

Analisa Kestabilan dan Penurunan Tanah akibat Galian Sementara dengan menggunakan kombinasi Penahan Steel-Sheet-Pile dan Bambu di Simpang Joglo Kota Surakarta

Tatag Yufitra Rus^{1*}, Totok Sulisty², Risky Darmawan³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Balikpapan, 76129, Indonesia

*Corresponding author, tatag.yufitra@poltekba.ac.id

Received 5th May 2023; 1st Revision 25th May 2023; Accepted 19th June 2023

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi nilai deformasi, penurunan dan angka keamanan pada galian tanah pada proyek pekerjaan jalur rel layang kereta api di Simpang Joglo Kota Surakarta. Analisa menggunakan analisa numerik 2D. Studi ini dapat bermanfaat sebagai bagian dari upaya mitigasi dan pencegahan terhadap resiko kelongsoran tanah yang terjadi akibat proyek galian sementara tersebut dengan permodelan tanah Hardening Soil (HS) dengan Undrained B. Pada sisi timur galian menggunakan konstruksi SSP (Steel-Sheet-Pile) dimana terdapat beban rel kereta api yang bekerja sedangkan pada sisi barat galian menggunakan penahan bambu dengan beban konstruksi jalan yang bekerja. Tanah dibagi kedalam dua lapisan dengan konsistensi lapisan lempung sedang (0-11 m) ke lempung keras (11-50 m). Dari hasil analisa didapatkan nilai maksimum perpindahan dari konstruksi penahan SSP adalah 10,82 mm dimana nilai perpindahan pada bambu hanya sebesar 6,85 mm. Hal ini selaras terhadap garis kelongsoran terbesar terjadi pada sisi timur galian yang menggunakan SSP dengan nilai SF sebesar 3,37 > 2 dimana dapat dikategorikan aman Selanjutnya, besaran nilai penurunan pada kedua sisi galian tidak lebih dari 10 mm. Hal dianggap aman terhadap dampak dari galian sementara pada proyek tersebut. Pada konstruksi penahan SSP memiliki nilai penurunan maksimum sebesar 10,09 mm pada jarak dari galian 3,41 m. Sedangkan pada konstruksi penahan berupa bambu diprediksi hanya sebesar 2,5 mm dengan jarak dari galian sekitar 3,12 m.

Kata Kunci: Galian Sementara; Simpang Joglo; Perpindahan; Penurunan; Angka Keamanan

ABSTRACT

This study aims to predict the value of deformation, settlement and safety factor on the railroad project at Simpang Joglo, Surakarta City. Analysis using 2D numerical analysis. This study can be useful as part of efforts to mitigate and prevent the risk of land slides that occur as a result of the temporary excavation project with Hardening Soil (HS) soil modeling with Undrained B. On the east side of the excavation using SSP (Steel-Sheet-Pile) construction where there are the working load of the railroad tracks while on the west side of the excavation using bamboo supports with the working load of the road construction. The soil was divided into two layers with a consistency of medium clay (0-11 m) to hard clay (11-50 m). From the analysis results, the maximum displacement value of the SSP retaining construction is 10.82 mm where the displacement value for bamboo is only 6.85 mm. This is consistent with the largest sliding line occurring on the east side of the excavation using SSP with an SF value of 3.37 > 2 which can be categorized as safe. Furthermore, the magnitude of the settlement value on both sides of the excavation is not more than 10 mm. It is considered safe from the impact of temporary excavation on the project. The SSP retaining construction has a maximum

settlement value of 10.09 mm at a distance of 3.41 m from the excavation. Meanwhile, the bamboo retaining construction is predicted to be only 2.5 mm with a distance of about 3.12 m from the excavation.

Keywords: *Temporary Excavation; Joglo Intersection; Displacement; Settlement; Safety Factor*

Copyright © Tatag Yufitra Rus, Totok Sulisty, Risky Darmawan

This is an open access article under the: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

PENDAHULUAN

Berbagai macam upaya pemerintah dilakukan dalam menanggulangi kepadatan penduduk yang berkaitan dengan permasalahan kemacetan dalam suatu wilayah, salah satunya pembangunan jalan layang rel di Simpang Joglo Kota Surakarta. Surakarta merupakan kota terbesar ketiga di Pulau Jawa bagian selatan setelah Bandung dan Malang yang memiliki luas sekitar $\pm 44,04$ km². Kota Surakarta berkembang sangat cepat baik dari segi infrastruktur kota maupun segi perekonomian. Semakin banyaknya penggunaan moda transportasi pribadi ditambah dengan penambahan jumlah armada dan jam keberangkatan oleh PT Kereta Api Indonesia yang membuat Simpang Joglo menjadi titik kemacetan akibat dari pertemuan sebidang jalan kereta api pada Simpang Joglo [1]. Maka dari itu dibuatlah pembangunan rel layang yang dinilai lebih efektif karena kereta api tidak lagi lewat (sejajar) jalan darat sehingga bisa memperlancar arus lalu lintas.

