

Studi Perbandingan Penurunan dan Tegangan Tanah Di Bawah Fondasi Lentur Menggunakan Metode Empiris dan Elemen Hingga

Nikita Hosiana¹⁾, Galuh Chrismaningwang¹⁾, Niken Silmi Surjandari¹⁾,
Raden Harya Dananjaya¹⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret,
Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126; Telp. 0271-634524
Email: nikitahosiana@student.uns.ac.id, galuh@ft.uns.ac.id, nikensilmisurjandari@staff.uns.ac.id,
dananjaya.harya@gmail.com

Abstrak

Pembangunan infrastruktur yang aman memerlukan fondasi yang kuat untuk menyalurkan beban bangunan ke tanah di bawahnya. Studi perilaku tanah di bawah beban sangat penting dalam geoteknik. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perhitungan tegangan tanah menggunakan teori Boussinesq dan UNStrain serta membandingkan nilai penurunan di sudut fondasi pada perhitungan penurunan segera metode Steinbrenner dan UNStrain. UNStrain adalah aplikasi yang menggunakan metode elemen hingga untuk menghitung deformasi dan tegangan tanah, tetapi masih memerlukan validasi karena program ini masih dalam tahap pengembangan, sehingga membutuhkan pengujian untuk akurasi. Validasi keakuratan perhitungan aplikasi UNStrain menggunakan metode empiris dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan tanah dengan teori Boussinesq. Penelitian dilakukan pada kasus fondasi fleksibel dengan beban terbagi rata lajur memanjang sebesar 90 kN/m di atas tanah jenis *sandy soil*. RMSE menunjukkan nilai 2,90 kN/m² pada tegangan vertikal dan 2,64 kN/m² pada tegangan horizontal, sedangkan MAPE pada tegangan vertikal bernilai 2,94% dan pada tegangan horizontal 5,79% yang menunjukkan *accurate* dalam perbandingan perhitungan tegangan tanah UNStrain terhadap teori Boussinesq. Perhitungan penurunan pada sudut fondasi dengan penurunan segera Steinbrenner menghasilkan nilai 0,40 cm dan UNStrain menghasilkan nilai 0,79 cm.

Kata kunci: Deformasi Tanah, Metode Elemen Hingga, Penurunan Tanah Steinbrenner, Tegangan Tanah Boussinesq, UNStrain

Abstract

Safe infrastructure development requires a strong foundation to distribute the building load to the ground below. The study of soil behavior under load is very important in geotechnical engineering. This research aims to compare soil stress calculations using the Boussinesq and UNStrain theories and compare the settlement values at foundation corners in the immediate settlement calculations using the Steinbrenner and UNStrain methods. UNStrain is an application that uses the finite element method to calculate soil deformation and stress. However, it still requires validation because this program is still in the development stage and requires testing for accuracy. The accuracy of UNStrain application calculations was validated using empirical methods by comparing soil stress values with the Boussinesq theory. The research was carried out in the case of a flexible foundation with an evenly distributed load in longitudinal strips of 90 kN/m on sandy soil. RMSE shows a value of 2.90 kN/m² for vertical stress and 2.64 kN/m² for horizontal stress, while MAPE for vertical stress is 2.94% and horizontal stress is 5.79%, which shows that it is accurate in comparison to UNStrain soil stress calculations towards Boussinesq's theory. Calculation of the settlement at the corner of the foundation with the immediate Steinbrenner settlement produces a value of 0.40 cm and UNStrain produces a value of 0.79 cm.

Keywords: Boussinesq Soil Stress, Finite Element Method, Soil Deformation, Steinbrenner Immediate Settlement, UNStrain



Copyright © 2024 The Author(s)
This is an open access article under the [CC -NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) license.

1. PENDAHULUAN

Konstruksi infrastruktur modern harus aman dan tahan lama. Inovasi dan pemahaman mendalam tentang berbagai elemen teknik sipil, termasuk fondasi, diperlukan seiring

perkembangan pesat di industri konstruksi. Fondasi adalah elemen konstruksi yang terletak di bagian bawah sebuah struktur, dan desainnya dalam geoteknik didasarkan pada studi perilaku tanah di bawah beban. Metode empiris dan

