



Pengaruh Perbandingan Nilai Termal Terhadap Deformasi Fondasi Tiang Energi Menggunakan Metode Numerik

*Desti Santi Pratiwi, Gary Muhammad Naufal Shidqi

Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung

*destisantipratiwi@itenas.ac.id

Received: 29 September 2023 Revised: 7 Juli 2024 Accepted: 19 Juli 2024

Abstract

A thermal energy foundation is an innovative combination of a foundation structure with thermal pipes that can absorb geothermal heat. This allows it to serve as an alternative source of electricity for the building above it. The goal of this technology is to help achieve sustainable infrastructure targets by minimizing the use of fossil fuels from a geotechnical perspective. This study aims to analyze the thermal effect on foundation deformation using the Finite Element Method approach. The modelling is done using PLAXIS software with element meshes to provide comprehensive deformation results. Additionally, the model is used to vary the thermal parameters of the soil and the quality of the foundation concrete. The analysis results indicate that variations in thermal conductivity values lead to a 34.112% decrease in deformation due to reduced thermal conductivity, while variations in the quality of concrete used in the foundation show a relatively small or insignificant effect on the deformation.

Keywords: *Deformation, geothermal energy, foundation, sustainable, thermal*

Abstrak

Fondasi energi termal merupakan suatu inovasi hibrid penggabungan struktur fondasi dengan pipa-pipa termal yang dapat menyerap panas bumi sehingga berfungsi sebagai alternatif sumber listrik bangunan di atasnya. Munculnya teknologi ini bertujuan untuk mendukung tercapainya sasaran infrastruktur berkelanjutan dari aspek geoteknik sehingga pemakaian bahan bakar fosil dapat diminimalisir. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh termal terhadap deformasi fondasi dengan pendekatan Metode Elemen Hingga. Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak PLAXIS yang berbasis jaring elemen, sehingga dapat menunjukkan hasil deformasi yang komprehensif. Selain itu, model dibuat bervariasi terhadap parameter termal tanah dan mutu beton fondasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa akibat variasi nilai konduktivitas termal menunjukkan penurunan nilai deformasi sebesar 34,112% akibat konduktivitas termal yang diturunkan sebesar dengan kapasitas termal yang tetap, sedangkan pengaruh akibat variasi terhadap besarnya mutu beton yang digunakan pada fondasi menunjukkan persentase perbedaan yang tidak terlalu besar atau dapat dikatakan tidak berpengaruh signifikan.

Kata kunci: *Deformasi, energi panas bumi, fondasi, sustainable, termal*

Pendahuluan

Penggunaan energi fosil yang tidak bijak mengakibatkan dampak buruk bagi lingkungan dan generasi mendatang. Oleh karena itu, perlu upaya memanfaatkan energi terbarukan, salah satunya energi panas bumi. Pada bidang infrastruktur, energi terbarukan sudah mulai dimanfaatkan untuk mewujudkan konsep berkelanjutan. Akhir-akhir ini terdapat berbagai macam penelitian yang mengkaji terkait pemanfaatan energi panas bumi yang

diterapkan pada fondasi baik melalui pemodelan numerik maupun uji eksperimental (Nguyen *et al.*, 2020; Fang *et al.*, 2020; Kong *et al.*, 2024; Farivar *et al.*, 2023; Lualoi *et al.*, 2006).

Pemanfaatan energi pada fondasi umum digunakan pada tiang *raft* atau fondasi *slab* (Fang *et al.*, 2020; Kong *et al.*, 2024; Kong *et al.*, 2019). Menurut Hamdhan & Clarke (2010), penggunaan energi terbarukan pada fondasi tiang merupakan suatu gabungan yang dapat berguna dalam menjaga

kestabilan suhu pada suatu bangunan. Umumnya sistem fondasi seperti ini diterapkan pada daerah dengan empat musim.

Dalam penerapannya, fondasi tiang tersebut dipasangkan dengan rangkaian pipa-pipa termal untuk dapat melakukan transfer energi panas dari dalam tanah. Pipa-pipa tersebut berisikan cairan seperti campuran air atau glikol. Pada saat musim dingin cairan tersebut akan hangat untuk kemudian disalurkan ke evaporator pompa panas. Selanjutnya, cairan panas tersebut akan diekstrak untuk dapat menghangatkan bangunan melalui sistem pemanas sentral. Sedangkan pada saat musim panas, cairan tersebut akan menyerap energi panas pada bangunan tersebut melalui sistem pemanas yang disalurkan ke dalam pipa pada fondasi untuk pertukaran panas dengan tanah, sehingga bangunan menjadi lebih dingin.