Pembangunan proyek rel layang antara jalur Solo Balapan dan Kadipiro terletak pada STA 105+575. Pekerjaan pondasi pilar rel layang tersebut memerlukan galian sementara sedalam ± 5 m menggunakan dinding penahan sementara berupa *SSP (Steel-Sheet-Pile)* dengan kedalaman konstruksi 12 m, lebar 17,2 m dan panjang galian 3,6 m. Dalam proses pembuatan rel layang, tentu terdapat tantangan yang harus dihadapi. Hal tersebut tidak dapat dipungkiri karena mengingat topografi dan jenis tanah di Surakarta beraneka ragam serta proses pekerjaannya berbarengan dengan rel aktif dan pembuatan pondasi. Pada area Timur galian berbatasan dengan rel kereta api eksisting dan pada area barat berbatasan pada jalan raya dan pemukiman penduduk. Tantangan dalam pekerjaan pemancangan *SSP* area barat galian tanah tersebut dapat mengakibatkan getaran dan kerusakan pada bangunan sekitar. Sehingga diperlukan inovasi perubahan desain pada sisi tersebut dengan menggunakan material berupa bambu untuk mengurangi potensi kerusakan bangunan akibat pekerjaan pemancangan *SSP*.

Perencanaan dinding penahan sementara menggunakan tipe *lagging wall* dapat menjadi solusi terbaik dalam pekerjaan galian sementara di lokasi tersebut. Kelemahan pada tipe *lagging wall* terhadap muka air tinggi (*water leakage*) yang dapat mengurangi kestabilan pada tanah bisa diantisipasi karena muka air tanah terletak di bawah galian tanah dengan kedalaman 9 m [2]. Namun permasalahan pada deformasi dan angka keamanan menjadi hal yang harus dianalisis lebih lanjut untuk menghindari resiko pada penurunan tanah akibat deformasi karena galian tanah dan potensi kelongsoran.

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi nilai deformasi, penurunan dan angka keamanan pada galian tanah pada proyek pekerjaan jalur rel layang kereta api di Simpang Joglo Kota Surakarta. Analisa untuk mengetahui kinerja dari dinding penahan sementara tersebut menggunakan analisa numerik 2D. Studi ini dapat bermanfaat sebagai bagian dari upaya mitigasi dan pencegahan terhadap resiko kelongsoran tanah yang terjadi akibat proyek galian sementara di lokasi tersebut.

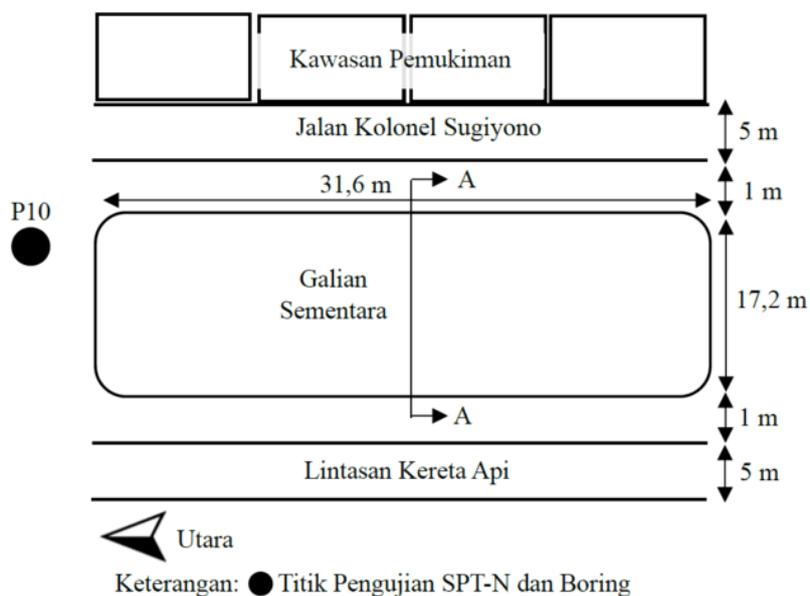
METODE

Detail Proyek Galian Sementara Simpang Joglo



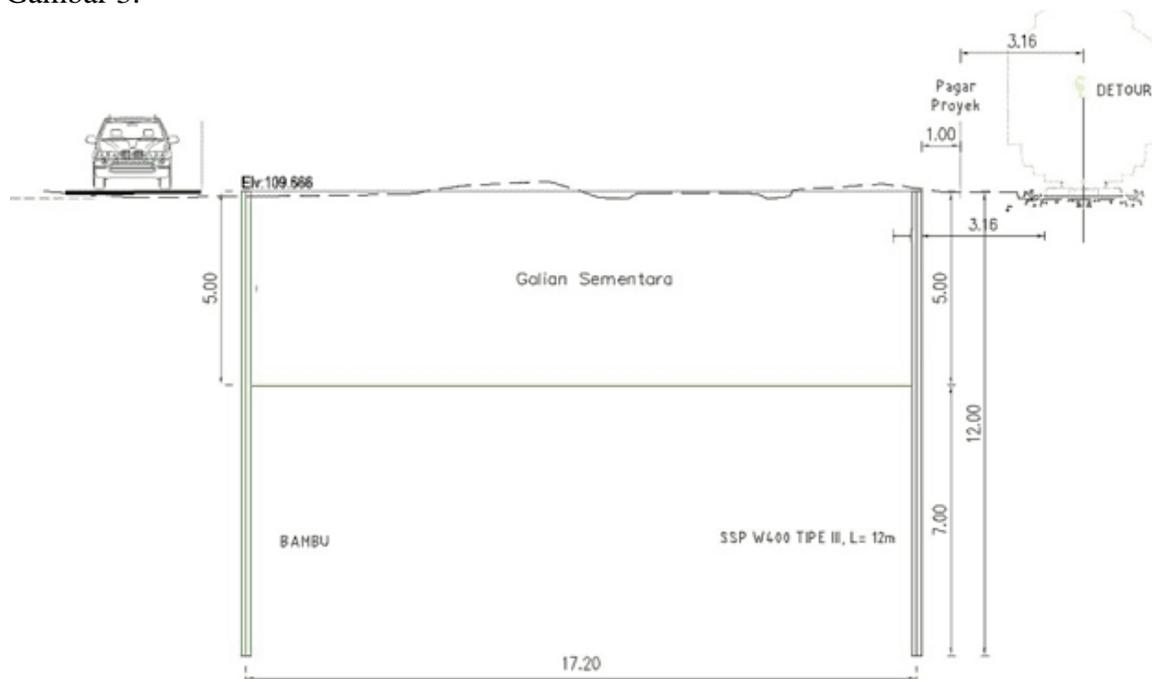
Gambar 1 Lokasi Studi pada Pekerjaan Galian Sementara Simpang Joglo Kota Surakarta

