



Pengaruh Sand Cushion Terhadap Daya Dukung Fondasi Dangkal Di Atas Tanah Lempung

Agnes T. Mandagi^{#a}, Alva N. Sarajar^{#b}, Elsanía H. Mende^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^aatmandagi@gmail.com, ^balva.sarajar@unsrat.ac.id, ^celsaniamende021@student.unsrat.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan *sand cushion* (zona penggantian pasir) sebagai solusi perbaikan tanah dasar guna meningkatkan kestabilan fondasi dangkal. Fokus utama penelitian diarahkan pada perbandingan kondisi teknis antara tanah asli dengan tanah yang telah diberikan tambahan *sand cushion* melalui berbagai variasi ketebalan. Hasil analisis data menunjukkan bahwa penerapan *sand cushion* membantu meningkatkan kekuatan tanah dalam menahan beban bangunan. Berdasarkan data yang didapat, diperoleh nilai daya dukung untuk masing-masing variasi ketebalan (h): 0,25=135 kPa; 0,5=153 kPa; 0,75 = 172 kPa dan 1,0 = 193 kPa. Peningkatan nilai daya dukung ultimit ini dipicu oleh besarnya nilai sudut geser dalam (ν) pada material pasir yang secara langsung memperkuat faktor perlawanan tanah seiring dengan bertambahnya tebal *sand cushion*. Melalui perhitungan penurunan, terkonfirmasi bahwa lapisan ini berfungsi efektif sebagai zona penyebar tegangan yang mampu meminimalkan beban langsung pada lapisan lempung guna mencegah deformasi yang berlebihan. Dengan demikian, metode penggantian sebagian tanah dengan pasir merupakan strategi yang efisien dalam mengoptimalkan kinerja serta stabilitas struktur fondasi pada lahan lunak.

Kata kunci: sand cushion, nilai daya dukung ultimit, penurunan, deformasi

1. Pendahuluan

Fondasi memegang peranan vital dalam sistem struktur bangunan, di mana fungsinya adalah mentransfer beban dari struktur atas (upper structure) menuju lapisan tanah keras yang mampu memikulnya secara aman. Stabilitas sebuah bangunan sangat bergantung pada pemilihan jenis fondasi yang tepat, yang harus mempertimbangkan beban rencana baik beban mati, beban hidup, maupun beban lingkungan seperti angin dan gempa serta parameter geoteknis dari tanah dasar sebagai media pendukung utama.

Di tengah pesatnya perkembangan infrastruktur di Indonesia, tantangan ketersediaan lahan konstruksi menjadi isu yang signifikan. Kondisi ini sering kali memaksa para praktisi teknik sipil untuk mendirikan bangunan di atas tanah dengan karakteristik mekanis yang kurang menguntungkan, seperti tanah lempung. Dalam dunia geoteknik, tanah lempung sering diklasifikasikan sebagai tanah bermasalah (*problematic soil*). Hal ini dikarenakan sifat fisisnya yang memiliki plastisitas tinggi dan permeabilitas yang sangat rendah, serta sifat mekanis berupa kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan tanah lempung sangat rentan terhadap perubahan volume akibat fluktuasi kadar air, yang secara langsung membatasi daya dukung tanah terhadap fondasi dangkal. Salah satu solusi rekayasa yang sering diterapkan karena efektivitas dan nilai ekonomisnya adalah metode perbaikan tanah dengan penggunaan lapisan pasir bantalan atau *sand cushion*. Secara teknis, mekanisme *sand cushion* bekerja sebagai lapisan antara yang kaku untuk mendistribusikan beban dari dasar fondasi ke area yang lebih luas pada lapisan tanah lempung di bawahnya. Melalui fenomena penyebaran tegangan ini, tekanan yang diterima tanah asli menjadi lebih kecil sehingga risiko keruntuhan geser dapat diminimalisir dan penurunan (*settlement*) dapat dikontrol. Relevansi penggunaan material ini diperkuat oleh studi Bhardwaj & Sharma (2023), yang menyatakan bahwa penambahan lapisan

pasir secara signifikan mampu meningkatkan kapasitas dukung fondasi, di mana performanya sangat bergantung pada konfigurasi geometris berupa rasio ketebalan lapisan pasir terhadap lebar fondasi (h/B). Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi secara mendalam sejauh mana efektivitas *sand cushion* dalam meningkatkan stabilitas fondasi dangkal yang diletakkan di atas tanah lempung. Fokus penelitian ini adalah melakukan analisis komparatif antara kondisi tanah asli tanpa perkuatan dengan kondisi tanah yang telah diberikan variasi ketebalan *sand cushion*. Untuk mendapatkan hasil yang akurat dan representatif, analisis dilakukan melalui dua pendekatan utama: perhitungan analitis berdasarkan teori kapasitas dukung dan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D yang berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*). Dengan melakukan studi parametrik pada variasi rasio h/B sebesar 0,25; 0,50; 0,75; hingga 1,00, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa pedoman aplikatif mengenai optimasi ketebalan lapisan pasir dalam perencanaan fondasi di lapangan.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis dan numerik yang bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan *sand cushion* terhadap peningkatan daya dukung serta perilaku deformasi fondasi dangkal di atas tanah lempung. Secara analitis, evaluasi dilakukan melalui perhitungan teoritis yang mencakup distribusi tegangan, kapasitas dukung ultimit, faktor keamanan, dan estimasi penurunan fondasi. Analisis ini menjadi landasan dasar dalam memahami parameter fisik dan mekanik tanah lempung serta efektivitas lapisan perkuatan dalam menopang beban struktur.