Perancangan fondasi tiang dengan teknologi termal diperlukan pemodelan khusus untuk menentukan dimensi dan desain yang sesuai dengan beban konstruksi yang ada, sehingga konstruksi bangunan tersebut dapat berdiri dengan kokoh. Metode Elemen Hingga banyak digunakan dalam menganalisis pengaruh termal pada fondasi (Laloui *et al.*, 2006; López-Acosta *et al.*, 2019; (Jensen-Page *et al.*, 2019; Ravera *et al.*, 2020). Selain itu, fondasi termal dapat digunakan dalam perkuatan timbunan di atas tanah lempung lunak (Zhou *et al.*, 2024).

Laloui *et al.* (2006) menyelidiki perilaku tiang termal yang mengalami beban mekanis dan termal (termo-mekanis) melalui metode eksperimental dan numerik. Beban mekanis terutama disebabkan oleh berat bangunan yang sedang dibangun, sedangkan beban termal diinduksi oleh memanaskan air dalam pipa yang tertanam di dalam tiang. Model ini menggabungkan prinsip-prinsip tegangan efektif dan konservasi energi untuk memperoleh sistem persamaan termo-hidro-mekanis (THM) yang digabungkan yang secara efektif dapat menangkap perilaku kompleks tiang penukar panas. Model mereproduksi hasil eksperimen dengan tingkat akurasi yang tinggi, menunjukkan keandalannya untuk memprediksi perilaku tiang di bawah beban termal dan mekanis

Selain itu, Bui *et al.* (2019) melakukan perbandingan beberapa metode dan teknik canggih yang digunakan di bidang analisis *Thermo-Hydro-Mechanical* (THM), khususnya dalam geoteknik energi. Selain itu, penelitian ini dilakukan dengan mengembangkan penelitian Laloui *et al.* (2006). Perangkat lunak Elemen Hingga berupa PLAXIS digunakan untuk melakukan analisis THM yang akurat yang memungkinkan penerapan formulasi

implisit yang digabungkan sepenuhnya, terutama interaksi antara proses termal, hidrolik, dan mekanis dalam aplikasi geoteknik. Selain itu, penelitian tersebut memperkenalkan Model Aliran yang Ditentukan Pengguna (UDFM) di samping Model Tanah yang Ditentukan Pengguna (UDSM), memungkinkan pengguna untuk menentukan model fluida dan perpindahan panas khusus untuk analisis yang lebih akurat.

Model Elemen Hingga 3D dikembangkan oleh Farivar *et al.* (2023) menggunakan Plaxis 3D untuk mensimulasikan perilaku kelompok tiang energi di bawah beban termal siklik, dengan fokus pada analisis tegangan dan konsolidasi yang efektif. Model Hardening Soil Small Strain (HSS) digunakan untuk menangkap perilaku mekanis tanah lempung lunak, dengan fokus pada kekakuan dan degradasi kekuatan di bawah pemuatan siklik. Parameter tanah utama dikalibrasi terhadap data eksperimental, memastikan prediksi model selaras dengan perilaku yang diamati dalam uji sentrifugal.

Selain itu, Zhou *et al.* (2024) mengembangkan model timbunan dengan perkuatan tiang energi. Model ini dirancang untuk menyelidiki bagaimana efek termal mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem, yang sangat penting untuk aplikasi seperti sistem penghilang es dan pendingin jalan. Penelitian ini melibatkan analisis yang disederhanakan dan selanjutnya divalidasi dengan model Numerik 2D menggunakan bantuan Program PLAXIS 2D. Selain itu, terdapat beberapa asumsi yang digunakan dalam analisis tiang energi ini (Che *et al.*, 2008; Zhou *et al.* (2021). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan mobilisasi gesekan yang lebih besar di sisi atas dan bawah tiang pancang, menghasilkan pengurangan penyelesaian pondasi dan peningkatan rasio pembagian beban di antara tiang pancang. Selain itu, tanah sekitarnya yang lebih kaku meningkatkan kendala deformasi tiang pancang, yang menyebabkan tegangan yang diinduksi termal yang lebih tinggi