Lokasi penelitian terletak pada Simpang Joglo yang merupakan simpang dengan 7 lengan di Kota Surakarta. Pada sisi bagian timur dari galian sementara merupakan jalur lintasan kereta api Solo Balapan - Kadipiro dan pada bagian barat merupakan Jalan Solo - Purwodadi dan terdapat Kawasan pemukiman penduduk sekitar. Peta lokasi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 2 *Layout* Galian Sementara pada Simpang Joglo Kota Surakarta

Pekerjaan galian sementara pada proyek rel layang terletak pada jalur Solo Balapan – Kadipiro STA 105+575 Kota Surakarta. Layout galian sementara seperti yang terlihat pada Gambar 2 menunjukkan bahwa terdapat 1 titik pengujian penyelidikan tanah berupa SPT-N dan Boring. Pekerjaan galian sepanjang 31,6 m lebar 17,2 m dengan kedalaman galian ±5 m menggunakan kombinasi SSP dan bambu dengan kedalaman konstruksi 12 m. Detail *layout* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Cross-Section Galian Sementara Simpang Joglo STA 105+575

Analisa Pembebanan

Beban Lalu Lintas Dan Kereta Api

Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas yang digunakan dalam penelitian ini ialah beban yang berdasarkan tabel data parameter beban lalu lintas, hasil pengamatan di lapangan yaitu sistem jaringan kolektor primer. Dimana beban lalu lintas tersebut sebesar 20 kN/m [3].

Beban Kereta Api

Loko CC-202 dengan $W_{lok} = 108$ ton [4].

Sehingga dapat dihitung dengan:

$$P_s = (W_{lok}) / ((x \times y)) \quad (1)$$

dimana:

P_s : Gaya statis (ton)

W_{lok} : Berat lokomotif

x : Lokomotif ditumpu oleh 2 bogie

y : Masing masing bogie terdiri dari 3 gandar

(Sesuai dengan Permen Perhub No. 60 Thn 2012) [4]

Faktor Dinamis

$$DAF = 1 + t \varphi (1 + (V-60) / 140) \tag{2}$$

dimana :

DAF : Faktor dinamis

T : Koefesien standar deviasi , untuk perhitungan keamanan sebesar 3

φ : Kondisi jalur kereta, kondisi rel normal digunakan nilai 0,2

V : Kecepatan kereta api (km/jam)

Kemudian gaya dinamis dapat dihitung dengan rumus :

$$P_d = P_s \times DAF \tag{3}$$

dengan:

P_d : Gaya dinamis (ton)

P_s : Gaya statis (ton)

DAF : Faktor dinamis

Tabel 1 Tabel skematika distribusi gaya dari roda pada subgrade

| DISTRIBUSI BEBAN PADA BANTALAN | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Gandar | P1 | | P2 | | P3 | | |
| (kN) | 295.740 | | | | | | |
| Bantalan | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 |
| Akibat P1 | 23% | 40% | 23% | 7% | 0% | 0% | 0% |
| | 68.02 | 118.30 | 68.02 | 20.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Akibat P2 | 0% | 7% | 23% | 40% | 23% | 7% | 0% |
| | 0.00 | 20.70 | 68.02 | 118.30 | 68.02 | 20.70 | 0.00 |
| Akibat P3 | 0% | 0% | 0% | 7% | 23% | 40% | 23% |
| | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.70 | 68.02 | 118.30 | 68.02 |
| Total (%) | 0.23 | 0.47 | 0.46 | 0.54 | 0.46 | 0.47 | 0.23 |
| Total Bantalan (kN) | 68.02 | 139.00 | 136.04 | 159.70 | 136.04 | 139.00 | 68.02 |
| Beban/m (kN) | 207.02 | | 295.74 | | 275.04 | | 68.02 |

Untuk perhitungan pembebanan selanjutnya digunakan beban maksimum, yaitu beban yang berada pada bantalan dibawah P2 sebesar 295,74 kN.

Metode Teori Empirik

Perhitungan reduksi beban terhadap ballast menggunakan metode teori empirik dengan persamaan Okabe (1961) [5].

Persamaan Hirokoshi

$$\sigma_z = Pa = \left(\frac{58}{10+(100 \times z)^{1.35}} \right) \tag{4}$$

Persamaan Okabe untuk ballast dengan batu pecah

$$\sigma_z = Pa = \left(\frac{350}{240+(100 \times z)^{1.6}} \right) \tag{5}$$

Persamaan Okabe untuk ballast dengan batu kerikil

$$\sigma_z = Pa = \left(\frac{125}{50+(100 \times z)^{1.5}} \right) \tag{6}$$

Tabel 2 Tabel reduktor beban B3

| No | Nilai P_a (kN/m') | Tebal Balas (cm) | Persamaan | Nilai δz (kN/m) | Reduksi (%) |
|----|------------------------|---------------------|-----------|----------------------------|----------------|
| 1 | 68.02 | 0.3 | Hirokoshi | 36.31 | 46.62 |
| 2 | 68.02 | 0.3 | Okabe 1.0 | 50.56 | 25.67 |
| 3 | 68.02 | 0.3 | Okabe 2.0 | 39.67 | 41.68 |

Sumber: Data konsultan perencana (2022)

Dari tabel perhitungan di atas, diambil nilai reduksi beban terhadap ballast terkecil yaitu 50,56 kN/m dengan reduksi sebesar 25,67% menggunakan persamaan Okabe.