Untuk memperkuat hasil analisis, penelitian ini juga menerapkan pendekatan numerik dengan memanfaatkan perangkat lunak PLAXIS 2D yang berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*). Simulasi ini memungkinkan pemodelan interaksi tanah-fondasi secara lebih representatif melalui studi parametrik dengan memvariasikan rasio ketebalan pasir terhadap lebar fondasi (h/B) pada nilai 0,25; 0,50; 0,75; dan 1,00. Integrasi kedua metode ini bertujuan untuk memvalidasi mekanisme keruntuhan serta distribusi tegangan secara rinci guna mendapatkan konfigurasi perbaikan tanah yang paling optimal.

2.2 Pengumpulan Data

Prosedur pengumpulan dan analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis yang saling berkesinambungan. Tahap awal difokuskan pada kalkulasi distribusi tegangan pada tanah dasar akibat pembebanan fondasi untuk mengidentifikasi mekanisme penyebaran beban, baik pada profil tanah asli maupun tanah yang telah diperkuat dengan *sand cushion*. Selanjutnya, dilakukan penetapan kondisi dasar (*baseline condition*) melalui analisis daya dukung dan faktor keamanan fondasi dangkal tanpa perbaikan. Data ini kemudian dibandingkan dengan hasil analisis fondasi yang telah diperkuat *sand cushion* pada berbagai variasi rasio ketebalan (h/B), guna mengukur tingkat peningkatan stabilitas yang dihasilkan.

Selain parameter daya dukung, pengumpulan data juga mencakup evaluasi penurunan (*settlement*) untuk mengukur efektivitas lapisan pasir dalam mereduksi deformasi vertikal. Secara analitis, kapasitas dukung ultimit dihitung menggunakan teori Terzaghi untuk kondisi pembebanan vertikal sentris sebagai parameter kontrol utama. Seluruh rangkaian data tersebut kemudian divalidasi melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D. Tahap akhir ini bertujuan untuk mengekstraksi data perilaku interaksi tanah-fondasi secara mendalam, termasuk pola distribusi tegangan, mekanisme keruntuhan, serta karakteristik deformasi pada setiap variasi ketebalan *sand cushion* yang diuji.

2.3 Data Penelitian

2.3.1 Data Tanah

Pemodelan tanah dasar dalam analisis numerik ini mengadopsi model konstitutif Mohr–Coulomb, yang mampu merepresentasikan perilaku elastis–plastis tanah dengan menggunakan

parameter kekuatan geser internal. Mengingat karakteristik tanah dasar adalah lempung dengan permeabilitas rendah, material dimodelkan dalam kondisi Undrained A. Asumsi ini dipilih karena pada jangka pendek, air pori tidak sempat mengalir keluar saat pembebanan terjadi. Parameter teknis tanah yang diinputkan meliputi:

- Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17,547 kN/m³
- Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 17,547 kN/m³
- Sudut geser dalam (ϕ) = 24,96°
- Modulus elastisitas (E) = 2330 kPa
- Poisson's ratio (ν') = 0,35

Pemilihan model Mohr–Coulomb didasarkan pada stabilitas numeriknya dalam menangkap fenomena kegagalan tanah di bawah pembebanan statis.

2.3.2 Data Beton

Elemen fondasi telapak (*footing*) dimodelkan sebagai material *Linear Elastic* dan *Non-Porous*. Karakteristik ini sesuai dengan sifat beton yang cenderung berperilaku elastis pada rentang tegangan kerja sebelum mencapai titik layan.

Parameter material beton yang digunakan adalah:

- Berat isi (γ) = 24 kN/m³
- Modulus elastisitas (E) = 2,0.10⁷ kN/m²
- Poisson's ratio (ν') = 0.15

Dimensi elemen struktural:

- Footing: 1.0 m × 1.0 m

Pendekatan elastis linier memastikan fokus analisis tetap pada distribusi tegangan dan interaksi antarmuka (interface) antara fondasi dan tanah tanpa komplikasi perilaku non-linier dari material beton itu sendiri.