numeris adalah dua pendekatan yang paling umum digunakan. Metode empiris, seperti teori Boussinesq dan teori Steinbrenner, menawarkan pendekatan teoritis berdasarkan asumsi tertentu, yang memungkinkan perhitungan sederhana namun terbatas dalam menghadapi kondisi kompleks di lapangan. Tegangan adalah besarnya gaya yang bekerja pada luas area tertentu, dan keadaan tegangan adalah dasar untuk mengevaluasi deformasi dan kekuatan tanah. Memahami perilaku tegangan-regangan tanah memungkinkan prediksi karakteristik beban-deformasi yang akurat, sehingga mendukung desain bangunan atas dan fondasi yang lebih baik (Roscoe, 1970). Deformasi tanah terjadi saat kekangan permukaan struktural dan deformasi geser antarmuka tanah-struktur berinteraksi akibat beban bangunan yang diteruskan melalui fondasi (Liu et al., 2013). Metode elemen hingga memecah sistem kontinu menjadi elemen lebih kecil, memungkinkan analisis terpisah dari bagian-bagian tersebut sebelum hasilnya digabungkan untuk membentuk gambaran sistem yang kontinu (Desai, 1979). UNStrain adalah aplikasi yang sedang dikembangkan di laboratorium Mekanika Tanah UNS oleh penulis keempat, sehingga masih membutuhkan proses validasi atas akurasi.

Tujuan penelitian ini adalah untuk memvalidasi perhitungan tegangan total UNStrain terhadap perhitungan empiris tegangan tanah total dengan teori Boussinesq sebagai tambahan tegangan serta membandingkan nilai penurunan segera berdasarkan teori Steinbrenner dan UNStrain. Parameter statistik *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) akan digunakan untuk menganalisis validasi dan perbandingan ini.

Hasil analisis diharapkan dapat membantu insinyur dalam membangun fondasi yang kokoh dan aman, meningkatkan pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku tanah di bawah fondasi, memberikan gambaran tentang efektivitas perhitungan komputasi dalam menghitung tegangan dan deformasi tanah, mengungkapkan kelebihan dan batasan setiap metode, serta menunjukkan kredibilitas UNStrain dalam perhitungan tegangan dan deformasi tanah.

2. METODE

Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data asumsi yang mencakup data parameter tanah, data fondasi, dan data koordinat tanah yang akan diteliti. Parameter tanah meliputi berat volume tanah, berat volume *saturated*, modulus elastisitas, sudut gesek dalam, *poisson ratio*, dan kohesi tanah. Data fondasi yang dibutuhkan mencakup model fondasi, lebar fondasi, kondisi beban, dan besar beban yang diterapkan. Kondisi beban yang digunakan adalah beban terbagi rata pada lajur memanjang. Analisis data koordinat didasarkan pada isobar tegangan teori Boussinesq untuk beban terbagi rata dengan lajur memanjang menurut Sower (1979).

Metode penelitian

Perhitungan Tegangan Tanah

Perhitungan tegangan tanah teori Boussinesq dilakukan dengan bantuan Microsoft Excel. Perhitungan ini bertujuan untuk memperoleh nilai tegangan tanah vertikal dan horizontal total di setiap titik koordinat yang dianalisis. Hasil perhitungan ini akan dibandingkan dengan hasil dari aplikasi UNStrain. Langkah-langkah yang dilakukan adalah menghitung tambahan tegangan akibat beban menggunakan teori Boussinesq untuk kondisi beban terbagi rata lajur memanjang di setiap titik koordinat yang diteliti; menghitung tegangan tanah *overburden* di titik-titik penelitian; serta memperoleh nilai tegangan tanah total di titik-titik penelitian dengan menambahkan tambahan tegangan dan tegangan tanah *overburden*.

Perhitungan Penurunan Segera dengan Metode Streinbrenner

Perhitungan penurunan segera tanah bertujuan untuk mengukur perubahan posisi suatu titik pada tanah terhadap titik referensi yang tetap. Perhitungan ini dilakukan menggunakan rumus empiris berdasarkan teori Streinbrenner dengan bantuan Microsoft Excel. *Output* dari perhitungan ini adalah nilai penurunan segera pada sudut fondasi. Hasil perhitungan ini akan dibandingkan dengan perhitungan deformasi tanah vertikal di sudut fondasi dari aplikasi UNStrain.