Tabel 3 Tabel reduktor beban B4

| No | Nilai P_a (kN/M) | Tebal Balas (cm) | Persamaan | Nilai δz (kN/m) | Reduksi (%) |
|----|-----------------------|---------------------|-----------|----------------------------|----------------|
| 1 | 79.85 | 0.3 | Hirokoshi | 42.62 | 46.62 |
| 2 | 79.85 | 0.3 | Okabe 1.0 | 59.35 | 25.67 |
| 3 | 79.85 | 0.3 | Okabe 2.0 | 46.57 | 41.68 |

Sumber: Data konsultan perencana (2022)

Dari tabel perhitungan di atas, diambil nilai reduksi beban terhadap ballast terkecil yaitu 59,35 kN/m dengan reduksi sebesar 25,67% menggunakan persamaan Okabe.

Beban Rel

Berat rel kereta untuk tipe R54 adalah sebesar 0,535 kN/m. pada struktur jalan rel terdapat 2 batang rel kereta sehingga berat total rel sebesar 1,069 kN/m. karena jarak antar bantalan rel adalah 60 cm, beban rel kereta sebesar 60% beban per meter, yaitu 0,64 kN

Beban Bantalan

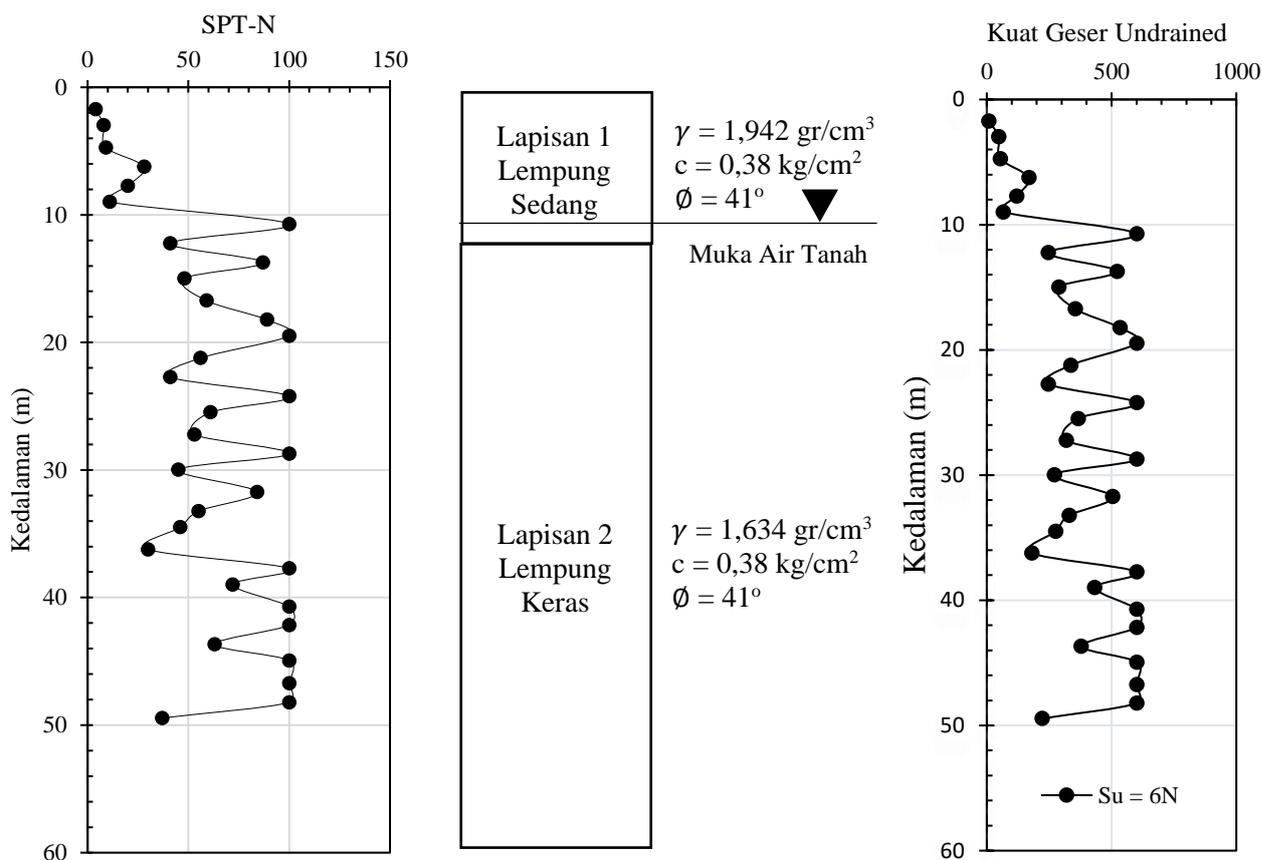
Berat bantalan balok rel beton sebesar 200 kg/buah yang setara dengan 1,96 kN/buah. Total Pembebanan Kereta didapatkan sebesar 112,40 kN/m'

Kondisi Geoteknik dan Input Parameter

Hasil Penyelidikan Tanah

Titik SPT-N dan Boring diambil pada P10 dimana terletak tidak jauh dari lokasi galian sementara. Tanah dibagi kedalam 2 lapisan, yaitu lempung sedang dan lempung keras. Pada hasil nilai N ditemukan bahwa kondisi tanah pada kedalaman 0 hingga 11 m tanah tergolong merupakan lempung sedang dengan nilai N rata-rata sebesar 26. Sedangkan pada lapisan kedua tanah dari kedalaman 11m hingga 50 m dikelompokkan sebagai lempung keras ditunjukkan pada nilai N rata-rata sebesar 78. Muka air tanah terletak pada kedalaman 9 m sehingga tidak mempengaruhi pada pekerjaan galian sementara seperti yang terlihat pada Gambar 4.