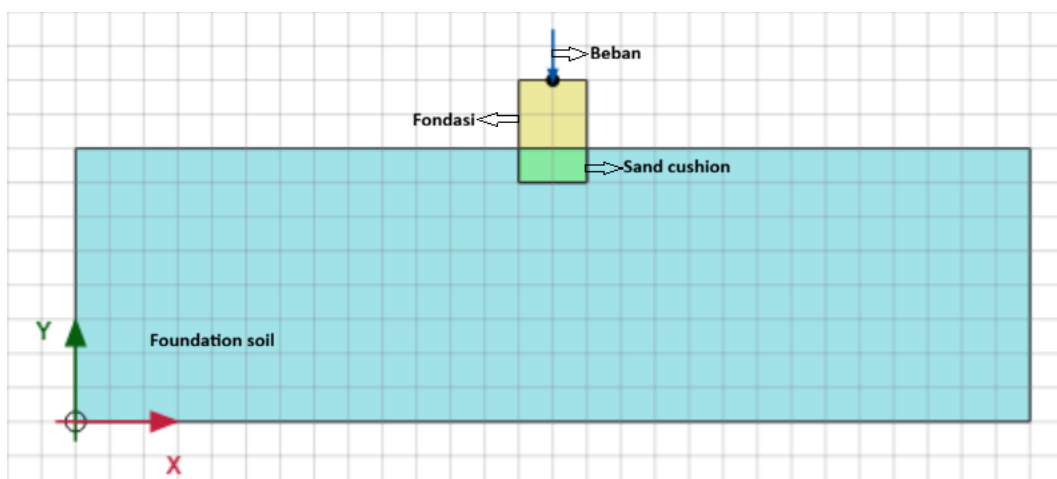
2.3.3 Data Sand Cushion

Material pasir bantalan dimodelkan dengan model Mohr–Coulomb namun dalam kondisi *Drained*. Hal ini dikarenakan pasir merupakan material granular dengan permeabilitas tinggi yang memungkinkan air pori segera keluar saat terbebani, sehingga tegangan efektif langsung bekerja.

Parameter yang digunakan adalah:

- *Sand cushion*
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 20 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 22 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 40°
 - Modulus elastisitas (E) = 50000 kPa
 - Poisson's ratio (ν') = 0,25

Pemodelan ini sangat krusial untuk mensimulasikan mekanisme transfer beban dari pasir ke tanah lempung secara akurat.



Gambar 1. Pemodelan Tanah-Sand Cushion pada PLAXIS 2D

2.4 Prinsip Dasar Desain (Principles)

2.4.1 Konsep Dasar Perbaikan Tanah (Overexcavation and Replacement)

Metode overexcavation and replacement bertujuan mereduksi tegangan yang mencapai tanah asli melalui penggunaan material pengganti yang lebih stabil. Tekanan neto (P_n) pada dasar fondasi dihitung dengan persamaan:

$$P_n = \frac{P + W_f}{A_f} - \sigma'_D$$

Di mana P adalah gaya kolom, W_f berat fondasi, A_f luas fondasi, dan σ'_D tegangan efektif dasar fondasi. Tegangan vertikal tambahan ($\Delta\sigma_z$) pada dasar zona penggantian diestimasi berdasarkan distribusi luas fondasi tersebar (A'_f):

$$\Delta\sigma_z = P_n \frac{A_f}{A'_f}$$

Dimensi penyebaran beban (L'_f dan B'_f) ditentukan oleh ketebalan zona ganti (h_r) dan sudut distribusi (φ):

$$L'_f = L_f + 2h_r \tan\varphi$$

$$B'_f = B_f + 2h_r \tan\varphi$$

Total tegangan vertikal (σ_z) dan efektif (σ'_z) pada dasar zona ganti didefinisikan sebagai akumulasi tegangan overburden awal (σ_{z0}) dan tegangan tambahan ($\Delta\sigma_z$):

$$\sigma_z = \sigma_{z0} + \Delta\sigma_z$$

$$\sigma'_z = \sigma'_{z0} + \Delta\sigma_z$$

Analisis kondisi undrained menggunakan tegangan total, sedangkan kondisi drained menggunakan tegangan efektif.

2.4.2 Moda Keruntuhan (Failure Modes)

Analisis stabilitas fondasi dengan *sand cushion* mempertimbangkan beberapa mekanisme kegagalan berikut:

1. Keruntuhan Geser Umum (*General Shear Failure*): Terjadi di dalam zona penggantian apabila material timbunan terlalu lemah, dimensi fondasi terlalu kecil, atau beban berlebih. Moda ini digunakan untuk memverifikasi kekuatan material timbunan dan dimensi fondasi.
2. Keruntuhan Tusuk Menembus Zona Penggantian (*Punching Failure*): Terjadi jika *sand cushion* terlalu tipis dan tanah dasar terlalu lemah. Moda ini menjadi parameter utama dalam menentukan ketebalan minimum zona penggantian.
3. Keruntuhan Terdistribusi (*Distributed Failure*): Dikendalikan oleh kapasitas dukung tanah di bawah zona perbaikan. Penggunaan material dengan modulus tinggi dan ketebalan yang cukup berfungsi mendistribusikan beban ke area yang lebih luas pada tanah asli.
4. Keruntuhan Tusuk Zona Penggantian: Terjadi apabila luas area zona penggantian terlalu kecil sehingga seluruh blok perkuatan menusuk ke dalam tanah dasar yang lemah.

