

Pemodelan numerik 1D dan 2D dalam analisis potensi likuefaksi berdasarkan rasio tekanan air pori

Rahma Apriyani^{1,*}, Fikri Faris¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Liquefaction
Numerical modeling
Plaxis 2D
Pore water pressure ratio

Corresponding Author:

Rahma Apriyani
rahmaapriyani@mail.ugm.ac.id

Abstract

The Bantul Earthquake in 2006 triggered liquefaction phenomena in Bantul, Sleman, and Klaten. Section 1 of the Yogyakarta – Bawen Toll Road construction with at-grade and elevated road structures is located in Sleman, which is categorized as a zone of moderate susceptibility to liquefaction. The elevated road is constructed above the Selokan Mataram, an irrigation canal with historical and cultural heritage of Keraton Yogyakarta. The P-28 structure, as one of the closest to the irrigation canal wall was selected as the study location for liquefaction potential analysis because the presence of the irrigation canal near the structure significantly increases the excess pore water pressure ratio, which may trigger liquefaction. Liquefaction potential analysis based on the excess pore water pressure ratio was analyzed using the empirical method by Yegian and Vitelli (1981) and using one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) as numerical methods with numerical modeling approaches based on the PM4Sand constitutive model in PLAXIS 2D. The results show that the empirical method is more conservative in estimating the excess pore water pressure ratio (r_u) because the increase in the r_u is only based on the safety factor. The results of the 1D and 2D numerical modeling showed that the distribution of the increase in $r_u > 0.8$ was significantly different in each soil layer. 2D modeling is more representative for calculating the increase in $r_u > 0.8$ because it reflects the field conditions at the P-28 location which has differences in thickness within similar soil layers and includes the existing irrigation canal which can increase the liquefaction potential.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Pada bulan Januari tahun 2026, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menginformasikan bahwa telah terjadi gempa bumi dengan magnitudo sebesar 4,4 Mw dengan sumber gempa di kedalaman 11 km dan berlokasi sekitar 15 km Timur Laut dari Kabupaten Bantul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Pergerakan dari aktivitas tektonik yang terjadi pada Sesar Opak adalah pemicu terjadinya gempa bumi yang getarannya dapat dirasakan pada intensitas III MMI.

Tahun 2006, aktivitas pergerakan Sesar Opak juga pernah menyebabkan gempa bumi di Kabupaten Bantul dengan kekuatan gempa sebesar 6,3 Mw di kedalaman 17 km dengan skala intensitas mencapai VIII MMI.

Beberapa peristiwa gempa bumi yang pernah terjadi di Provinsi DIY menjadikan wilayah ini termasuk dalam kategori kawasan rawan bencana gempa bumi kategori menengah hingga tinggi menurut Atlas Kawasan Rawan Bencana Gempa Bumi (KRBG) Indonesia (Badan Geologi, 2026). Badan Geologi juga mengidentifikasi

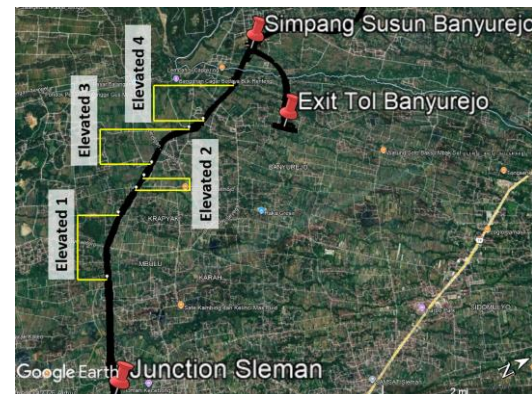
adanya fenomena likuefaksi yang terjadi di Kabupaten Bantul, Sleman, dan Klaten sebagai dampak dari Gempa Bantul.

Likuefaksi adalah perubahan perilaku tanah pasir bersih, pasir berlanau longgar dan jenuh yang semula padat menjadi cair akibat kehilangan kekuatannya yang disebabkan oleh peningkatan tekanan air pori berlebihan saat gempa bumi terjadi (Hardiyatmo, 2024). Tegangan efektif yang hilang akibat meningkatnya tekanan air pori saat gempa bumi dapat mengakibatkan kegagalan hingga runtuhnya fondasi dan struktur bangunan (Zakariya et al., 2023), sehingga Kabupaten Sleman sebagai salah satu wilayah yang mengalami fenomena likuefaksi perlu mendapatkan pertimbangan yang penting dalam perencanaan infrastruktur.

Kabupaten Sleman merupakan salah satu kawasan yang mengalami perkembangan infrastruktur cukup pesat, hal ini ditandai dengan adanya upaya dalam peningkatan konektivitas melalui Pembangunan Jalan Tol Yogyakarta – Bawen. Pembangunan jalan tol yang memiliki 6 seksi ini termasuk dalam Proyek Strategis Nasional.