Russo *et al.* (2021) mengkaji terkait Penurunan akibat kombinasi pembebanan dan perbandingan kinerja termal pada beberapa pile, menggunakan program PLAXIS 2D. Hasil menunjukkan diantara tiga tiang yang diuji, hanya satu yang dipilih dengan penurunan yang sangat memuaskan, tumpukan energi yang lebih baik sebagai sistem fondasi terdapat pada kasus A yang dapat mereduksi jumlah gerakan termal sehingga ditransmisikan ke bangunan di atasnya.

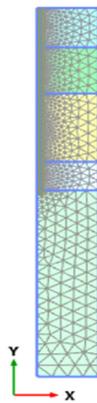
López-Acosta *et al.* (2019) melakukan penelitian dengan mengkombinasikan termal dan beban mekanikal yang digunakan pada pemodelan dengan

menggunakan PLAXIS 2D. Besarnya tegangan akibat panas adalah signifikan, akan tetapi pengaruhnya terhadap perilaku fondasi tergantung pada besarnya beban mekanikal. Khandouzi *et al.*, (2021) memvariasikan geometri pipa pada fondasi termal, dan menunjukkan bahwa penukar kalor U6 pada kedalaman 25 m memiliki efisiensi dan kapasitas kinerja termal maksimum, yang menggambarkan laju perpindahan panas paling tinggi dibandingkan geometri lainnya.

Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui besarnya nilai deformasi akibat adanya variasi terhadap nilai konduktivitas termal dan kapasitas termal khusus. Selain itu juga untuk mengetahui mutu beton yang digunakan pada fondasi tiang sehingga dapat memberikan kontribusi yang baik dalam pengembangan teknologi energi terbarukan yang berkelanjutan (*sustainable*).

Metode

Metode numerik berbasis Elemen Hingga telah banyak digunakan untuk memodelkan fondasi dengan pengaruh beban termal. Pada penelitian ini, pemodelan dilakukan dengan menggunakan Program PLAXIS. Bui *et al.* (2019) menyatakan bahwa Program PLAXIS secara umum mempertimbangkan sebuah geomaterial dengan tiga fase dalam memodelkan kasus-kasus geoteknik. Dengan menggunakan PLAXIS 2D maka kumpulan tanah akan terbagi menjadi elemen-elemen yang terpisah yang bersatu mempengaruhi satu sama lainnya. Pemodelan tiang energi pada penelitian ini menggunakan model *axy-symmetric* yang biasanya digunakan untuk memodelkan struktur yang melingkar dengan potongan melintang secara radial. Distribusi jaringan elemen menggunakan jenis *very fine* (Gambar 1).

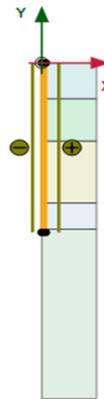


Gambar 1. Distribusi jaringan elemen

Jumlah elemen sebanyak 1816 elemen dan dan node 16074 node, titik tinjauan analisis terhadap

besarnya nilai deformasi arah vertikal pada fondasi terletak diatas puncak permukaan fondasi. Apabila perilaku suatu tanah atau struktur dipengaruhi oleh adanya suhu, maka dalam memodelkannya dapat mempertimbangkan efek termal. Perhitungan termal pada umumnya digabungkan dengan perhitungan aliran air tanah (*thermo-hydraulic* (TH) *coupling*). Pada PLAXIS 2D memungkinkan perhitungan *thermo-hydro-mechanical* (THM) dapat digunakan untuk permasalahan pengaruh waktu yang tergantung dari perubahan suhu pada tekanan, deformasi dan aliran air tanah yang diperhitungkan secara bersamaan.

Untuk dapat melakukan perhitungan termal, diperlukan batas-batas termal yang digunakan pada pemodelan untuk menentukan distribusi temperatur dalam geometri yang dibuat (Gambar 2). Pemodelan ini terdiri dari tiga fase, yaitu *initial phase* (kondisi awal), *heating* (pemanasan), dan *cooling* (pendinginan). Hasil pemodelan berupa *output* deformasi fondasi beserta distribusi temperatur pengaruh adanya termal pada fondasi terhadap tanah di dalamnya.