Kapasitas dukung ultimit minimum dari seluruh moda keruntuhan tersebut, baik dalam kondisi jangka pendek (short-term) maupun jangka panjang (long-term), ditetapkan sebagai nilai acuan desain. Jika kapasitas dukung izin lebih kecil dari tekanan kerja, maka dimensi fondasi serta properti material zona penggantian harus disesuaikan hingga memenuhi kriteria keamanan.

2.5 Pertimbangan Desain (Design Consideration)

Perancangan fondasi dengan perbaikan tanah wajib meninjau seluruh moda keruntuhan yang mungkin terjadi. Analisis dilakukan melalui perhitungan kapasitas dukung ultimit dan penentuan faktor keamanan (*factor of safety*) yang memadai untuk menjamin stabilitas struktur terhadap kegagalan geser maupun penurunan berlebih.

2.5.1 Keruntuhan Geser Umum pada Zona Pengganti (General Shear Failure Within Replaced Zone)

Estimasi kapasitas dukung ultimit (q_{ult}) pada lapisan material timbunan dihitung menggunakan persamaan daya dukung untuk tanah homogen:

$$q_{ult} = N_c c s_c d_c + 0,5 \gamma' B_f N_y s_y d_y + \sigma'_D N_q s_q d_q$$

Di mana c adalah kohesi timbunan, γ' merupakan berat satuan efektif timbunan, dan σ'_D adalah tegangan overburden efektif pada level dasar fondasi. Parameter N_c, N_y, N_q merupakan faktor kapasitas dukung timbunan, sedangkan s dan d masing-masing merepresentasikan faktor bentuk dan faktor kedalaman fondasi. Kapasitas dukung pada moda ini sangat bergantung pada kualitas mekanis material timbunan serta dimensi geometris fondasi.

2.5.2 Keruntuhan Tusuk Menembus Zona Penggantian (Punching Failure through the Replaced Zone)

Metode Meyerhof dan Hanna (1978) digunakan untuk mengestimasi kapasitas dukung ultimit pada sistem tanah berlapis di mana lapisan kaku (*sand cushion*) berada di atas lapisan lunak (*underlying soil*). Persamaan kapasitas dukung ultimit (q_{ult}) dinyatakan sebagai berikut:

$$q_{ult} = q_b + \frac{U_p h_r \tan \phi_1 + U_p h_r C_1 - W_{pz}}{A_f}$$

Di mana q_b adalah kapasitas dukung tanah di bawah zona penggantian, U_p dan h_r adalah keliling dan tinggi zona tusuk, P_h merupakan gaya dorong tekanan tanah lateral, W_{pz} berat massa tanah pada zona tusuk, serta c_1 dan ϕ_1 adalah kohesi dan sudut geser material *sand cushion*. Gaya dorong lateral (P_h) dihitung dengan asumsi koefisien geser tusuk (K_s) konstan:

$$P_h = K_s (\gamma'_1 D_f h_r + 0,5 \gamma'_1 h_r^2)$$

Nilai K_s diperoleh melalui grafik Meyerhof dan Hanna (1978) berdasarkan rasio kapasitas dukung antara lapisan atas (q_1) dan lapisan bawah (q_2):

$$q_1 = c_1 N_{c1} + 0,5 \gamma'_1 B_f N_{y1}$$

$$q_2 = c_2 N_{c2} + 0,5 \gamma'_2 B_f N_{y2}$$

Di mana γ'_1 dan γ'_2 adalah berat isi efektif material, sedangkan N_c dan N_y merupakan faktor kapasitas dukung untuk masing-masing lapisan. Perhitungan ini menjadi acuan dalam menentukan ketebalan minimum lapisan pengganti guna mencegah kegagalan tusuk.

2.5.3 Keruntuhan Fondasi Terdistribusi (Failure of Distributed Foundation)

Moda ini meninjau penyebaran beban dari fondasi melalui zona penggantian ke lapisan tanah asli di bawahnya. Kapasitas dukung ultimit pada dasar zona penggantian (q_b) dihitung dengan mengasumsikan beban terdistribusi pada area yang lebih luas sebagai fondasi kaku:

$$q_b = N_c c_2 s'_c d'_c + 0,5 \gamma'_2 B'_f N_{y2} s'_y d'_y + \sigma'_{z0} N_{q2} s'_q d'_q$$

Di mana γ'_2 adalah berat isi efektif tanah asli, σ'_{z0} merupakan tegangan overburden efektif pada dasar zona penggantian, serta s' dan d' adalah faktor bentuk dan kedalaman untuk fondasi terdistribusi. Sudut distribusi tegangan (ϕ_0) ditentukan berdasarkan rasio modulus elastisitas antara lapisan pengganti (E_1) dan tanah asli (E_2):

$$\tan \phi_0 = f_{1w} \tan \phi_0 \left[1 + 0,204 \left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right) \right] > \tan \phi_0$$