Pembangunan Seksi 1 melintas di wilayah Kabupaten Sleman sepanjang 8,8 km dimulai dari *Junction* Sleman yang berada di Kecamatan Mlati hingga Simpang Susun Banyurejo di Kecamatan Tempel seperti yang disajikan pada Gambar 1. Pada pembangunan Seksi 1 (STA 75+820 – STA 68+000) terdapat pekerjaan struktur jalan *at grade* dan jalan *elevated*. Struktur jalan *elevated* berupa struktur portal yang bentang utamanya dibangun melintas di atas saluran irigasi yang merupakan situs bersejarah budaya Keraton Yogyakarta yaitu Selokan Mataram. Pada Seksi 1, jalan *elevated* dibuat menjadi empat bagian jalan *elevated* dengan menyesuaikan trase jalan yang melewati area saluran irigasi. Pada beberapa badan jalan melintas tepat di atas saluran irigasi dan sebagiannya yang lain berada di samping saluran irigasi. Pembangunan ini melintasi beberapa wilayah yang termasuk dalam zona kerentanan likuefaksi tingkat

sedang berdasarkan Atlas Zona Kerentanan Likuefaksi yang dibuat oleh Badan Geologi pada tahun 2019. Berdasarkan informasi tersebut menunjukkan bahwa area struktur jalan *elevated* khususnya yang berada dekat dengan saluran irigasi perlu ditinjau lebih serius mengenai adanya potensi likuefaksi.



Gambar 1. Trase Jalan Tol Yogyakarta – Bawen Seksi 1 (Google Earth, 2026) dimodifikasi

Beberapa peneliti telah melakukan analisis potensi likuefaksi menggunakan pendekatan semi-empiris maupun pendekatan berdasarkan kenaikan rasio tekanan air pori (r_u) dengan metode analitis atau metode numerik.

Penelitian potensi likuefaksi sepanjang trase Jalan Tol Yogyakarta – Bawen dilakukan oleh Setiadi et al., (2024) dengan metode *simplified procedure* (Boulanger & Idriss, 2014). Kondisi muka air tanah yang dangkal secara langsung menurunkan tegangan efektif *overburden* tanah yang memengaruhi tingkat kerentanan likuefaksi.

Perbandingan nilai r_u yang diperoleh dari metode semi-empiris dengan metode numerik telah diteliti oleh Rahman et al., (2025). Nilai r_u dengan metode semi-empiris menggunakan *simplified procedure* dalam bentuk r_u melalui persamaan (Yegian & Vitelli, 1981) dibandingkan terhadap nilai r_u dengan metode numerik yang menggunakan DEEPSOIL v7 dan pemodelan 1D kolom tanah pada Plaxis 2D dengan material model PM4Sand. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode semi-empiris menghasilkan kedalaman lapisan dengan $r_u > 0,8$ lebih

dalam dibandingkan metode numerik, karena pada metode semi-empiris menggunakan nilai percepatan maksimum yang seragam, sehingga perilaku tanah selama ada pembebanan gempa tidak sepenuhnya diperhitungkan.

Saputri et al., (2024) melakukan pemodelan numerik untuk mengetahui potensi likuefaksi di kawasan pesisir Mamuju, Sulawesi Barat dengan menggunakan Plaxis 2D. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa lapisan tanah yang berperilaku seperti pasir yaitu pasir berlempung (SM) dan lanau berpasir (ML) berpotensi mengalami likuefaksi. Lapisan tanah dengan kepadatan relatif (D_R) lebih rendah menunjukkan peningkatan tekanan air pori yang lebih signifikan sehingga lebih rentan mencapai kondisi likuefaksi dibandingkan lapisan dengan D_R lebih tinggi.

Studi ini melakukan analisis potensi likuefaksi pada salah satu struktur *pier* jalan *elevated* yang terdekat dengan dinding saluran irigasi yaitu P-28 yang berada di *elevated* 1 dengan titik koordinat berada di 7°43'56.05" S, 110°17'55.10" E seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi struktur P-28 di *elevated* 1 pada Seksi 1

Analisis dilakukan dengan pemodelan numerik untuk melihat distribusi kenaikan rasio tekanan air pori pada saat gempa terjadi yang dapat memicu terjadinya likuefaksi. Pemodelan numerik dilakukan dalam 1-dimensi (1D) dan 2-dimensi (2D). Pada pemodelan 2D, saluran irigasi eksisting

akan dimasukkan dalam geometri pemodelan karena keberadaan saluran irigasi tersebut dapat memengaruhi kondisi tanah dan struktur di sekitarnya.

Metode Penelitian

Identifikasi awal yang dilakukan adalah memilih salah satu struktur pilar di jalan *elevated* yang berdekatan dengan dinding saluran irigasi di Seksi 1 yaitu P-28. Pemilihan ini dikarenakan keberadaan dari saluran irigasi dapat meningkatkan potensi likuefaksi karena mengingat wilayah tersebut memiliki muka air tanah yang dangkal serta dapat berfluktuasi akibat aliran saluran irigasi yang beroperasi secara bergantian pada kondisi terbuka dan tertutup yang berpotensi menyebabkan perubahan tekanan air pori pada lapisan tanah di sekitar saluran irigasi (Dwiyantoro et al., 2023). Kondisi muka air tanah yang dangkal juga dapat menurunkan tegangan efektif *overburden* ($\sigma'v$) lapisan tanah, sehingga perubahan tegangan dari butiran tanah ke air pori terakumulasi hingga mencapai kondisi kritis pada saat gempa terjadi (Setiadi et al., 2024).