Gambar 2. Model dengan interface dan batasan termal

Parameter termal yang digunakan

Perpindahan kalor terjadi dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah dalam suatu bahan. Kemampuannya untuk menghantarkan kalor ditentukan oleh konduktivitas termalnya (κ atau λ), yang dipengaruhi oleh struktur atom zat tersebut. (Gonnet, 2004). Konduktivitas termal (λ s) adalah besaran yang menunjukkan kemampuan panas yang dapat dihantarkan dalam tanah. Sedangkan menurut Mar *et al.* (2007) menyatakan bahwa secara umum, λ adalah hasil kontribusi konduktivitas termal konduktif dari material multifase atau komposit yang terdiri dari fase padat, air atau es, dan gas, dan konduktivitas termal karena perpindahan panas radiasi. Menurut Gonnet (2004) nilai konduktivitas termal dapat ditentukan melalui Persamaan 1.

$$\lambda_s = \rho_s \times C_p \times h \quad (1)$$

ρ_s merupakan kerapatan partikel dengan satuan kg/m³, sedangkan C_p adalah kapasitas termal (J/Kg/K). *Thermal diffusivity* ditunjukkan dengan nilai h dengan satuan m²/s. Sebuah model baru pun telah dilakukan untuk mendapatkan parameter konduktivitas termal (Bi *et al.*, 2018).

Selain itu, parameter termal yang dibutuhkan dalam analisis fondasi termal yaitu kapasitas kalor (C_s). Menurut PLAXIS (2003) mendefinisikan kapasitas kalor jenis bahan padat (C_s), adalah parameter yang menggambarkan jumlah energi (kalor) yang dapat disimpan dalam bahan padat (yaitu partikel tanah) per satuan massa.

Kapasitas kalor jenis dinyatakan dalam satuan energi per satuan massa per satuan suhu. Semakin besar kalor jenis, semakin banyak energi yang dibutuhkan untuk meningkatkan suhu bahan. Total penyimpanan kalor dalam bahan padat adalah hasil kali massa jenis, ρ_s , dan kapasitas kalor jenis (C_s). Jika tanah dianggap sebagai media berpori, penyimpanan kalor tanah terdiri dari penyimpanan kalor dalam partikel tanah dan penyimpanan kalor dalam cairan pori. Persamaan (2) digunakan pada material *non-porous*, dan Persamaan (3) digunakan pada material *dry*.

$$(\rho C)_{soil} = \rho_s \times C_s \quad (2)$$

$$(\rho C)_{soil} = (1 - n) \rho_s \times C_s \quad (3)$$

Koefisien ekspansi termal (α_v) adalah nilai yang menunjukkan besarnya pemuaian yang terjadi akibat adanya suhu yang meningkat. Persamaan 4 untuk menghitung koefisien ekspansi termal menurut Agar *et al.* (1986). Kerapatan partikel tanah (ρ_s) yaitu berat partikel tanah individu per satuan volume. Besarnya nilai kerapatan partikel didapatkan dari nilai berat jenis dengan menggunakan Persamaan 5 (Smith & Smith, 1998).

$$\rho_s = G_s \times \rho_w \quad (5)$$

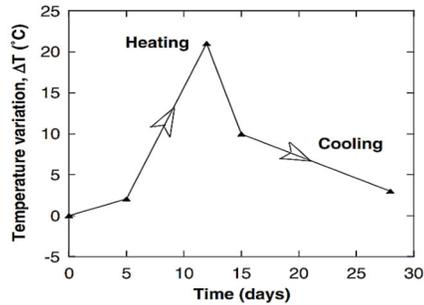
Penelitian ini memodelkan beberapa fondasi tiang energy. Model 1 merupakan pemodelan yang menggunakan data berdasarkan jurnal Bui *et al.* (2019). Hasil kalkulasi terhadap nilai deformasi pada model 1 akan dibandingkan dengan beberapa model lainnya yang telah divariasikan meliputi konduktivitas dan kapasitas termal khusus pada kelima lapis tanah yang terdapat dalam pemodelan dan memodelkan fondasi dengan beberapa mutu beton yang berbeda untuk kemudian divariasikan terhadap besarnya beberapa parameter termal. Data pemodelan berupa data sekunder meliputi data tanah, data termal dan data dimensi fondasi yang didapatkan dari jurnal milik Laloui *et al.* (2006) dan Bui *et al.* (2019). Pemodelan ini terdiri dari beberapa jenis lapisan tanah yang berbeda. Jenis tanah yang dimodelkan terdiri dari 5 lapis, yaitu tanah aluvial (Soil A1), tanah alluvial (Soil A2), pasir moraine berkerikil (Soil B), moraine bawah (Soil C), dan batupasir (Soil D). Parameter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data parameter untuk *concrete* dan *soil*