Kapasitas dukung ultimit pada dasar fondasi asli (q_{ult}) kemudian diperoleh dengan mengonversi nilai q_b menggunakan rasio luas penampang fondasi terdistribusi (A'_f) terhadap luas penampang fondasi asli (A_f):

$$q_{ult} = \frac{A'_f}{A_f} (q_b - \gamma'_1 h_r)$$

Di mana γ'_1 merupakan berat isi efektif material timbunan dan h_r adalah ketebalan zona penggantian. Perhitungan ini memastikan bahwa tegangan yang terdistribusi tidak melampaui kapasitas dukung tanah asli di bawah perkuatan.

2.5.4 Keruntuhan Tusuk Zona Penggantian ke Dalam Tanah Asli (*Punching Failure of Replaced Zone into In Situ Soil*)

Moda keruntuhan ini meninjau kemungkinan seluruh blok zona penggantian menusuk ke dalam lapisan tanah dasar apabila dimensi lateral zona perbaikan terlalu kecil. Berdasarkan Lawton (2001), kapasitas dukung ultimit (q_{ult}) dihitung dengan persamaan:

$$q_{ult} = \frac{A_{rz}}{A_f} q_b + \frac{Q_U + W_{rz}}{A_f}$$

Di mana A_{rz} adalah luas penampang zona penggantian, A_f luas fondasi, q_b kapasitas dukung tanah di bawah zona penggantian (berdasarkan dimensi zona penggantian), dan W_{rz} merupakan berat massa material di dalam zona tersebut. Ketahanan geser di sepanjang keliling zona penggantian (Q_U) ditentukan oleh:

$$Q_U = U_1 P_{h1} \tan \phi_i + U_1 H c_i$$

Parameter U_1 adalah panjang keliling zona penggantian, H adalah tinggi zona, sedangkan c_i dan ϕ_i merupakan nilai kohesi dan sudut geser dalam material (dipilih nilai terkecil antara material timbunan atau tanah asli). Gaya dorong tekanan tanah lateral (P_{h1}) diestimasi sebagai berikut:

$$P_{h1} = K_{s1} (\gamma'_2 D_f h_r + 0,5 \gamma'_2 h_r^2)$$

Di mana K_{s1} adalah koefisien geser tusuk pada permukaan luar zona penggantian dan γ'_2 adalah berat isi efektif tanah asli. Analisis ini memastikan dimensi luas zona penggantian cukup stabil untuk menyalurkan beban tanpa mengalami kegagalan blok.

2.5.5 Kapasitas Dukung Minimum dan Faktor Keamanan (*Minimum Bearing Capacity and Factor of Safety*)

Penentuan kapasitas dukung desain dilakukan dengan memilih nilai terkecil dari hasil analisis seluruh moda keruntuhan yang telah ditinjau, baik pada kondisi tak terdrainase (undrained) maupun terdrainase (drained). Nilai kapasitas dukung ultimit minimum ($q_{ult(min)}$) tersebut digunakan untuk menghitung Faktor Keamanan (*Factor of Safety* - FS) dengan persamaan:

$$FS = \frac{q_{ult(min)}}{\rho}$$

Di mana ρ adalah tekanan total yang bekerja pada dasar fondasi. Desain perbaikan tanah dianggap memenuhi kriteria keamanan apabila nilai FS yang dihasilkan lebih besar atau sama dengan faktor keamanan yang disyaratkan dalam standar teknis. Jika nilai FS tidak mencukupi, maka diperlukan penyesuaian pada dimensi fondasi, ketebalan *sand cushion*, atau peningkatan kualitas material timbunan hingga kriteria stabilitas terpenuhi.

2.5.6 Penurunan Fondasi pada Tanah Berlapis dengan Lebar Tak Terhingga (*Settlement of a Footing on Layered Soils of Infinite Width*)

Estimasi penurunan fondasi pada sistem tanah dua lapis dengan asumsi lebar lapisan tak

terhingga dihitung menggunakan teori lapisan elastis. Penurunan (s) untuk fondasi ditentukan dengan persamaan:

$$S = \rho_r \frac{\rho_n d_f}{E_2} I_s$$

Di mana ρ_r adalah faktor kekakuan fondasi (1,0 untuk fondasi fleksibel atau 0,79 untuk fondasi kaku), ρ_n merupakan tekanan neto yang bekerja, d_f adalah diameter fondasi, dan E_2 merupakan modulus elastisitas lapisan tanah bawah. Parameter I_s adalah faktor pengaruh penurunan untuk tekanan seragam pada medium elastis dua lapis, yang nilainya dipengaruhi oleh rasio Poisson (ν) serta rasio ketebalan dan modulus antar lapisan. Analisis ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan dan modulus lapisan atas secara signifikan dapat mereduksi faktor pengaruh penurunan total.