Perhitungan menggunakan UNStrain

Perhitungan menggunakan UNStrain dilakukan untuk memperoleh nilai tegangan baik vertikal maupun horizontal di setiap titik sampel penelitian dan deformasi tanah vertikal di sudut fondasi. Nilai yang dihasilkan dari proses ini akan digunakan untuk memvalidasi keakuratan perhitungan tegangan tanah dengan teori Boussinesq. Metode yang digunakan dalam aplikasi UNStrain adalah metode elemen hingga, dan analisis tegangan menggunakan teori elastisitas. Tahap-tahap perhitungan nilai tegangan dan deformasi tanah dengan UNStrain meliputi: menentukan node (titik) dan elemen pada diskritisasi tanah; menentukan *essential boundary condition* untuk memodelkan deformasi berdasarkan kondisi batas yang diterapkan dalam perhitungan; menentukan *natural boundary condition* untuk memodelkan pengaruh gaya atau tegangan pada tepi atau permukaan luar sistem, mengacu pada pembebanan yang diberikan; melakukan *input* menggunakan Python dengan memasukkan data titik, elemen, *essential boundary condition*, dan *natural boundary condition*; serta menjalankan program untuk menghasilkan matriks hasil pengolahan data dan mendapatkan hasil analisis deformasi tanah.

Tabel 1. Interpretasi nilai MAPE dalam memprediksi keakuratan

MAPE (%)	Interpretasi
<10	Accurate
10-20	Good
20-50	Reasonable
>50	Inaccurate

Sumber: Setiawan, dkk, 2021

Validasi UNStrain

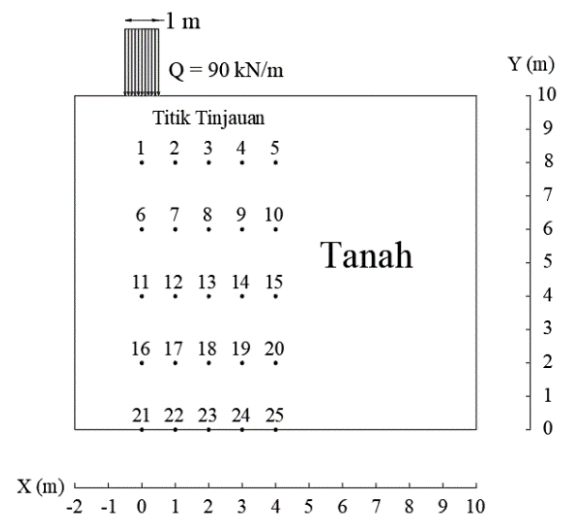
Proses validasi hasil perhitungan tegangan tanah menggunakan aplikasi UNStrain dilakukan dengan membandingkannya dengan hasil perhitungan dari teori Boussinesq. Nilai deformasi vertikal pada sudut fondasi UNStrain akan dibandingkan dengan penurunan segera teori Streinbrenner. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk menilai keakuratan nilai tegangan tanah UNStrain terhadap teori Boussinesq. Validasi ini dilakukan menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Semakin kecil nilai RMSE, semakin baik kualitas prediksi model. Tingkat keakuratan UNStrain dalam menghitung

tegangan total dibandingkan dengan metode empiris teori Boussinesq berdasarkan persentase MAPE akan diperoleh dari Tabel 1.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Tegangan Tanah Teori Boussinesq

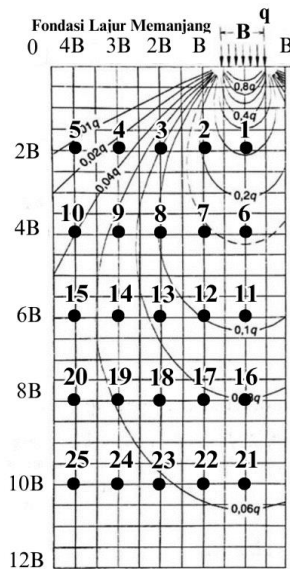
Perhitungan berdasarkan teori Boussinesq menghasilkan nilai tambahan tegangan ($\Delta\sigma$) pada suatu titik akibat beban, baik secara vertikal ($\Delta\sigma_z$) maupun horizontal ($\Delta\sigma_x$). Teori Boussinesq mengasumsikan bahwa tanah bersifat elastis, isotropis, homogen, tidak mengalami perubahan volume, tidak tegang sebelum diberi beban, mengikuti hukum Hooke dalam hubungan tegangan-regangan, dan distribusi tegangan akibat beban tidak bergantung pada jenis tanah. Kondisi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini adalah beban terbagi rata berbentuk lajur memanjang.