Selanjutnya dilakukan interpretasi kondisi tanah dan kedalaman muka air tanah di lokasi struktur terpilih untuk mengidentifikasi karakteristik lapisan tanah yang berpotensi mengalami likuefaksi berdasarkan data hasil penyelidikan tanah yaitu data *borelog*. Penentuan klasifikasi kelas situs tanah dilakukan di lokasi struktur *pier* yang terpilih berdasarkan nilai rerata ($\bar{N}$) N-SPT menggunakan Pers. (1) sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019. Perhitungan ini dilakukan dengan membagi total ketebalan lapisan tanah (t_i) dengan jumlah hasil pembagian ketebalan masing-masing lapisan tanah terhadap nilai N-SPT ($\frac{t_i}{N_i}$).

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{N_i}} \quad (1)$$

Analisis potensi likuefaksi kemudian dilakukan dengan menggunakan metode semi-empiris yaitu *simplified procedure*

(Boulanger & Idriss, 2014) yang mengevaluasi potensi likuefaksi tiap lapisan tanah berdasarkan data penyelidikan tanah berupa data N-SPT. Metode ini melakukan perbandingan antara *Cyclic Resistance Ratio* (*CRR*) yang merepresentasikan ketahanan tanah dalam menerima beban siklik terhadap *Cyclic Stress Ratio* (*CSR*) sebagai parameter tegangan siklik yang muncul akibat pembebanan gempa berdasarkan besarnya percepatan tanah puncak yang dinyatakan dalam bentuk faktor keamanan seperti pada Pers. (2).

$$SF = \frac{CRR_{M,\sigma'v}}{CSR_{M,\sigma'v}} \quad (2)$$

Lapisan tanah dengan nilai $SF < 1$ mengindikasikan potensi terjadinya likuefaksi, sedangkan lapisan dengan $SF > 1$ diklasifikasikan sebagai lapisan tanah yang tidak terlikuefaksi. Pada metode ini, lapisan tanah yang terlikuefaksi hanya ditunjukkan berdasarkan parameter tanah dan karakteristik beban gempanya, belum menunjukkan bagaimana perubahan kenaikan tekanan air pori dan tegangan efektif yang terjadi pada tanah selama proses pembebanan gempa berlangsung hingga tanah terlikuefaksi.

Analisis r_u diperlukan untuk mengetahui seberapa besar tegangan efektif tanah yang telah tereduksi akibat kenaikan tekanan air pori yang dapat memengaruhi kekuatan tanah pada saat gempa terjadi (Aini et al., 2024). Sehingga, perhitungan potensi likuefaksi dilanjutkan dengan analisis rasio tekanan air pori menggunakan persamaan yang telah dikembangkan oleh Yegian dan Vitelli, (1981) yang menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara nilai faktor keamanan (SF) dan r_u seperti pada Pers. (3) dengan nilai α menggunakan 0,19 dan nilai β yaitu 0,7.

$$r_u = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{1}{SF} \right)^{\frac{1}{2\alpha\beta}} \quad (3)$$

Analisis potensi likuefaksi dengan metode numerik

Metode numerik pada analisis potensi likuefaksi dilakukan dengan pemodelan numerik menggunakan *software* Plaxis 2D untuk memperoleh distribusi r_u yang dapat merepresentasikan potensi likuefaksi apabila terdapat lapisan tanah yang memiliki rasio tekanan air pori lebih dari 0,8. Pemodelan ini menggunakan model konstitutif yang dikembangkan oleh Boulanger & Ziotopoulou, (2024) yaitu PM4Sand karena kemampuannya dalam mensimulasikan peningkatan tekanan air pori akibat beban gempa serta menangkap perubahan tegangan efektif selama gempa berlangsung sehingga model ini sesuai untuk mengetahui lapisan tanah yang rentan terhadap likuefaksi.

Model konstitutif PM4Sand memiliki parameter utama yaitu kepadatan relatif (D_R), koefisien modulus geser (G_0), parameter laju kontraksi (hp_0) dan tekanan atmosfer (pA). Kepadatan relatif (D_R) dapat diperoleh dengan korelasi empiris menggunakan data SPT seperti pada Pers. (4).

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (4)$$

Koefisien modulus geser (G_0) mengontrol besarnya kekakuan geser awal tanah sebelum tanah mengalami deformasi plastis akibat pembebanan gempa. Boulanger & Ziotopoulou, (2024) mengestimasi nilai G_0 menggunakan Pers. (5)

$$G_0 = 167 \sqrt{(N_1)_{60} + 2,5} \quad (5)$$

Parameter hp_0 mengontrol laju kontraksi tanah saat ada pergeseran karena pembebanan gempa. Parameter ini dapat secara langsung memengaruhi kecepatan akumulasi tekanan air pori dan ditentukan pada saat semua parameter lainnya telah disesuaikan karena akan dikalibrasikan terhadap nilai *Cyclic Resistance Ratio* (*CRR*). Nilai tekanan atmosfer (pA) yang digunakan adalah 101,3 kPa.

Selain parameter utama yang diperoleh melalui korelasi dan kalibrasi, terdapat beberapa parameter lain yang nilainya telah ditentukan nilainya oleh Boulanger & Ziotopoulou, (2024). Untuk mengetahui nilai r_u , seluruh lapisan tanah menggunakan kondisi *undrained A* agar tekanan air pori berlebih dapat diperhitungkan dalam analisis selama pembebanan gempa.

Pemodelan numerik

Analisis r_u dengan pemodelan numerik dapat dilakukan di *software* Plaxis 2D. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dalam bentuk model 1D kolom tanah dan model 2D dengan stratigrafi tanah berdasarkan dua titik bor dalam satu pemodelan. Pemodelan 1D dilakukan dengan membuat geometri profil kolom tanah pada masing-masing titik BH-130 dan BH-131 sampai kedalaman 20 meter karena menyesuaikan dengan batas kedalaman untuk tingkat keparahan akibat likuefaksi (Iwasaki et al., 1984).