Nilai kuat geser undrained seperti yang ditampilkan pada Gambar 4 menunjukkan nilai pendekatan S_u yang didapatkan dari metode pendekatan empiris. Pendekatan empiris ini digunakan dikarenakan tidak ditemukan hasil pengujian kuat tekan bebas untuk digunakan dalam permodelan. Penggunaan pendekatan empiris nilai S_u berdasarkan nilai N ini pernah dilakukan dalam penelitian Kulhawy dan Mayne (1990) [6]. dimana digunakan nilai $S_u = 6 N$.



Gambar 4. Hasil Penyelidikan Tanah berupa SPT-N dan Data Uji Laboratorium

Permodelan pada Analisa Numerik

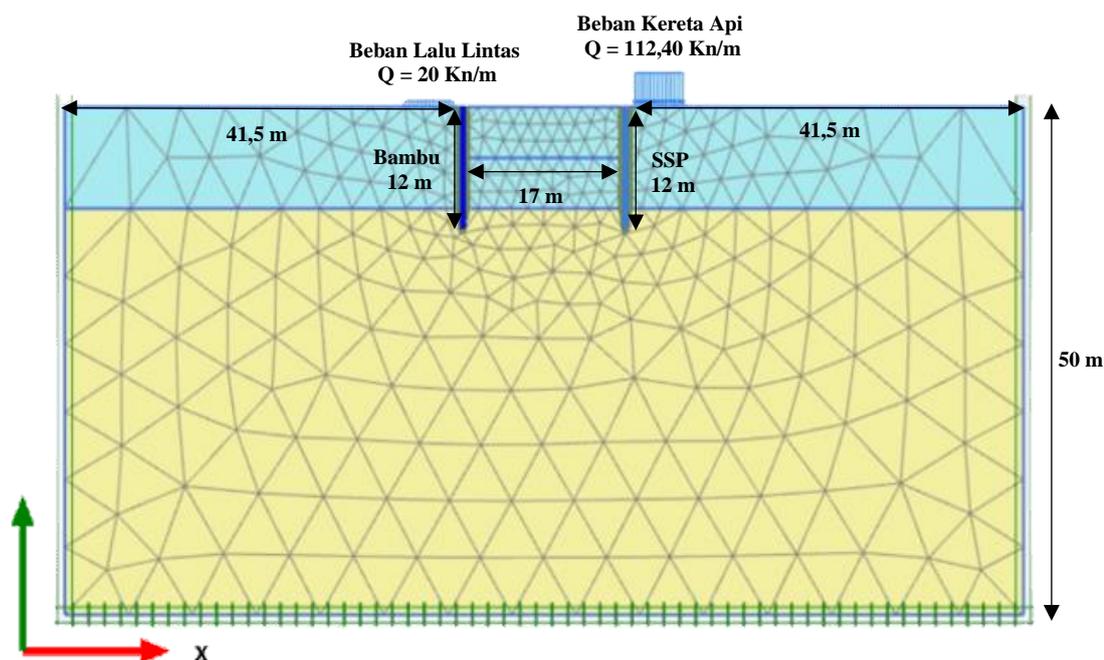
Permodelan analisa numerik menggunakan software finite element berupa Plaxis 2D. *Benchmarking* pada permodelan dapat dilihat pada Gambar 5. Potongan yang diambil terletak pada tengah galian karena nilai deformasi yang terjadi ditengah galian lebih besar daripada yang mendekati sudut galian. Hal ini secara teknis dikarenakan besaran gaya dan momen pada potongan di tengah galian akan menunjukkan nilai yang terbesar.

Analisa menggunakan tipe *Undrained B* karena pada tanah galian merupakan tanah berlempung sehingga nantinya akan menggunakan parameter kuat geser undrained berupa S_u . Fase analisa dimulai dengan melakukan pemancangan dan instalasi *SSP* dan konstruksi bambu, lalu dilanjutkan dengan melakukan galian sedalam 5 m.

Parameter Tanah dan Struktur

Penentuan parameter tanah yang digunakan pada studi kali ini menggunakan model parameter *Hardening Soil (HS) Undrained B* dalam analisa menggunakan metode numerik seperti terlihat pada Tabel 4. Tegangan modulus tanah dimodelkan dengan memasukkan berbagai nilai modulus tanah untuk lapisan tanah secara manual untuk mempertimbangkan perubahan modulus tanah dengan kedalaman. Penentuan nilai modulus tanah menggunakan pendekatan empiris yang diusulkan oleh Hsiung (2009) dan Yong (2015) dimana untuk soil modulus untuk clay adalah $E_{50} = 4000 \text{ N (kPa)}$ dan $E'_{50} = 50\% E_{50}$ [7] [8]. Tabel 4 mencantumkan nilai E_{50}^{ref} yang digunakan dalam simulasi. Model HS memungkinkan untuk memasukkan nilai modulus