| Parameter | Concrete | Soil A1 | Soil A2 | Soil B | Soil C | Soil D | Satuan |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Umum | | | | | | | |
| Model* | LE | MC | MC | MC | MC | MC | - |
| Berat isi basah | 25,0 | 26,0 | 25,35 | 21,27 | 22,18 | 25,5 | kN/m ³ |
| Angka pori awal | - | 0,111 | 0,111 | 0,538 | 0,429 | - | - |
| Mekanikal | | | | | | | |
| Kekakuan | 2,92·10 ⁷ | 2,6·10 ⁵ | 2,6·10 ⁵ | 8,4·10 ⁴ | 9,0·10 ⁴ | 2,6·10 ⁶ | kN/m ² |
| Poisson's ratio | 0,1769 | 0,1461 | 0,1461 | 0,4 | 0,4 | 0,1517 | - |
| Kohesi | - | 5 | 3 | 6 | 20 | - | kPa |
| Sudut geser | - | 30 | 27 | 23 | 27 | - | ° |
| Sudut dilatasi | - | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | - | ° |
| Hidrolik | | | | | | | |
| Permeabilitas | 0 | 2,0·10 ⁻⁶ | 7,0·10 ⁻⁷ | 1,0·10 ⁻⁵ | 2,0·10 ⁻¹⁰ | 1,0·10 ⁻⁵ | m/s |
| Termal | | | | | | | |
| Kapasitas kalor (C_s) | 800 | 863 | 863 | 800 | 863 | 863 | J/kg/K |
| Konduktivitas termal (λ_s) | 2,1 | 1,8 | 1,8 | 2,1 | 1,8 | 1,8 | W/m/K |
| Kepadatan solid (ρ_s) | 2500 | 2780 | 2780 | 2500 | 2780 | 2780 | kg/m ³ |
| Ekspansi termal (α_v) | 1,0·10 ⁻⁵ | 1,0·10 ⁻⁵ | 1/K |
| Interfaces | | | | | | | |
| Strength reduction | - | 0,8 | 0,8 | - | 0,8 | 0,8 | - |
| Cross permeability | - | 0 | 0 | - | 0 | 0 | m/s |
| Resisten termal | - | 0 | 0 | - | 0 | 0 | m ² K/W |

Sumber: Bui *et al.*, 2019

Batasan termal tipe temperature dengan suhu awal atau tref sebesar 11 °C (Bui *et al.* 2019). Suhu konstan terdapat pada bagian atas permukaan fondasi bertujuan untuk mensimulasikan suhu atmosfer. Sedangkan pada bagian poros dan sisi fondasi menggunakan *time dependency* terhadap pengaturan *thermal function* yang berisikan data siklus termal, terdiri dari fase pemanasan dan pendinginan bertujuan untuk mensimulasikan pertukaran panas pada tiang.



Gambar 3. Siklus fase pemanasan-pendinginan
 (Laluoi, Nuth, & Vulliet, 2006)

Fase pemanasan berlangsung selama 12 hari kemudian dilanjutkan fase pendinginan selama 16 hari. Siklus termal pada Gambar 3 diterapkan pada pemodelan dengan menggunakan pengaturan *thermal function* pada PLAXIS 2D, fase pemanasan dan fase pendinginan diterapkan secara terpisah pada pengaturan *thermal function* dan *phases explore* pada *staged construction*.