Geometri pada pemodelan 2D dibuat menggunakan data gambar penampang melintang yang memuat kontur permukaan tanah dan saluran irigasi. Data gambar tersebut diolah menggunakan *software* Autocad untuk membuat stratigrafi tanah berdasarkan dua titik bor dan diimpor ke dalam Plaxis 2D dengan format DXF (.dxf). Tahapan awal (*inital phase*) pada pemodelan 1D menggunakan K_0 *procedure* sedangkan untuk pemodelan 2D dipilih *gravity loading* karena distribusi berat tanah yang beragam akibat kondisi lapisan tanah yang disusun dari dua titik bor menghasilkan stratigrafi tanah yang tidak seragam dan ada penambahan geometri saluran irigasi yang dimodelkan sebagai material *non-porous*.

Pada tahapan beban gempa diaktifkan, batasan deformasi untuk arah X_{min} dan X_{max} dipilih *free*, arah Y_{min} menjadi *fixed*. Batasan dinamik pada pemodelan 1D dan 2D memiliki perbedaan pada arah X, dimana pada model 1D arah X dibuat menjadi *tied degrees of freedom* dan untuk model 2D *free-field* dipilih sebagai batasan dinamik arah X.

Beban gempa berupa data percepatan dari hasil pencocokan spektral dimasukkan sebagai *line displacement* sepanjang garis bawah pemodelan, *displacement* untuk arah X adalah *prescribed displacement* dan arah Y dibuat diam atau kaku sehingga *displacement* diatur menjadi *fixed*.

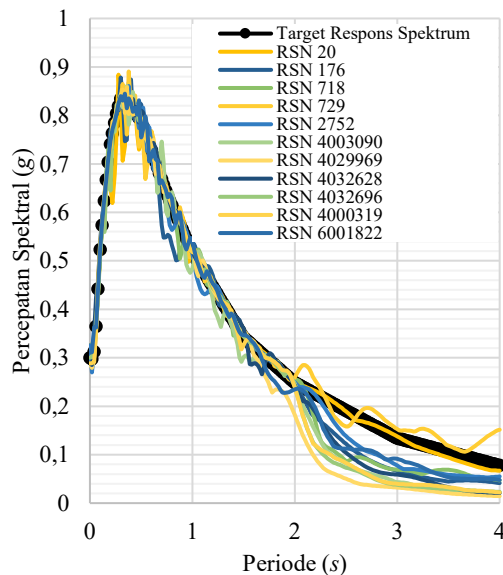
Penentuan PGA dan gerakan tanah

Nilai *peak ground acceleration* (PGA) atau percepatan tanah puncak perlu ditentukan dan disesuaikan dengan kondisi lokasi penelitian karena adanya keterbatasan data rekaman gerakan tanah. Penentuan nilai PGA yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode deterministik dengan bantuan kalkulator dari situs NGA-West2 (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) melibatkan 3 fungsi atenuasi untuk sumber gempa dangkal yaitu Boore-Atkinson NGA (2014), Campbell-Bozorgnia NGA (2014), dan Chiou-Youngs NGA (2014) yang juga menjadi acuan pada Pusat Studi Gempa Nasional atau PUSGEN (2024). Identifikasi sumber gempa yang pernah terjadi di sekitar lokasi berdasarkan data dari PUSGEN (2024) serta jarak dari sumber gempa ke lokasi penelitian diperoleh dari pengukuran menggunakan *Google Earth*. Data tersebut kemudian digunakan sebagai *input* dalam situs NGA-West untuk memperoleh nilai PGA.

Pada metode numerik, rekaman gempa berupa gerakan tanah diperlukan sebagai *input* beban dinamik sehingga perlu disesuaikan dengan target respons spektrum. Pemilihan gerakan tanah menurut SNI 1726:2019 membutuhkan jumlah dan komponen gerak tanah tidak kurang dari 11 pasang gerakan tanah horizontal yang harus dipilih untuk setiap target respons spektrum.

Karakteristik kegempaan di lokasi penelitian disesuaikan berdasarkan SNI 8460:2017 untuk bangunan jembatan konvensional yang memiliki umur rencana selama 75 tahun dengan periode ulang 1000 tahun, acuan ini digunakan untuk memperoleh data dan parameter gempa berupa magnitudo (M_w) dan jarak (R) pada Peta Deagregasi

Bahaya Gempa. Data dan parameter gempa yang telah didapat dari Peta Deagregasi Bahaya Gempa digunakan untuk mencari 11 pasang rekaman gempa melalui situs NGA-West2 untuk sumber gempa *shallow crustal* dan pemilihan sumber gempa *benioff* dan *megathrust* menggunakan situs NHR3 (<https://www.risksciences.ucla.edu/nhr3>).