2.5.7 Penurunan Fondasi pada Zona Penggantian dengan Luas Terbatas (*Settlement of a Footing on a Replaced Zone with Limited Area*)

Kondisi luas zona penggantian yang terbatas memerlukan penyesuaian terhadap perhitungan penurunan guna mencapai reduksi maksimal. Berdasarkan Lawton (2001), dimensi zona penggantian harus mencakup 95% distribusi beban pada dasar zona tersebut. Untuk fondasi persegi panjang, kriteria dimensi minimum ditentukan sebagai berikut:

$$L_{rz} \geq L_f + 2h_r \tan \varphi_s$$

$$B_{rz} \geq B_f + 2h_r \tan \varphi_s$$

Di mana φ_s adalah sudut distribusi beban yang berkorelasi dengan rasio modulus elastisitas lapisan atas (E_1) dan bawah (E_2):

$$\tan \varphi_s = 0,67 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)$$

Dalam kondisi luas terbatas, faktor pengaruh penurunan (I_s) dimodifikasi menggunakan beberapa faktor koreksi untuk menyesuaikan parameter desain, yaitu:

$$I'_s = I_s I_D I_h I_{drz} I_v$$

Di mana I_D adalah faktor modifikasi kedalaman tanah (embedment), I_h adalah faktor modifikasi ketebalan zona penggantian, dan I_{drz} adalah faktor modifikasi lebar atau luas zona penggantian. Faktor-faktor ini berfungsi untuk mengoreksi nilai penurunan agar tetap akurat meskipun luas zona perbaikan bersifat terbatas di lapangan

2.6 Teori Kapasitas Dukung Terzaghi: Pembebanan Vertikal Sentris (*Terzaghi's Bearing Capacity Theory: Centric Vertical Loading*)

Dalam perhitungan analitis, kapasitas dukung ultimit (q_{ult}) diestimasi menggunakan persamaan dasar Terzaghi untuk kondisi pembebanan vertikal sentris. Persamaan ini mempertimbangkan konstanta parameter p_{pq} , p_{pc} , dan p_{py} untuk mendapatkan faktor kapasitas dukung yang merepresentasikan interaksi antara kohesi tanah, kedalaman fondasi, dan berat isi tanah.

$$q_u = cN_c + qN_q + 0,5\gamma BN_\gamma$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Gambaran Umum

Penelitian ini memfokuskan analisis pada model fondasi dangkal dengan dimensi lebar (B) 1,0 meter yang diletakkan pada kedalaman (D_f) 1,0 meter. Lokasi studi kasus menunjukkan dominasi karakteristik tanah lempung yang memiliki keterbatasan dalam mendukung beban struktural. Evaluasi dilakukan secara komprehensif untuk mengkaji pengaruh perkuatan lapisan

pasir (*sand cushion*) terhadap peningkatan daya dukung ultimit serta perubahan perilaku penurunan (*settlement*). Parameter uji yang digunakan melibatkan variasi ketebalan lapisan pasir (*h*) sebesar 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m, dan 1,00 m guna melihat korelasi antara rasio *h/B* dengan efektivitas perbaikan tanah.

3.2 Kapasitas Dukung Fondasi Tanpa Perbaikan

Langkah awal analisis dimulai dengan mengevaluasi kapasitas dukung fondasi pada kondisi tanah asli (tanpa perbaikan). Berdasarkan hasil perhitungan analitis, diperoleh nilai kapasitas dukung ultimit (q_{ult}) sebesar 131 kPa. Dengan mempertimbangkan beban rencana yang bekerja, analisis stabilitas menunjukkan nilai Faktor Keamanan (Factor of Safety - FS) sebesar 2,87. Dalam standar rekayasa geoteknik, nilai FS yang disyaratkan untuk fondasi dangkal umumnya minimal adalah 3,0. Dengan demikian, nilai 2,87 mengindikasikan bahwa kondisi tanah dasar asli belum memenuhi kriteria keamanan yang memadai, sehingga diperlukan tindakan rekayasa berupa perbaikan tanah untuk mencegah risiko kegagalan geser.

3.3 Kapasitas Dukung dengan Sand Cushion

Implementasi lapisan pasir bantalan (*sand cushion*) terbukti memberikan peningkatan kapasitas dukung yang signifikan. Material pasir yang memiliki sudut geser dalam lebih tinggi dibandingkan tanah lempung berfungsi menciptakan zona distribusi beban yang lebih kaku. Hasil perhitungan analitis menunjukkan tren peningkatan yang linier seiring dengan bertambahnya rasio ketebalan *h/B*.