Hasil dan Pembahasan

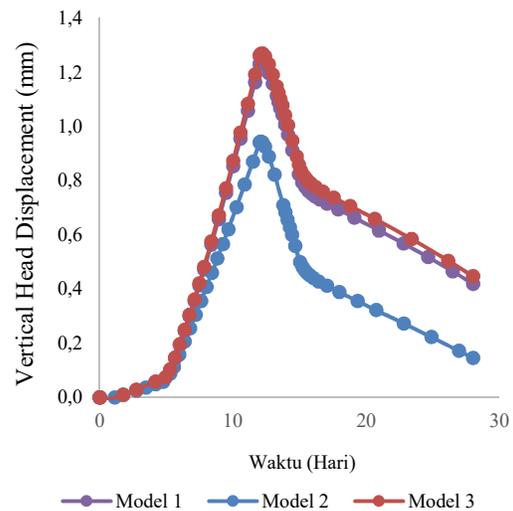
Variasi nilai konduktivitas termal

Data nilai konduktivitas termal pada Model 1 berdasarkan data Bui *et al.* (2019), data Model 2 didapatkan dari penurunan sebesar 92% dari nilai konduktivitas pada Model 1. Pereduksian tersebut dilakukan untuk mengambil batas bawah nilai konduktivitas termal pada rentang setiap jenis lapis tanah yang digunakan. Sedangkan untuk Model 3 merupakan hasil kenaikan sebesar 11% Model 1. Perbandingan nilai konduktivitas termal yang digunakan ketiga model disajikan pada Tabel 2.

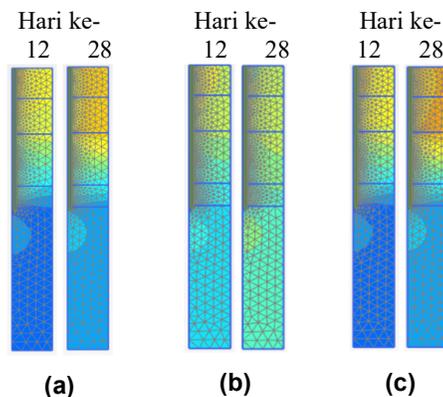
Tabel 2. Variasi model terhadap nilai konduktivitas termal tanah

| Soil | λ_s (W/m/K) | | |
|------|---------------------|---------|---------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 |
| A1 | 1,8 | 0,15 | 1,998 |
| A2 | 1,8 | 0,15 | 1,998 |
| B | 4,45 | 0,4 | 5,03 |
| C | 4,17 | 0,3753 | 4,6287 |
| D | 1,1 | 1 | 2,7 |

Gambar 4 menunjukkan hasil variasi konduktivitas termal tanah berupa grafik hubungan antara waktu dengan deformasi secara vertikal. Sedangkan perbandingan hasil analisis deformasi vertikal akibat nilai konduktivitas termal yang divariasikan ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Model 2 nilai konduktivitas termal akibat pengurangan sebesar 92% menghasilkan nilai deformasi yang lebih rendah dibandingkan dengan Model 1, kemampuan tanah dalam menghantarkan panas dengan konduktivitas yang rendah mengakibatkan penghantaran panas yang terjadi tidak sepanas ketika nilai konduktivitasnya lebih tinggi. Apabila dibandingkan dengan model 3 yang memiliki nilai konduktivitas lebih besar 11% menghasilkan nilai deformasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan Model 1, karena memiliki kemampuan dalam menghantarkan panas lebih baik akibat besarnya nilai konduktivitas.



Gambar 4. Grafik deformasi akibat variasi nilai konduktivitas



Gambar 5. Deformasi vertikal akibat variasi nilai konduktivitas Termal
 a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3

Besarnya deformasi yang dihasilkan pada Model 2 lebih kecil sebesar 34,112% dibandingkan dengan Model 1, sedangkan pada Model 3 menghasilkan nilai deformasi yang lebih besar 3,584% dibandingkan dengan Model 1. Dalam hal ini besar kecilnya nilai konduktivitas berpengaruh terhadap nilai deformasi.

Variasi nilai kapasitas termal khusus

Selain memvariasikan nilai konduktivitas termal, penelitian ini juga memvariasikan nilai kapasitas termal khusus untuk mengetahui manakah parameter termal yang sangat berpengaruh terhadap besarnya nilai deformasi fondasi tiang energi. Nilai kapasitas termal pada Model 2 merupakan hasil penurunan sebesar 7,3% dari nilai kapasitas termal pada Model 1. Pereduksian tersebut dilakukan untuk mengambil batas bawah nilai kapasitas termal pada rentang setiap jenis lapis tanah yang digunakan. Sedangkan untuk Model 3 merupakan hasil kenaikan sebesar 49% dari nilai kapasitas termal pada Model 1.