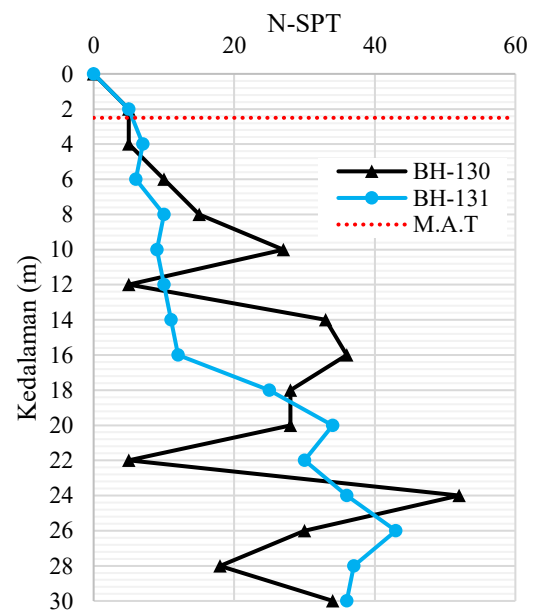
Gambar 3. Modifikasi 11 pasang rekaman gempa dengan pencocokan spektral (*spectral matching*)

Penentuan gerakan tanah akan dilakukan dengan melakukan pencocokan spektral (*spectral matching*) terhadap target respons spektrum yang diperoleh dari situs NGA-West2 pada saat melakukan penentuan nilai PGA. Data 11 pasang rekaman gempa yang telah terpilih selanjutnya digunakan sebagai parameter *input* dalam proses *spectral matching* dengan bantuan *software* Seismomatch yang menggunakan algoritma Hancock et.al. (2006) dengan toleransi kesalahan pada saat dicocokkan dengan target respons spektrum sebesar 0,3. Pasangan rekaman gempa harus dimodifikasi hingga hasil pencocokan spektral memiliki bentuk yang paling mendekati dengan target respons spektrum (SNI 8899:2020) seperti yang ditampilkan Gambar 3. Rekaman gempa yang memiliki kecocokan paling sesuai dengan target respons spektrum akan digunakan sebagai

parameter beban gempa dalam pemodelan numerik.

Hasil dan pembahasan

Hasil identifikasi awal dipilih struktur portal P-28 yang berada di *elevated I* sebagai yang paling dekat dengan dinding saluran irigasi. Data N-SPT yang tersedia pada struktur P-28 yaitu titik BH-130 dan BH-131 yang disajikan pada Gambar 4 digunakan untuk menentukan klasifikasi kelas situs tanah dengan menggunakan Pers. (1) dan menghasilkan bahwa titik BH-130 memiliki $\bar{N}$ sebesar 11,86 dan titik BH-131 sebesar 12,46, sesuai dengan SNI 1726:2019 kelas situs tanah pada dua titik bor di struktir P-28 termasuk dalam kelas situs SE.



Gambar 4. Data N-SPT pada titik bor di struktur P-28

Dari data N-SPT pada dua titik bor tersebut, karakteristik lapisan tanah yang mendominasi adalah pasir berkerikil (*gravelly-sand*), pasir berlanau (*silty-sand*), dan pasir berlempung (*clayey-sand*).

Pada titik BH-130 lapisan tanah dengan kepadatan lepas (*loose*) ditemukan hingga kedalaman 4 m dengan karakteristik tanah pasir berkerikil lempungan, tanah dengan kepadatan sedang (*medium*) hingga

kedalaman 8 m dengan karakteristik tanah pasir berlanau.

Pada titik BH-131 lapisan tanah dengan kepadatan lepas lebih tebal hingga mencapai kedalaman 10 m. Tanah pasir berlanau *medium* berada sampai di kedalaman 16 m. Kedalaman 12 m di titik BH-130 memiliki nilai N-SPT yang rendah yaitu 5, namun karakteristik lapisan tersebut adalah pasir lanau lempungan dengan kandungan butiran halus sebesar 90% dan klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) termasuk dalam tanah lanau plastisitas tinggi atau MH sehingga pada kedalaman tersebut potensi likuefaksi tidak diperhitungkan.

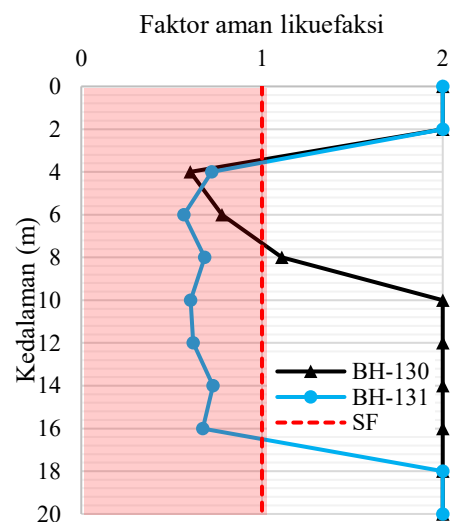
Kedalaman muka air tanah di P-28 berdasarkan data *borelog* relatif dangkal meskipun terjadi fluktuasi pada pagi dan sore hari, sehingga diambil kedalaman muka air tanah yang paling dangkal yaitu sedalam 2,5 m. Berdasarkan hasil identifikasi yang telah dilakukan pada titik BH-130 dan titik BH-131, kondisi tanah di lokasi tersebut memenuhi kriteria utama penyebab terjadinya likuefaksi yaitu memiliki lapisan tanah pasir dengan kepadatan lepas, muka air tanah yang dangkal dan wilayah yang pernah terjadi gempa bumi.