Gambar 1. Titik Pengamatan

Tegangan vertikal terbesar pada 25 titik pengamatan, seperti terlihat pada Gambar 1, terjadi pada titik 21 dengan koordinat (0, 0) sebesar 190.705,80 N/m². Tegangan vertikal terkecil terjadi pada titik 5 dengan koordinat (4, 8) sebesar 42.759,73 N/m². Tegangan horizontal terbesar juga terjadi pada titik 21 dengan koordinat (0, 0) sebesar 98.166,77 N/m², sementara tegangan horizontal terkecil terjadi pada titik 5 dengan koordinat (4, 8) sebesar 19.652,22 N/m². Nilai-nilai tegangan tanah ini menunjukkan bahwa tanah berada

dalam kondisi tekan. Hasil ini konsisten dengan isobar tegangan untuk beban terbagi rata berbentuk lajur memanjang berdasarkan teori Boussinesq, seperti terlihat pada Gambar 2. Hasil ini juga mendukung ketepatan isobar tegangan menurut teori Boussinesq. Semakin dalam titik yang ditinjau, semakin kecil nilai tegangan tanah vertikal dan horizontal. Semakin besar nilai x dari koordinat titik yang ditinjau, yang menandakan semakin jauh dari pusat beban, semakin kecil pula nilai tegangan tanah vertikal dan horizontal.



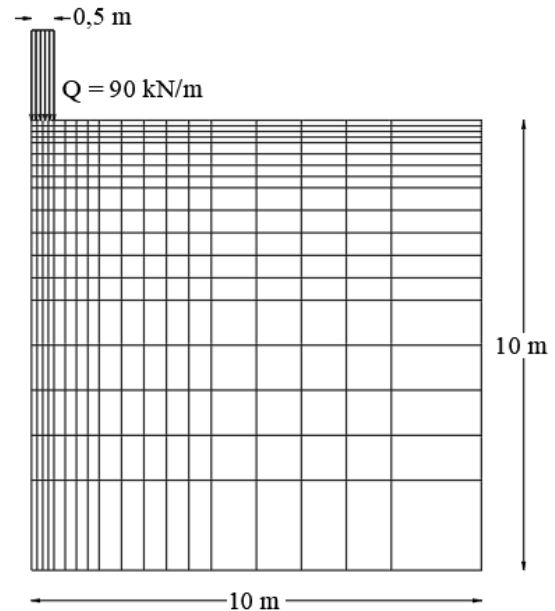
Gambar 2. Isobar tegangan untuk beban terbagi rata berbentuk lajur memanjang dan bujur sangkar didasarkan teori Boussinesq (Sower, 1979)

Perhitungan Penurunan Segera Tanah Teori Steinbrenner

Penurunan segera tanah dihitung untuk mengetahui besarnya penurunan vertikal yang dihasilkan oleh distorsi massa tanah yang tertekan. Penurunan tanah dalam penelitian ini adalah penurunan segera di sudut fondasi yang dihitung secara empiris menggunakan teori penurunan segera Steinbrenner akibat beban terbagi rata berbentuk lajur memanjang pada fondasi fleksibel di lapisan tanah yang tebal dan terbatas. Faktor koreksi kedalaman untuk penurunan segera diabaikan karena fondasi berada tepat di atas permukaan tanah.

Nilai $L/B = \infty$ dipilih karena ketiadaan kondisi batas yang ditentukan pada kasus yang diteliti. Penyesuaian parameter-parameter tertentu diperlukan karena hasil perhitungan penurunan

segera akan dibandingkan dengan hasil perhitungan yang dilakukan oleh UNStrain. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penurunan segera pada sudut fondasi adalah sebesar 0,40 cm.