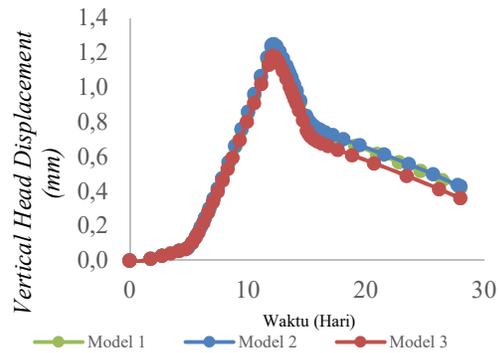
Pada Tabel 3 menunjukkan variasi nilai kapasitas termal yang digunakan pada setiap lapisan tanah. Berdasarkan data di atas, Model 2 menghasilkan nilai deformasi yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan Model 1, hal ini diakibatkan nilai konduktivitas yang tidak berubah namun dengan kapasitas termal yang lebih kecil menyebabkan suhu yang terdistribusi pada tanah lebih maksimal.

Tabel 3. Variasi model terhadap nilai kapasitas termal tanah

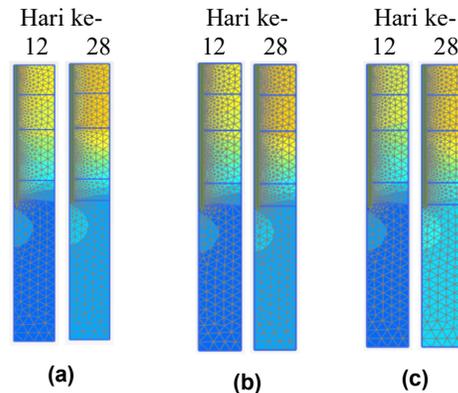
| Soil | Cs (J/kg/K) | | |
|------|-------------|---------|---------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 |
| A1 | 863 | 800 | 1285 |
| A2 | 863 | 800 | 1285 |
| B | 890 | 825 | 1326 |
| C | 890 | 825 | 1326 |
| D | 784 | 726 | 930 |

Apabila dibandingkan dengan Model 3 yang memiliki nilai kapasitas lebih besar menghasilkan nilai deformasi yang lebih rendah dibandingkan

Model 1, akibat nilai konduktivitas termal yang tidak berubah dan relatif kecil namun memiliki kapasitas termal yang besar sehingga panas yang dihantarkan tidak sepanas dibandingkan Model 2. Nilai deformasi yang dihasilkan akibat Model 2 lebih besar 1,293% dibandingkan dengan Model 1, sedangkan Model 3 menghasilkan nilai deformasi yang lebih rendah 6,528% dibandingkan dengan Model 1. Dalam hal ini besar kecilnya nilai kapasitas termal berpengaruh tidak signifikan terhadap deformasi yang terjadi. Dari kedua parameter termal yang telah divariasikan dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Grafik deformasi akibat variasi nilai kapasitas termal khusus



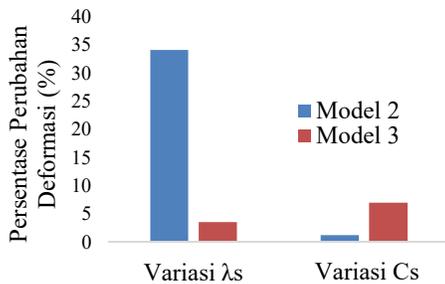
Gambar 7. Deformasi vertikal akibat variasi nilai kapasitas termal khusus
a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3

Tabel 4. Rekapitulasi perbandingan nilai deformasi akibat variasi parameter termal

| | Deformasi arah vertikal (mm) | | | | |
|--------------------|------------------------------|---------|---------------------|---------|------------|
| | Jurnal | | Variasi λ_s | | Variasi Cs |
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 2 | Model 3 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 1,231 | 0,941 | 1,262 | 1,242 | 1,174 |
| 28 | 0,419 | 0,146 | 0,448 | 0,430 | 0,360 |
| Rata-rata | 0,550 | 0,363 | 0,570 | 0,557 | 0,511 |
| % Perbedaan | | -34,112 | 3,584 | 1,293 | -7,054 |
| Keterangan | | Turun | Naik | Naik | Turun |