Hasil analisis potensi likuefaksi metode semi-empiris

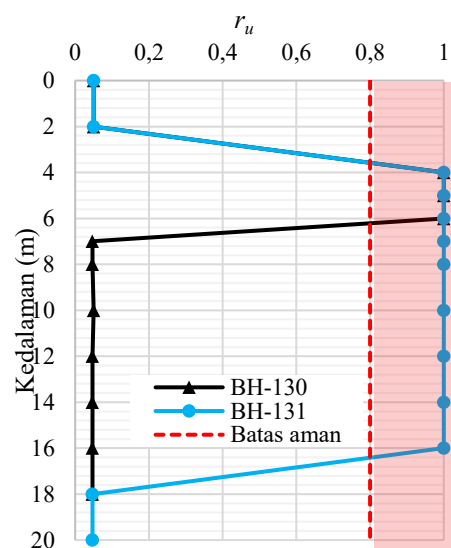
Berdasarkan perhitungan potensi likuefaksi dengan menggunakan Pers. (2), kedalaman tanah yang menghasilkan nilai faktor aman likuefaksi kurang dari 1 ($SF < 1$) terlihat pada Gambar 5. Titik BH-130 terdapat lapisan tanah yang terlikuefaksi di kedalaman 4 – 6 m, tanah yang mulai terlikuefaksi tepat di bawah muka air tanah. Pada titik BH-131 lapisan yang terlikuefaksi lebih luas yaitu kedalaman 4 – 16 m karena memiliki lapisan tanah yang rentan likuefaksi lebih tebal daripada titik BH-130.

Perhitungan potensi likuefaksi dilanjutkan dengan analisis rasio tekanan air pori (r_u) untuk memberikan gambaran lapisan tanah terlikuefaksi yang lebih terukur tidak hanya klasifikasi berdasarkan nilai faktor aman saja tetapi dengan nilai $r_u > 0,8$ juga

menunjukkan lapisan tanah kehilangan kekuatan gesernya karena tegangan efektif telah terdegradasi sepenuhnya. Analisis rasio tekanan air pori menggunakan Pers. (5) yang dikembangkan oleh Yegian dan Vitelli, (1981) menggunakan faktor keamanan likuefaksi sebagai salah satu parameternya dimana lapisan tanah yang teridentifikasi mengalami likuefaksi ($SF < 1$) secara bersamaan menunjukkan nilai $r_u > 0,8$ pada kedalaman yang sama, hal ini dapat terlihat pada Gambar 6.



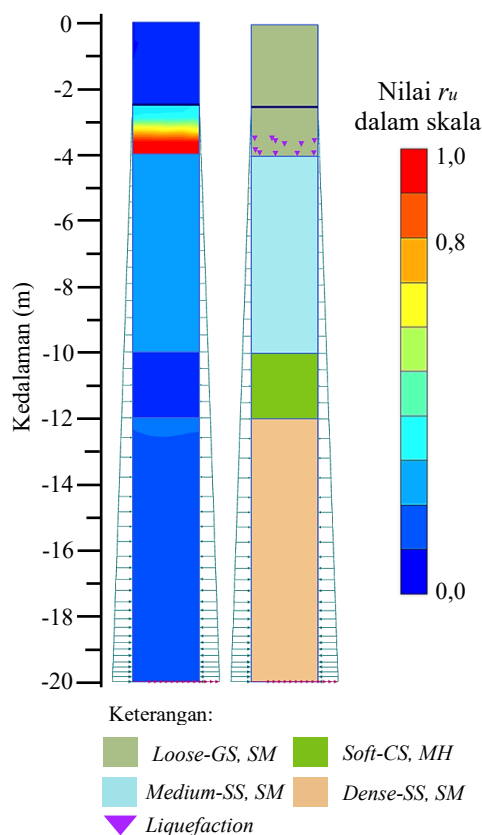
Gambar 5. Faktor aman likuefaksi pada titik bor di struktur P-28



Gambar 6. Nilai r_u pada lapisan tanah di struktur P-28 dengan metode Yegian & Vitelli (1981)

Hasil analisis rasio tekanan air pori pada pemodelan 1D

Hasil *output* dari Plaxis 2D pada Gambar 7 terdapat gradasi skala warna dari warna biru hingga warna merah yang merepresentasikan peningkatan tekanan air pori berlebih akibat pembebanan gempa, dimana skala warna merah menandakan nilai rasio tekanan air pori sudah lebih dari 0,8 hingga mencapai 1.

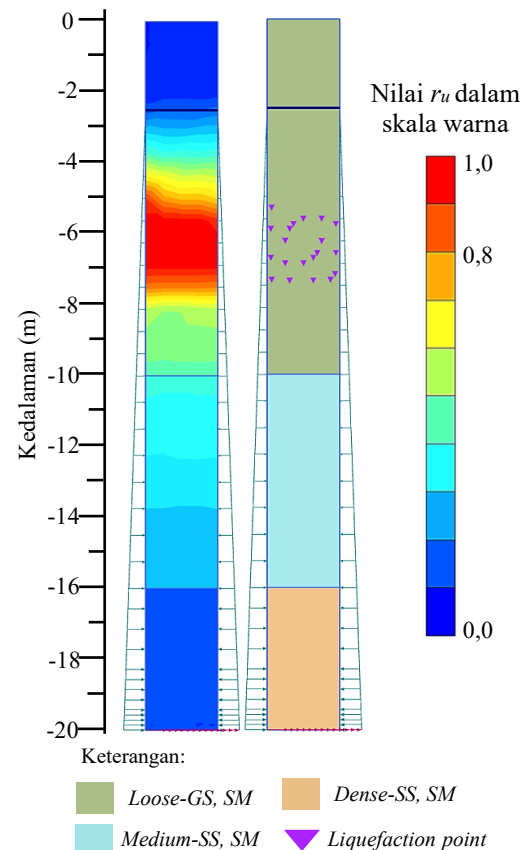


Gambar 7. Hasil *output* nilai r_u dan *liquefaction point* pemodelan 1D pada titik BH-130