Gambar 3. Diskritisasi tanah di bawah fondasi elemen segiempat

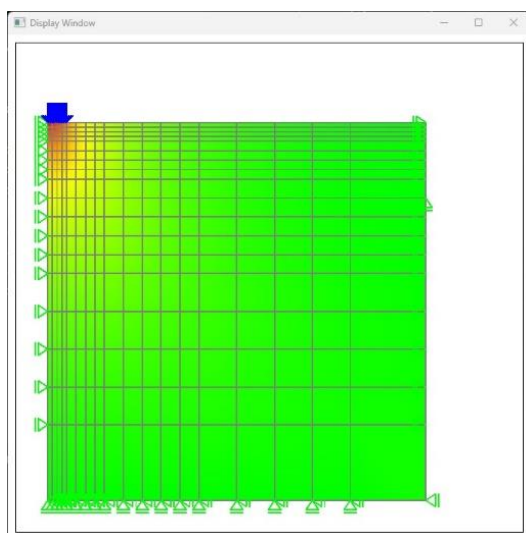
Diskritisasi Tanah di Bawah Fondasi

Diskritisasi muncul karena keterbatasan model matematika dalam menangani jumlah elemen yang besar, yang dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam pemodelan geometri dan distribusi perpindahan. Diskritisasi tanah adalah proses memecah tanah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil untuk analisis lebih lanjut. Proses diskritisasi tanah di bawah fondasi dilakukan secara manual dengan bantuan perangkat lunak AutoCAD. Hasil diskritisasi tanah digunakan sebagai input untuk *command line* yang dibutuhkan dalam analisis menggunakan UNStrain, yang terdiri dari informasi nodal dan elemen segiempat. Analisis dilakukan secara dua dimensi (2D) pada kedalaman 10 meter serta lebar 10 meter ke arah kiri dan kanan dari pusat fondasi. Dengan asumsi kondisi kiri kanan simetris, analisis dilakukan hanya pada separuh bagian. Diskritisasi tanah ini ditunjukkan pada Gambar 3. Informasi koordinat titik nodal pada hasil diskritisasi tanah berfungsi untuk menggambarkan perilaku penurunan dan tegangan tanah di setiap titik dalam model elemen hingga.

Running Aplikasi UNStrain

Perhitungan menggunakan aplikasi UNStrain akan menghasilkan *output* berupa nilai tegangan dan deformasi tanah. Aplikasi ini memerlukan *input* berupa data *coding* Python yang mencakup *nodes*, *etopo*, *essentialBcs*, *load*, modulus elastisitas (E), dan angka poisson (ν). Data hasil *coding* Python kemudian dipanggil atau diolah oleh *command line* dan menghasilkan *output*. Hasil dari aplikasi UNStrain mencakup nilai tegangan dan deformasi tanah vertikal serta horizontal.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tegangan vertikal tertinggi terjadi pada titik 21 dengan koordinat (0, 0), yaitu sebesar -194.588,21 N/m². Tegangan vertikal terendah terjadi pada titik 5 dengan koordinat (4, 8), yaitu sebesar -38.419,12 N/m². Nilai negatif menunjukkan kondisi tekan. Tegangan horizontal tertinggi juga terjadi pada titik 21 dengan koordinat (0, 0), yaitu sebesar -102.256,99 N/m², sedangkan tegangan horizontal terendah terjadi pada titik 1 dengan koordinat (0, 8) dengan nilai -18.275,13 N/m². Hal ini menunjukkan bahwa tegangan tanah vertikal dan horizontal cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman titik yang ditinjau. Semakin jauh koordinat x dari pusat beban (0), semakin kecil tegangan vertikal dan semakin besar tegangan horizontal. Ilustrasi tegangan tanah pada UNStrain dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Tegangan tanah di bawah fondasi UNStrain

Hasil menunjukkan bahwa deformasi vertikal terbesar terjadi pada titik 1 dengan koordinat (0,

8), yaitu sebesar -4,98 mm, di mana nilai negatif menunjukkan deformasi ke arah bawah. Deformasi vertikal terkecil terjadi pada titik-titik sepanjang garis dasar ($y = 0$), yaitu sebesar 0,00 mm. Ini menunjukkan tidak adanya perubahan ketinggian tanah pada titik tersebut karena pengaruh kondisi batas (*boundary condition*). Nilai deformasi vertikal menurun seiring dengan bertambahnya kedalaman, sesuai dengan prinsip bahwa penurunan tanah umumnya lebih besar di permukaan dan berkurang dengan kedalaman akibat distribusi beban yang diterapkan. Distribusi deformasi vertikal menunjukkan bahwa tanah mengalami penurunan terbesar di bagian atas, kemungkinan karena beban yang diterapkan merata di permukaan tanah.