tanah yang terpisah untuk membedakan perilaku tanah dalam kondisi loading/unloading. Menurut Lim et al. (2010) dan Calvello dan Finno. (2004), nilai modulus untuk loading/unloading dan oedometer loading diperkirakan sebesar $E_{ur}^{ref} = 3E_{oed}^{ref}$ dan $E_{oed}^{ref} = 0,7E_{50}^{ref}$ [9] [10]. Prosedur serupa juga disarankan oleh Surarak dkk. (2012) untuk menentukan input parameter tanah pada model HS [11]. Selain itu, sensitivitas modulus elastisitas pada masing-masing parameter terhadap deformasi dinding suatu galian didiskusikan oleh Gebreselasse dan Kemfert. (2005) [12].



Gambar 5. Benchmark permodelan finite element method

Tabel 4. Input Parameter menggunakan Hardening Soil *Undrained* B

| Kedalaman (m) | Konsistensi | γ (kN/m ³) | N (Rata-Rata) | S_u (kPa) | E_{50} (kPa) | E'_{50} (kPa) | E_{50}^{ref} (kPa) | E_{oed}^{ref} (kPa) | E_{ur}^{ref} (kPa) |
|---------------|-------------|-------------------------------|---------------|-------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 0 - 11 | Very Stiff | 19,42 | 26 | 156 | 104000 | 90168 | 45084 | 31559 | 135252 |
| 11 - 50 | Hard | 16,34 | 72 | 432 | 288000 | 2E+05 | 124848 | 87394 | 374544 |

Catatan: $E_{50} = 4000$ N; $E'_{50} = 0.867 E_{50}$; $E_{50}^{ref} = 50\% E'_{50}$; $\nu = 0,2$

Tabel 5. Input parameter SSP

| Parameter SSP | Simbol | Nilai | Satuan |
|-------------------|----------|-------------------|-------------------|
| Mutu Baja | f_y | 235 | MPa |
| Berat jenis baja | γ | 8 | kN/m ³ |
| Modulus Young | E | 2.1×10^5 | MPa |
| Normal Stiffness | EA | 4011 | MPa |
| Flexural rigidity | EI | 35280 | kN/m ² |
| Poisson rasio | ν | 0.15 | - |

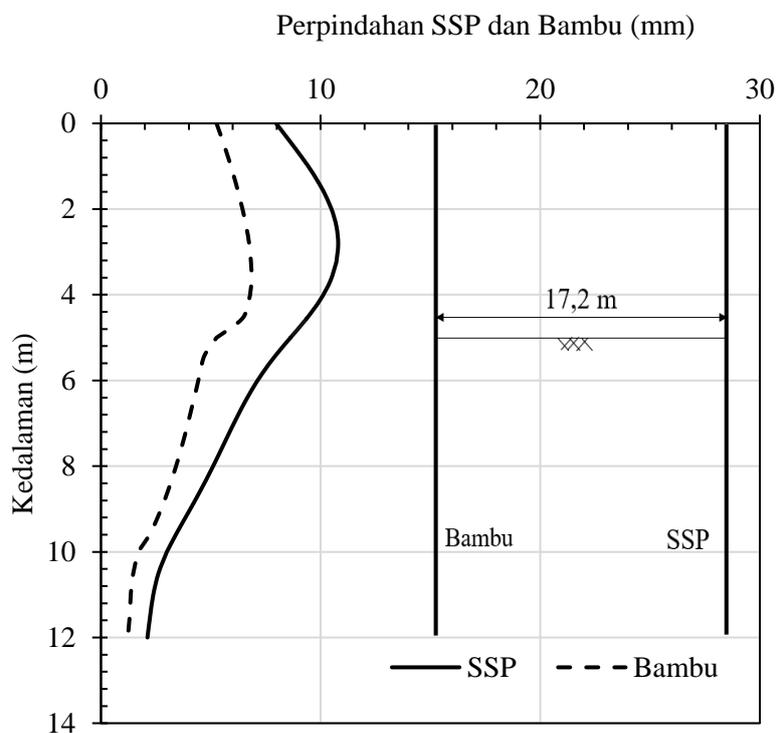
Tabel 5 menampilkan propertis material *SSP* dan Tabel 6 menampilkan *input propertis* material bambu dengan menggunakan Plaxis 2D.

Tabel 6. Input parameter Bambu

| Parameter Bambu | Simbol | Nilai | Satuan |
|-------------------|----------|--------------------|-------------------|
| Diameter | t | 0.08 | m |
| Berat jenis bambu | γ | 7 | kN/m ³ |
| Modulus Young | E | 1.35×10^7 | kN/m ² |
| Normal Stiffness | EA | 67824 | kN/m ² |
| Flexural rigidity | EI | 0.0000020 | kN/m ² |
| Poisson rasio | ν | 0.15 | - |

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perpindahan Penahan Tanah dan Angka Keamanan