Tabel 1. Hasil Analisis Faktor Keamanan

Rasio ketebalan (<i>h/B</i>) m	q_{ult} kN/m^2	Faktor keamanan FS
Tanpa <i>sand cushion</i>	131	2,87
0,25	135	2,97
0,5	153	3,37
0,75	172	3,79
1	193	4,25

Data tersebut menunjukkan bahwa pada rasio *h/B* = 0,5, nilai FS telah meningkat menjadi 3,37, yang berarti sudah melampaui ambang batas keamanan standar ($FS > 3,0$). Peningkatan maksimum terjadi pada ketebalan 1,0 meter dengan nilai q_{ult} mencapai 193 kPa, yang memberikan margin keamanan sangat tinggi (FS 4,25). Hal ini menegaskan bahwa penggunaan pasir bantalan mampu meredistribusi tegangan secara vertikal maupun horizontal, sehingga tekanan yang diterima lapisan lempung di bawahnya berkurang secara signifikan.

3.4 Analisis Penurunan (*Settlement*)

Selain daya dukung, aspek penurunan merupakan parameter krusial dalam desain fondasi. Analisis penurunan dilakukan menggunakan pemodelan elemen hingga pada berbagai tingkat pembebanan (10 kN hingga 130 kN).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan *sand cushion* mampu mereduksi besaran penurunan secara efektif. Fenomena ini disebabkan oleh perbedaan modulus elastisitas yang kontras antara kedua material; pasir memiliki modulus yang jauh lebih tinggi (lebih kaku) dibandingkan tanah lempung asli. Lapisan pasir bertindak sebagai struktur penyerap tegangan (*stress-absorbing layer*), di mana energi pembebanan dikonsumsi untuk memampatkan lapisan pasir yang kaku sebelum akhirnya beban sisa diteruskan ke lapisan lempung yang bersifat lebih kompresibel. Sebagai contoh, pada beban 60 kN, penurunan pada rasio *h/B* = 0,25 mencapai -0,1122 m, sedangkan pada rasio *h/B* = 1,00, penurunan dapat ditekan hingga -0,04384 m.

Tabel 2. Rasio h/B terhadap Beban

Beban (kN)	Rasio h/B			
	0,25	0,5	0,75	1
10	-0,01113	-0,01037	-0,00994	-0,00946
20	-0,01504	-0,01376	-0,01306	-0,01261
30	-0,02535	-0,02081	-0,0192	-0,01666
40	-0,0417	-0,03058	-0,02709	-0,02373
50	-0,06775	-0,04571	-0,03799	-0,03203
60	-0,1122	-0,06733	-0,05334	-0,04384
70	-	-0,09919	-0,07421	-0,05959
80	-	-0,1551	-0,1018	-0,0806
90	-	-	-0,1408	-0,107
100	-	-	-0,2171	-0,1403
110	-	-	-	-0,1855
120	-	-	-	-0,2765
130	-	-	-	-

3.5 Pemodelan dengan PLAXIS 2D

Pemodelan numerik dengan PLAXIS 2D memberikan visualisasi distribusi deformasi dan tegangan yang terjadi pada setiap variasi ketebalan.

- Pada *sand cushion* 0,25
Pada ketebalan yang relatif tipis ini, distribusi tegangan masih terkonsentrasi di area yang sempit di bawah fondasi. Hasil pemodelan menunjukkan total penurunan sebesar -0,06146 m.
- Pada *sand cushion* 0,5
Peningkatan ketebalan pasir mulai memperlebar sudut penyebaran beban. Hal ini berdampak pada reduksi penurunan yang cukup signifikan menjadi -0,04218 m.
- Pada *sand cushion* 0,75
Pola deformasi menunjukkan bahwa tegangan sudah tersebar lebih merata sebelum mencapai lapisan tanah lunak, menghasilkan nilai penurunan sebesar -0,03538 m.
- Pada *sand cushion* 1,0
Sebagai ketebalan maksimal dalam pengujian ini, lapisan pasir memberikan kekakuan struktur yang paling optimal. Deformasi total pada model ini merupakan yang terkecil, yaitu sebesar -0,03022 m.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan mengenai pengaruh penggunaan *sand cushion* terhadap daya dukung fondasi dangkal di atas tanah lempung, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis kapasitas dukung fondasi pada lapisan tanah lempung, parameter kondisi jangka pendek (undrained) ditetapkan sebagai kondisi kritis dengan nilai faktor keamanan (FS) sebesar 2,87. Mengingat nilai tersebut belum memenuhi kriteria stabilitas minimum sebesar 3,0 sesuai standar teknis geoteknik, maka diperlukan perbaikan tanah melalui metode penggalian dan pergantian material guna menjamin keamanan struktur.
2. Pengaruh Variasi Ketebalan *Sand Cushion* terhadap Daya Dukung Fondasi Dangkal di atas Tanah Lempung:
 - *Sand cushion* 0,25
Daya dukung ultimit minimum dari fondasi pada zona yang diganti adalah $q_{ult}=135$ kPa yang disebabkan oleh kemungkinan kegagalan geser fondasi (punching failure) melalui zona penggantian. Faktor keamanan yang dihasilkan adalah $FS = 2,97$ di mana nilai ini lebih rendah dari faktor keamanan yang disyaratkan yaitu 3,0. tidak memenuhi maka kita akan menambahkan ketebalan (h) dari *sand cushion*.
 - *Sand cushion* 0,5
Daya dukung ultimit minimum dari fondasi pada zona yang diganti adalah $q_{ult}=153$ kPa yang disebabkan oleh kemungkinan kegagalan geser fondasi (punching failure) melalui zona penggantian. Faktor keamanan yang dihasilkan adalah $FS = 3,37$ di mana nilai ini lebih tinggi dari faktor keamanan yang disyaratkan yaitu 3,0. Oleh karena itu, desain ini

dinyatakan dapat diterima berdasarkan persyaratan daya dukung.