Deformasi horizontal terbesar terjadi pada titik 9 dengan koordinat (3, 6), yaitu sebesar 0,64 mm, dengan nilai positif menunjukkan arah deformasi ke kanan. Ini menunjukkan bahwa pergeseran tanah ke kanan terbesar terjadi di area ini. Deformasi horizontal terkecil terjadi pada titik-titik sepanjang garis vertikal ($x = 0$), yaitu sebesar 0,00 mm, menunjukkan tidak adanya pergeseran tanah di area ini karena pengaruh kondisi batas. Tanah mengalami pergeseran lateral lebih besar di bagian kanan. Distribusi deformasi horizontal menunjukkan pola pergeseran tanah ke arah kanan, kemungkinan akibat tekanan lateral atau faktor eksternal yang mempengaruhi stabilitas tanah di area ini. Ilustrasi deformasi tanah pada UNStrain dapat dilihat pada Gambar 5.

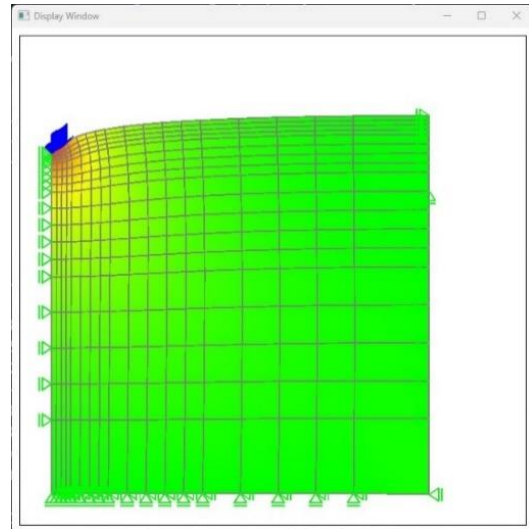
Analisis Perbandingan Perhitungan Empiris dengan Metode Elemen Hingga Tegangan dan Penurunan Tanah

Analisis perbandingan tegangan tanah akan menggunakan metode RMSE dan MAPE dengan nilai aktual berasal dari perhitungan empiris dan nilai prediksi berasal dari perhitungan metode elemen hingga yang dihasilkan oleh UNStrain. Hasil perbandingan dapat ditemukan dalam Tabel 2. Dengan MAPE dikategorikan sebagai *accurate*, sesuai dengan kriteria pada Tabel 1, karena nilai MAPE-nya kurang dari 10%. MAPE dari perhitungan UNStrain terhadap teori Boussinesq untuk tegangan vertikal adalah 2,94%, dan untuk tegangan horizontal adalah 5,79%. Nilai RMSE tegangan tanah vertikal sebesar 2,90 kN/m² dan tegangan tanah horizontal sebesar 2,64 kN/m².

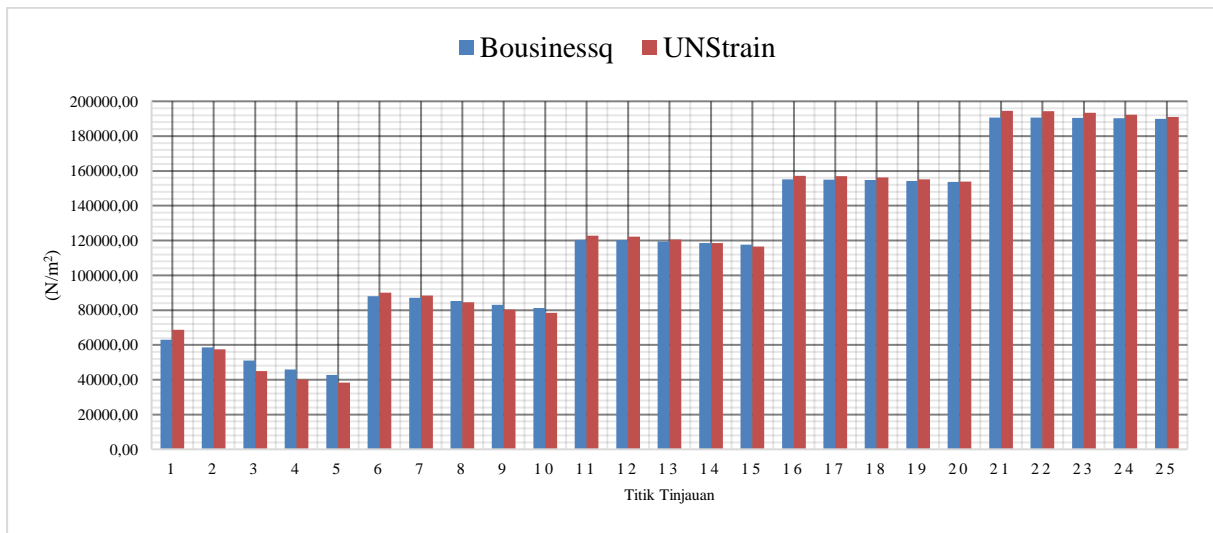
Hal ini menunjukkan perhitungan tegangan tanah UNStrain cukup sesuai dengan perhitungan tegangan tanah total dengan tambahan tegangan teori Boussinesq.