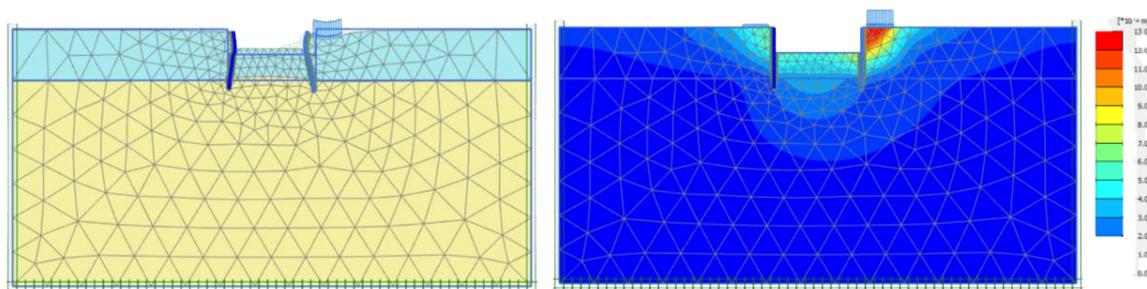


Gambar 6. Perpindahan SSP dan Bambu akibat Galian Sementara

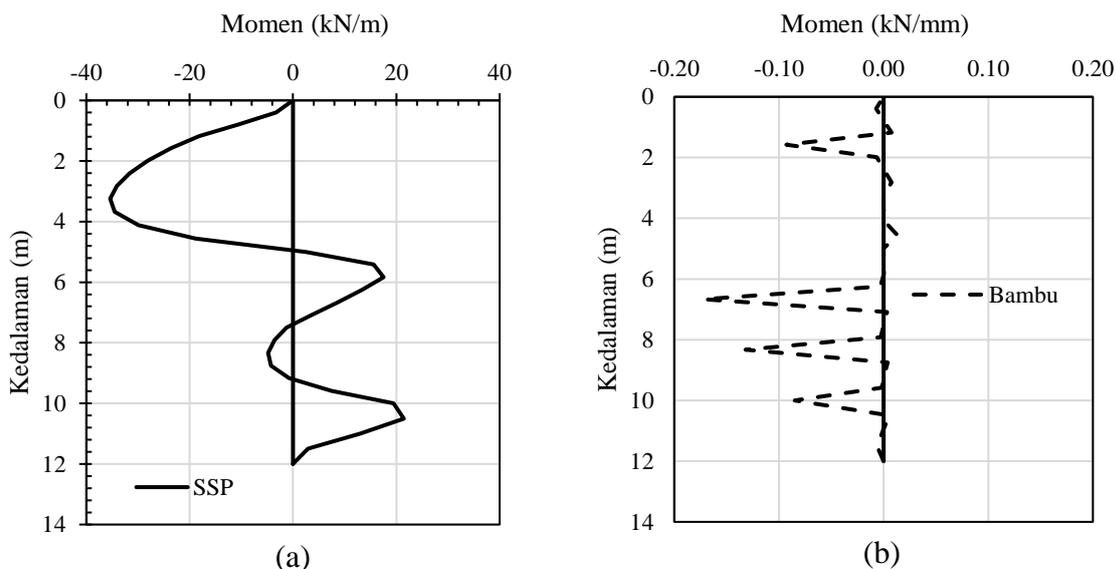
Hasil perpindahan turap sementara secara horizontal didapatkan melalui analisa numerik yang disimulasi melalui metode elemen hingga 2D menggunakan *Undrained B* sebagai kuat geser efektif tanah.

Pada Gambar 6 dapat dilihat perbedaan perpindahan material *SSP* dan Bambu, dimana pada grafik tersebut perpindahan pada bambu lebih kecil dikarenakan beban yang diterima lebih kecil dari beban yang diterima *SSP*. Maksimum perpindahan dari konstruksi bambu adalah 6,85 mm sedangkan maksimum perpindahan dari konstruksi penahan *SSP* adalah 10,82. Hal ini menjadi relevan dalam desain, karena nilai elastisitas yang dapat diberikan oleh *SSP* dengan material baja mampu menerima bentuk perubahan bentuk (deformasi) ketimbang bambu.

Pada Gambar 7 menampilkan hasil secara umum perubahan bentuk galian sementara melalui analisa numerik. setelah dimasukan parameter tanah dan parameter material SSP dan bambu dengan beban yang telah direncanakan. Pada Gambar 7 juga ditampilkan bagaimana garis bidang kelongsoran terbesar terjadi pada sisi timur dari galian dimana beban rel kereta api yang memiliki nilai beban terbesar pada galian bekerja. Hal ini sesuai pada nilai perubahan bentuk maksimum terjadi pada sisi galian arah timur yang menggunakan SSP dengan nilai $SF = 3,7 > 2$ yang dapat dikategorikan aman.



Gambar 7. Perubahan galian setelah diberi beban dan material

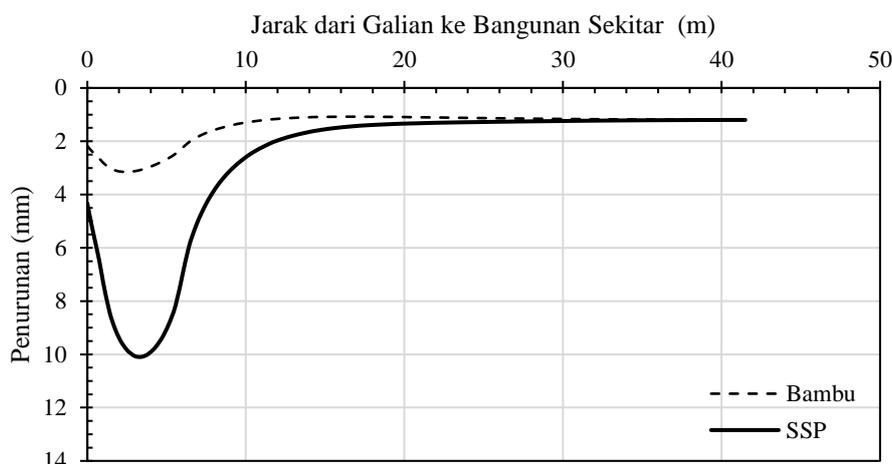


Gambar 8. Bidang momen pada galian turap sementara (a) material SSP; (b) material bambu

Pada Gambar 8 dapat dilihat bidang momen pada material SSP dan Bambu. Nilai momen yang dihasilkan oleh SSP terlihat sangat besar dibandingkan dengan yang diterima oleh bambu. Hal ini karena nilai kekakuan antara material SSP lebih besar dari pada bambu dan nilai beban yang diterima SSP juga lebih besar daripada bambu. Pada nilai momen SSP, besaran maksimum momen terjadi pada kedalaman 3,7 m dimana nilai maksimum deformasi terbesar pada SSP juga terjadi pada kedalaman yang sama.