Pada titik BH-130, terlihat pada Gambar 7 di kedalaman 3 – 4 m terjadi peningkatan tekanan air pori tepat di lapisan tanah yang berada di bawah muka air tanah. Hal ini sedikit berbeda terhadap hasil analisis r_u dengan metode Yegian & Vitelli (1981) dimana pada kedalaman 6 m mengalami peningkatan $r_u > 0,8$ namun pada pemodelan numerik, lapisan tersebut mengalami kenaikan tekanan air pori selama pembebanan gempa tetapi tidak mencapai

batas kritis untuk terjadi likuefaksi secara penuh.

Perbedaan nilai r_u juga terjadi pada titik BH-131 seperti pada Gambar 8, terlihat bahwa kenaikan $r_u > 0,8$ hanya terjadi di lapisan tanah pasir berkerikil kepadatan lepas pada kedalaman 5 – 7 m.



Gambar 8. Hasil *output* nilai r_u dan *liquefaction point* pemodelan 1D pada titik BH-131

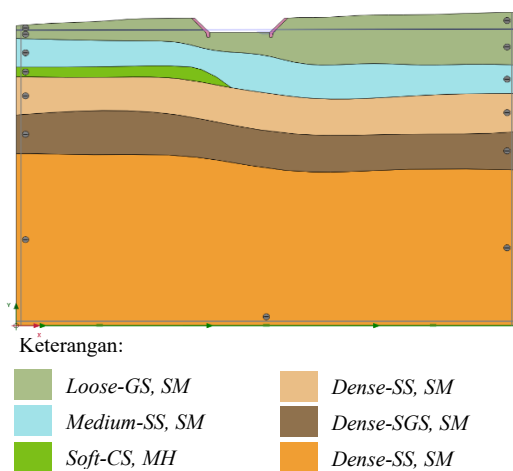
Perbedaan kedalaman tanah yang berpotensi mengalami likuefaksi berdasarkan nilai r_u pada metode empiris dan metode numerik disebabkan karena pada pemodelan numerik memperhitungkan perubahan perilaku tiap lapisan tanah selama beban gempa diaktifkan termasuk interaksi antara lapisan tanah dan respons dari tegangan non-linier tanah ((Rahman et al., 2025), sedangkan nilai r_u pada metode empiris cenderung lebih konservatif karena nilai PGA yang digunakan bersifat konstan dan seragam untuk tiap lapisan tanahnya dan tidak mempertimbangkan perubahan perilaku

non-linier tanah selama pembebanan gempa (Rahman et al., 2025).

Besarnya peningkatan tekanan air pori yang terjadi juga dipengaruhi oleh kepadatan relatif (D_r) yang merupakan parameter utama dalam model material PM4Sand, dimana semakin rendah nilai D_r maka peningkatan nilai $r_u > 0,8$ menjadi lebih signifikan (Saputri et al., 2024).

Hasil analisis rasio tekanan air pori pemodelan 2D

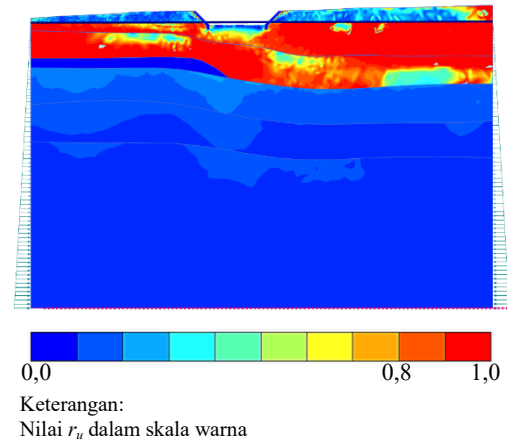
Pemodelan 2D dilakukan dengan menggabungkan titik BH-130 dan titik BH-131 dengan membentuk stratigrafi untuk mewakili kondisi tanah di struktur P-28 dengan saluran irigasi juga dimodelkan seperti yang terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Geometri pemodelan 2D pada struktur P-28

Kenaikan tekanan air pori dengan rasio lebih dari 0,8 terlihat lebih meluas di beberapa kedalaman lapisan tanah dibandingkan lapisan tanah pada pemodelan 1D seperti yang terlihat pada Gambar 10. Skala warna merah terlihat memenuhi lapisan tanah bagian atas yang merupakan lapisan *loose-gravelly-sand*. Zona dengan nilai $r_u > 0,8$ juga terjadi pada lapisan kedua dengan jenis tanah *medium-silty-sand*, sedangkan pada pemodelan 1D pada lapisan tanah tersebut kenaikan nilai $r_u < 0,8$ atau peningkatan tekanan air pori tidak membuat tegangan

efektif tanah berkurang hingga tanah mencapai batas kritis likuefaksi.