Tabel 2. Perbandingan tegangan tanah UNStrain terhadap teori Boussinesq

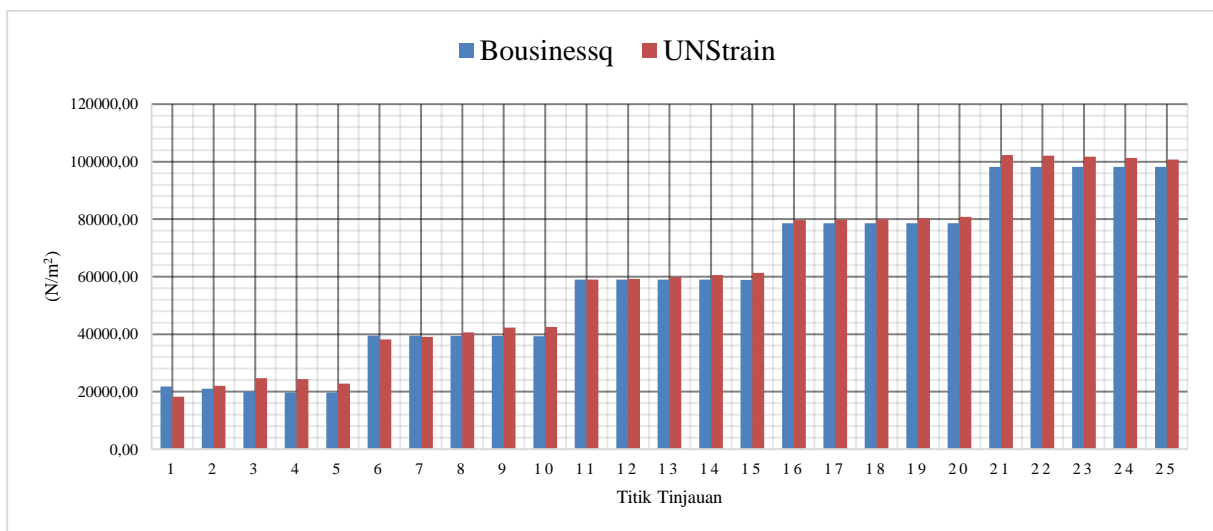
Tinjauan	UNStrain	
	RMSE (kN/m ²)	MAPE (%)
Tegangan tanah vertikal	2,90	2,94
Tegangan tanah horizontal	2,64	5,79



Gambar 5. Deformasi tanah di bawah fondasi UNStrai



Gambar 6. Perbandingan tegangan vertikal tanah

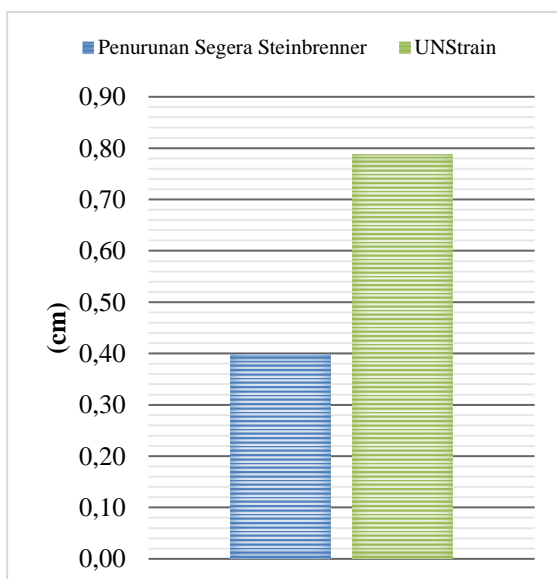


Gambar 7. Perbandingan tegangan horizontal tanah

Perbedaan dalam perhitungan antara teori Boussinesq dan UNStrain yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7 disebabkan oleh penggunaan metode yang berbeda. Teori Boussinesq menggunakan pendekatan empiris untuk menghitung distribusi tegangan tanah akibat beban, sementara UNStrain menggunakan metode elemen hingga. Nilai RMSE dan MAPE di bawah 10% menunjukkan bahwa UNStrain dapat dianggap akurat dalam mereplikasi hasil empiris dari teori Boussinesq untuk tegangan tanah.