- *Sand cushion* 0,75

Daya dukung ultimit minimum dari fondasi pada zona yang diganti adalah $q_{ult} = 172$ kPa yang disebabkan oleh kemungkinan kegagalan geser fondasi (punching failure) melalui zona penggantian. Faktor keamanan yang dihasilkan adalah $FS = 3,79$ di mana nilai ini lebih tinggi dari faktor keamanan yang disyaratkan yaitu 3,0. Oleh karena itu, desain ini dinyatakan dapat diterima berdasarkan persyaratan daya dukung.

- *Sand cushion* 1,0

Daya dukung ultimit minimum dari fondasi pada zona yang diganti adalah $q_{ult} = 193$ kPa yang disebabkan oleh kemungkinan kegagalan geser fondasi (punching failure) melalui zona penggantian. Faktor keamanan yang dihasilkan adalah $FS = 4,25$ di mana nilai ini lebih tinggi dari faktor keamanan yang disyaratkan yaitu 3,0. Oleh karena itu, desain ini dinyatakan dapat diterima berdasarkan persyaratan daya dukung.

3. Ketebalan optimal : Secara teknis, penggunaan *sand cushion* dengan ketebalan minimal 0,5 m ($h/B = 0,5$) sudah cukup untuk mencapai standar keamanan yang disyaratkan ($FS > 3$), namun ketebalan yang lebih besar memberikan margin keamanan dan stabilitas yang lebih baik terhadap penurunan.
4. Pemberian lapisan *sand cushion* memberikan pengaruh positif dalam mereduksi penurunan (settlement) pada fondasi. Semakin tebal lapisan *sand cushion*, semakin kecil penurunan total yang terjadi karena kekakuan material *sand cushion* yang lebih tinggi mampu mendistribusikan beban lebih merata sebelum mencapai lapisan lempung yang kompresibel.

Referensi

- Abbas, J, Basim. (2016). The Settlement Evaluation of Improved Soft Clay Using Sand Columns and Partial Replacement Technique. IJERT. Vol 5. 349.
- Basha, A., Azzam, W., & Elsiragy, M. (2024). Utilization Of Sand Cushion For Stabilization Of Peat Layer Considering Dynamic Response Of Compaction. Civile.Journal. Vol.10. No.4. 1182-1192.
- Bhardwaj, A., & Sharma R. (2022). Bearing Capacity Evaluation Of Shallow Foundations On Stabilized Layered Soil Using ABAQUS. Studia Geotechnica et Mechanica. 55-71.
- Das, Braja M. (2009). Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement. Broken Sound Parkway NW. 11-23.
- Han, Jie. (2015). Principles and Practices of Ground Improvement. Canada. 117-132.
- Mangare, Y. J., Legrans, R. I., Manaroinsong, K. D. L., (2025). Performa Dinding Penahan Tanah Tipe GRS Akibat Konstruksi Fondasi Dangkal Pada Pembebanan Statis. TEKNO, Vol.23, No. 94, 2308-2309.
- PLAXIS 2D User Manual. (2024). PLAXIS Geotechnical Finite Element Software. Bentley Systems.
- Sihombing, S., Darmiyanti, L., & Prima, Y. (2023). Pengaruh Electroosmosis Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung. 1-8.
- Soehardi, F., Hakam, A., Thamrin, R., & Mera, M. (2025). Kajian Eksperimental Daya Dukung Tanah Pasir Berdasarkan Variasi Ukuran Butiran Partikel Terhadap Penurunan. Siklus Jurnal Teknik Sipil. Vol.11. No.1. 36-47.
- Sollar, Johannes P.P., Balamba, Sjachrul., Sarajar, Alva N., & Mandagi, Agnes T. (2019). Pengaruh Tebal Plat Pada Daya Dukung Fondasi Rakit Di Tanah Pasir Dan Tanah Lempung Akibat Beban Aksial Statis. Jurnal Tekno. Vol.17. 72.
- Wagh, D., Jaydeep & Bambole, N., Abhay. (2024). Improved Correlation of Soil Modulus with SPT N Values. Vol.14
- Wibowo, D., Rahmadianto, H., & Endaryanta. (2021). Usaha Peningkatan Daya Dukung Tanah Lempung Menggunakan Layer Krikil, Anyaman Bambu Dan Kombinasi Kolom-Layer Pasir. INERSIA. Vol.17. No.1