Gambar 10. Hasil *output* distribusi nilai $r_u > 0,8$ pada pemodelan 2D

Zona dengan nilai $r_u > 0,8$ pada lapisan tanah *loose* dan *medium* yang berada di bawah muka air tanah menyebar secara lateral di sepanjang penampang lapisan tanah disebabkan karena penggabungan dua titik bor dalam satu pemodelan menghasilkan ketebalan lapisan tanah dengan jenis yang sama menjadi berbeda-beda yang membuat kontur geometri tanah menjadi tidak seragam sehingga jangkauan distribusi tegangan efektif dan tekanan air pori yang dihasilkan lebih luas, sebaran zona terlikuefaksi di pemodelan 2D yang lebih luas dibandingkan pemodelan 1D terjadi akibat pengaruh dari perubahan lebar geometri yang menyebabkan kekakuan pada pemodelan menjadi lebih besar (Quevedo, 2019), sehingga pemodelan 2D mampu menggambarkan distribusi potensi likuefaksi secara lebih menyeluruh yang tidak dapat digambarkan dalam pemodelan 1D.

Peningkatan tekanan air pori tiap kedalaman dapat terlihat lebih cepat terjadi di zona lapisan tanah yang sejajar dengan saluran irigasi, hal ini dapat terlihat dari Gambar 9 bahwa pada lapisan tanah yang paling bawah terdapat skala warna biru yang lebih muda, artinya pada zona tersebut nilai r_u nya meningkat lebih cepat. Keberadaan penampang saluran irigasi dalam pemodelan membuat kondisi tanah jenuh di sekitarnya

memiliki tegangan efektif vertikal awal ($\sigma'v_0$) dan *overburden* yang lebih kecil, berdasarkan definisi $r_u = \Delta u / \sigma'v_0$, meskipun peningkatan tekanan air pori berlebih (Δu) yang terjadi pada tiap lapisan tanah dalam kondisi yang sama tetapi nilai $\sigma'v_0$ yang lebih kecil di sekitar saluran irigasi dapat menyebabkan nilai $r_u > 0,8$ akan lebih cepat meningkat terlebih pada saat pembebanan gempa berlangsung, sehingga lapisan tanah sekitar saluran irigasi menjadi lebih rentan terhadap likuefaksi.

Kesimpulan

Pemodelan numerik 1D dan 2D dengan model konstitutif PM4Sand menghasilkan penyebaran distribusi peningkatan nilai $r_u > 0,8$ yang berbeda secara signifikan pada tiap lapisan tanah. Pemodelan 2D dinilai lebih representatif dalam memperhitungkan peningkatan rasio tekanan air pori karena menyesuaikan dengan kondisi lapangan pada lokasi P-28 yang memiliki perbedaan ketebalan pada lapisan tanah sejenis dan mempertimbangkan keberadaan saluran irigasi yang ternyata dapat meningkatkan potensi likuefaksi di lokasi tersebut.

Daftar Pustaka

- Aini, I., Wilopo, W., & Fathani, T. F. (2024). the Correlation of Liquefaction With Excess Pore Water Pressure in Langkat, North Sumatra. *International Journal of GEOMATE*, 26(114), 117–125. <https://doi.org/10.21660/2024.114.4150>
- Badan Geologi. (2019). *Atlas zona kerentanan likuefaksi Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 persyaratan perancangan geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 8899:2020 tata cara pemilihan dan modifikasi gerak tanah permukaan untuk perencanaan gedung tahan gempa*. Badan Standardisasi Nasional.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING* (R. W. Boulanger & I. M. Idriss (eds.); Issue April). University Of California.
- Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2024). *PM4SAND (VERSION 3.3): A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications*. 2023(June 2023).
- Dwiyantoro, W., Fathani, T. F., & Adi, A. D. (2023). Influence of Groundwater Table Fluctuation on Liquefaction Potential Analysis Using Cyclic Stress Approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1184(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1184/1/012006>
- Hardiyatmo, H. C. (2024). *Rekayasa Gempa Untuk Analisis Struktur & Geoteknik* (Cetakan Ke.). Gadjah Mada University Press.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K. (1984). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(1), 49–58. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90027-5)
- Quevedo, V. H. P. (2019). *Seismic liquefaction analysis of a critical facility with PM4Sand in Plaxis* by. Delft University of Technology.
- Rahman, H. M. Al, Fathani, T. F., & Wilopo, W. (2025). *Excess Pore Water Pressure Ratio Comparison from Empirical and Numerical Methods to Determine Liquefaction Potential in Palu , Central Sulawesi* ., 1–15. <https://doi.org/10.2174/0118741495372949250114055629>
- Saputri, A. N. A. E., Ismanti, S., & Fathani, T. F. (2024). *Numerical Study on the Liquefaction Potential Analysis Using Constitutive Models for Sand and Silt in Mamuju , West Sulawesi*. 1–17. <https://doi.org/10.2174/0118741495358612241024091912>
- Setiadi, W. P., Faris, F., & Setiawan, H. (2024). Liquefaction potential hazard assessment and its effect on toll road construction in Seyegan Subdistrict, Yogyakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1314(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1314/1/012120>
- Yegian, M. K., & Vitelli, B. M. (1981). *Analysis for Liquefaction : Empirical Approach*. 1–6.
- Zakariya, A., Rifa'I, A., Ismanti, S., & Hidayat, M. S. (2023). Axial and lateral bearing capacity assessment of bored piles on medium-dense sand and liquefiable potential based on numerical simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1184(1). <https://doi.org/10.1088/1755315/1184/1/01201>