Perbandingan penurunan tanah dalam analisis ini akan menggunakan nilai penurunan segera dari teori Steinbrenner secara empiris, serta nilai yang dihitung secara metode elemen hingga menggunakan aplikasi UNStrain. Perbandingan nilai penurunan tanah akan dilakukan pada sudut fondasi seperti yang tercantum dalam Tabel 3.

Metode Steinbrenner (1934) berdasarkan teori elastisitas memperlakukan tanah sebagai medium elastis linier dengan memperhitungkan parameter seperti modulus elastisitas dan angka poisson, serta menggunakan solusi empiris sederhana. UNStrain menggunakan metode elemen hingga untuk analisis penurunan tanah, hanya mempertimbangkan deformasi elastis tanah dan mengabaikan perilaku plastis dalam analisisnya.



Gambar 8. Perbandingan penurunan tanah pada sudut fondasi

Tabel 3. Perbandingan nilai penurunan tanah empiris dan metode elemen hingga

Tinjauan	Penurunan	
	Seegera Steinbrenner (cm)	UNStrain (cm)
Sudut fondasi	0,40	0,79

4. SIMPULAN

Hasil validasi perhitungan tegangan tanah secara metode elemen hingga dengan UNStrain terhadap perhitungan empiris dengan teori Boussinesq dengan *Root Mean Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), antara lain RMSE pada tegangan vertikal bernilai 2,90 kN/m² dan tegangan horizontal 2,64 kN/m², menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan prediksi tegangan vertikal menggunakan UNStrain cukup kecil; MAPE pada tegangan vertikal bernilai 2,94% dan tegangan horizontal 5,79% pada UNStrain, dikategorikan *accurate* karena kurang dari 10%.

Nilai penurunan segera metode Steinbrenner (1934) dan nilai penurunan UNStrain pada sudut fondasi, antara lain penurunan segera teori Steinbrenner bernilai 0,40 cm dan UNStrain bernilai 0,79 cm.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada Universitas Sebelas Maret Surakarta dan semua pihak yang terlibat yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

6. DAFTAR PUSTAKA

Desai, C.S., 1979. Elementary finite element method. Civil Engineering and Engineering Mechanics Series.

Hardiyatmo, H. C., 2010. Mekanika Tanah 2 edisi keempat. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C., 2017. Teknik Fondasi 1 edisi ketiga. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Hermawan, B., Kuningsih, T.W., 2019. Analisis Kekuatan Tanah Dasar pada Perkerasan Kaku di Jalan Raya Pelabuhan

- Tanjung Priok. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 4(2), 118-127.
- Liu, R.D., Zheng, J.G., Li, Z.Y., 2013. Research on static mechanical properties of interface between structure and gravel underlayer. *Applied Mechanics and Materials*, 353, 430-435.
- Pawitrasari, S., 2017. Pengaruh Deformasi pada Konstruksi Pondasi Menerus di Atas Tanah Timbunan dengan Menggunakan Program Plaxis V 8.2.
- Roscoe, K. H., 1970, The Influence of Strains in Soil Mechanics: *Geotechnique*, v. 20, p. 129–170.
- Setiawan, I.N., Kurniawan, R., Yuniarto, B., Caraka, R.E., Pardamean, B., 2021. Parameter optimization of support vector regression using Harris hawks optimization. *Procedia Computer Science*, 179, 17-24.
- Sowers, G.F., 1979. *Introductory Soil Mechanics & Foundations*. Geotechnical.
- Steinbrenner, W., 1934. Tafeln zur Setzungsberechnung. *Die Strasse*, 1, 121.
- Sukmawaty, D., 2018. Analisis Deformasi Tanah Lunak Terhadap Perkuatan Geogrid Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Siimo Engineering: Journal Teknik Sipil*, 2(1).
- Zhang, F., Pei, H., Song, H., Zhu, H., 2022. Development of an FBG–MEMS-Based 3-D Principal Stress Monitoring Device in Soil. *IEEE Sensors Journal*, 23(3), 1972-1981.