3.2. Perbandingan Nilai Penurunan Tanah

Pada Gambar 9 dapat diketahui perbandingan penurunan tanah pada posisi jalan dan posisi rel kereta api dengan jarak dari galian dengan bangunan sekitar.



Gambar 9 Penurunan tanah dengan material SSP dan bambu

Nilai penurunan tanah akibat galian yang diprediksi dapat mempengaruhi bangunan sekitar terlihat pada Gambar 9. Pada konstruksi penahan SSP memiliki nilai penurunan maksimum sebesar 10,09 mm pada jarak dari galian 3,41 m. Sedangkan pada konstruksi penahan berupa bambu diprediksi hanya sebesar 2,5 mm dengan jarak dari galian sekitar 3,12 m. Besaran nilai penurunan yang tidak lebih dari 10 mm ini dianggap aman terhadap dampak dari galian sementara pada proyek tersebut.

KESIMPULAN

Penelitian kali ini memprediksi nilai pergerakan, momen lentur, dan penurunan tanah yang terjadi pada proyek galian turap sementara pada proyek pembangunan pondasi rel layang di Simpang Joglo Kota Surakarta. Prediksi nilai pergerakan, angka kemandirian, besaran momen dan nilai penurunan tanah tersebut menggunakan analisa numerik 2D dengan HS *Undrained* B sebagai parameter input sebagai kuat geser efektif tanah. Secara keseluruhan,

Kondisi karakteristik tanah di Simpang joglo Surakarta ialah didominasi oleh lempung dengan konsistensi tanah dari lempung sedang ke lempung keras. Lalu nilai N-SPT pada angka 26 pada kedalaman 0-11 m (lempung sedang) dan meningkat hingga mencapai nilai 72 pada kedalaman 11-50 m (lempung keras). Nilai maksimum perpindahan dari konstruksi penahan SSP adalah 10,82 mm dimana nilai perpindahan pada bambu hanya sebesar 6,85 mm. Hal ini selaras terhadap garis kelongsoran terbesar terjadi pada sisi timur galian yang menggunakan SSP dengan nilai SF sebesar $3,37 > 2$ dimana dapat dikategorikan aman. Besaran nilai penurunan pada kedua sisi galian tidak lebih dari 10 mm. Hal dianggap aman terhadap dampak dari galian sementara pada proyek tersebut. Pada konstruksi penahan SSP memiliki nilai penurunan maksimum sebesar 10,09 mm pada jarak dari galian 3,41 m. Sedangkan pada konstruksi penahan berupa bambu diprediksi hanya sebesar 2,5 mm dengan jarak dari galian sekitar 3,12 m.

REFERENSI

- [1] Godavarthi, V. R., Mallavalli, D., Peddi, R., Katragadda, N., & Mulpuru, P. (2011). Contiguous pile wall as a deep excavation supporting system. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 19, 144-160.

- [2] Hendiarto, I. A., & Arief, H. (1999). Analisis Kemacetan Arus Lalu Lintas pada Pertemuan Sebidang Jalan Kereta Api dengan Simpang Lima di Palang Joglo, Surakarta. *Skripsi*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- [3] DPU. (2002). Panduan Geoteknik 4 Timbunan Jalan Pada Tanah Lunak. Pedoman Kimpraswil No. Pt T-10-2002-B, 50-51.
- [4] Perhubungan, P. M. (2012). Transportasi Darat/Laut/Udara Lalu Lintas, Jalan. Peraturan Menteri Perhubungan tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, 58.
- [5] Okabe, S. (1961). General theory of earth pressures 12. *Journal of Japanese Society of Civil Engineers*.
- [6] Kulhawy, F.H., Mayne, P.W., 1990. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- [7] Hsiung, B.C.B., Yang, K.H., Aila, W., Ge, L., 2018. Evaluation of the wall deflection of a deep excavation in Central Jakarta using three-dimensional modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 72 (2018) 84-96.
- [8] Yong, K.Y., 2015. Learning lessons from the construction of Singapore Downtown line (DTL). In: *Proceedings of International Conference and Exhibition on Tunneling and Underground Space*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [9] Lim, A., Ou, C.Y., Hsieh, P.G., 2010. Evaluation of clay constitutive models for analysis of deep excavation under undrained conditions. *J. GeoEng.* 5, 9–20.
- [10] Calvello, N., Finno, R., 2004. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis. *Comput. Geotechn.* 31, 410–424.
- [11] Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., Guan, H., 2012. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soil and stiff Bangkok clays. *Soils Foundat.* 52 (4), 682–697.
- [12] Gebreselessie, H., Kempfert, G., 2005. Sensitive study of the hardening soil model parameters based on idealized excavation. In: *Proceedings of 11th International conference on computer methods and advances in geomechanics*, Torino, Italy, pp. 321–328.