P_{excess} , menjaga RU tetap di bawah ambang likuifaksi, serta meningkatkan SF secara signifikan. Variasi jarak rigid inclusion 2 m memberikan kinerja paling optimal dengan P_{excess} terendah sebesar $\pm 26,97 \text{ kN/m}^2$, RU minimum sekitar 0,19, dan SF maksimum mencapai $\pm 5,29$, yang menunjukkan tingkat keamanan tertinggi terhadap likuifaksi, khususnya pada area tanah di luar elemen perkuatan.

Berdasarkan hasil analisis numerik dinamis menggunakan PLAXIS 2D, dapat disimpulkan bahwa tanah pada area runway Yogyakarta International Airport memiliki potensi likuifaksi yang tinggi pada kondisi tanpa perkuatan. Hal ini ditunjukkan oleh rasio tekanan air pori (RU) yang melebihi 1,0 serta faktor keamanan (SF) yang kurang dari 1,0, yang mengindikasikan hilangnya tegangan efektif tanah akibat pembebanan gempa sebesar 0,30 g.

Penerapan rigid inclusion terbukti efektif dalam meningkatkan kestabilan tanah dan mereduksi potensi likuifaksi. Semakin rapat jarak rigid inclusion, semakin besar peningkatan kekakuan sistem komposit tanah-kolom, sehingga perkembangan tekanan air pori dapat dikendalikan dan faktor keamanan meningkat secara signifikan. Konfigurasi jarak 2 m menunjukkan kinerja paling optimal dengan penurunan RU hingga 0,19 dan peningkatan SF mencapai 5,29, yang menunjukkan kondisi tanah berada dalam kategori aman terhadap likuifaksi.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi komparatif variasi jarak rigid inclusion berbasis parameter respons dinamis tanah (RU dan SF) dalam satu model numerik terkontrol. Pendekatan ini memberikan dasar kuantitatif dalam menentukan konfigurasi jarak yang lebih rasional pada perencanaan perbaikan tanah di kawasan bandara yang berada pada zona rawan gempa dan tanah pasir jenuh.

Dari sudut pandang perencanaan geoteknik, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dalam optimasi desain perkuatan tanah pada infrastruktur runway, khususnya dalam menentukan jarak rigid inclusion yang efisien dan efektif untuk meningkatkan ketahanan terhadap beban gempa.

Sebagai pengembangan lebih lanjut, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan pendekatan pemodelan tiga dimensi (3D) guna menangkap interaksi spasial antar kolom secara lebih representatif, serta melakukan validasi lapangan atau uji skala model untuk meningkatkan reliabilitas hasil numerik terhadap kondisi aktual di lapangan.

Referensi

- Beddu, A., Rahainun, R., Fadliah, I., & Rahayu, A., (2022). Pengaruh Tinggi Muka Air Terhadap Deformasi Tanah Terlikuifaksi. *Engineering Journal*.
- BM, D. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik)*. Penerbit Erlangga.
- Bowles, J. E. (1989). *Sifat-sifat fisis dan Geoteknis Tanah*. Erlangga. Jakarta.
- Fachriansyah, I., & Raihan, S.,(2025). Geotechnical Investigation to Predict of Liquefaction Potential in Gunung Panglun Area, Padang City. *Bentang: Jurnal Teoritis*.
- Fajarwati, Y., & Kusuma, R. I. (2021). Analisis Potensi Likuifaksi dan Perbaikan Tanah dengan Stone Column: Studi Kasus pada Coal Shelter PLTU Lontar, Banten. *Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil*.
- Gunawan, S., Wijaya, W., Pratama, G. M., & Handoko, L., (2023). Analisa Pondasi dan Potensi Likuifaksi Pembangunan Laboratorium dan Gedung Fakultas Universitas Atma Jaya Yogyakarta. *Jurnal Atma*
- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Analisis dan Perancangan Fondasi I*. Gadjah Mada University Press.
- Jawad, H., Mashhour, I. M., Akl, S. A. Y., (2023). Effectiveness of concrete rigid inclusions for coastal reclaimed liquefiable soils. *Ain Shams Engineering*.
- Jiménez, G. A. L., Dias, D., & Jenck, O. (2019). Effect of the soil–pile–structure interaction in seismic analysis: case of liquefiable soils. *Acta Geotechnica*.
- Kusumawardani, R., Upomo, T. C., & Nugroho, U., (2023). Evaluasi Likuifaksi Pasir Silika Rembang Melalui Uji Triaksial Consolidated Undrained. *Jurnal Teknik*.
- Listiyanti, C., Setiyarto, Y. D., & Meiwa, S. (2022). Analisis Metode Perbaikan Stone Column Di Tanah Pasir Lepas Pada Zona Potensi Likuifaksi. *CRANE: Civil Engineering*.
- Maharani, I. A. (2024). Analisis Potensi Likuifaksi dan Daya Dukung Fondasi Tanah Berdasarkan Data n-Spt (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Gedung Informatika Politeknik Negri Cilacap).
- Mona, N., Yunita, H., & Setiawan, B. (2023). Analisis Potensi Likuifaksi dengan Data SPT Menggunakan Metode Simplified Procedure dan Kishida. *Journal of The Civil Engineering*.
- Munsir, D. A. F., Manoppo, F. J., & Rondonuwu, S. G. (2024). Analisis Fondasi Tiang Bor Dan Fondasi Rakit Di Tanah Berpotensi Likuifaksi (Studi Kasus: Daerah Pinggiran Jembatan Megawati Kota Manado). *TEKNO*.
- Polańska, B., & Rainer, J. (2020). Rigid inclusion ground improvements as an alternative to pile foundation. *IOP Conference Series: Materials Science*.
- Saputra, Z. A. E., & Susanto, T. A. (2023). Perancangan Rigid Inclusion Untuk Mengurangi Dampak Likuifaksi Sirkuit Mandalika. repository.unissula.ac.id.
- Syofyan, M. F., Arudia, Y. P., Rahardjo, P. P., & Karlinasari, R. (2022). Case Study and Numerical Modeling for Liquefaction of Soil with Three Possible Phenomenons Cause of Liquefaction. researchsquare.com.
- Syofyan, M. F., Triyatmojo, A., & Karlinasari, R. (n.d.). Soil Improvement due to Liquefaction in Earthquake Prone Locations for the Mandalika Circuit. Researchgate.Net.

- Magister Teknik Sipil UNJANI. (2025). Informasi Program Studi dan Pedoman Akademik. Diakses dari <https://magistersipil.unjani.ac.id/>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1966). 1966: Soil mechanics in engineering practice, New York: John Wiley.
- Zaenudin, Z., & Wulandari, S. (2021). Kajian potensi likuifaksi menggunakan metode penetration test dan indeks keandalan. Jurnal Ilmiah Desain.