Besarnya nilai konduktivitas termal berpengaruh cukup signifikan terhadap deformasi fondasi tiang, didapatkan persentase terbesar akibat nilai konduktivitas yaitu sebesar 34,112%. Sedangkan besarnya kapasitas termal tidak berpengaruh secara signifikan yaitu menghasilkan persentase 7,054%. Hasil perbandingan nilai deformasi akibat variasi parameter di atas menunjukkan bahwa semakin besar nilai konduktivitas maka semakin besar pula nilai deformasi, konduktivitas termal yang besar menyebabkan suhu yang terhantarkan dalam fondasi menjadi lebih besar, karena suhu tinggi dapat memperbesar nilai tegangan dan regangan yang terdapat dalam fondasi. Sedangkan besar-kecilnya nilai kapasitas termal khusus tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai deformasi.

Hubungan antara konduktivitas dan kapasitas termal yaitu apabila semakin besar nilai konduktivitas termal diiringi dengan kapasitas yang besar juga, maka panas yang dihasilkan akan lebih tinggi dan deformasi yang terjadi juga semakin besar seiring dengan bertambahnya suhu yang ada di dalam fondasi. Perbandingan hasil analisis kedua parameter ditunjukkan pada Tabel 4. dan Grafik pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik perbandingan persentase perubahan nilai deformasi akibat variasi parameter termal

Variasi mutu beton fondasi

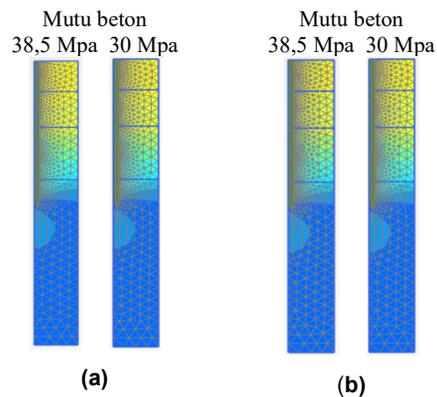
Penelitian ini memvariasikan besarnya mutu beton fondasi yang kaitannya dengan modulus kekakuan beton. Variasi mutu beton tersebut dikombinasikan dengan variasi nilai konduktivitas termal yang terdapat pada Tabel 5, dan kapasitas termal dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya terhadap deformasi yang terjadi pada fondasi tiang. Mutu beton pada jurnal yaitu sebesar 38,5 MPa, mutu beton tersebut divariasikan menjadi sebesar 30 MPa.

Pada Gambar 9. dan Gambar 10. menunjukkan perbandingan distribusi deformasi dan besarnya nilai deformasi kedua mutu beton tersebut. Masing masing terdiri dari dua pemodelan dengan

parameter konduktivitas termal dan kapasitas termal khusus diambil batas atas pada rentang material beton, sedang besarnya kerapatan partikel tanah dan koefisien ekspansif termal yang tetap.

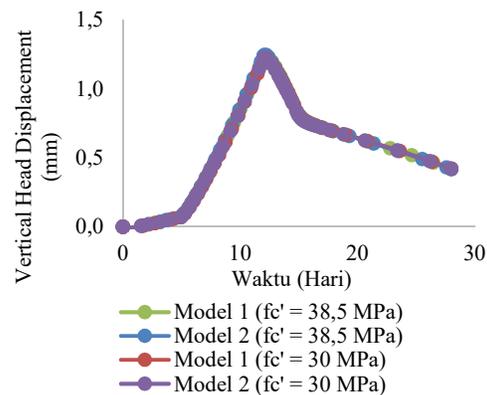
Tabel 5. Data termal yang digunakan dalam variasi mutu beton

| Parameter termal | Model 1 | Model 2 |
|-------------------------------|-----------|-----------|
| λ (W/m/K) | 2,1 | 3,5 |
| C_s (J/kg/K) | 800 | 1000 |
| ρ_s (kg/m ³) | 2500 | 2500 |
| α_v (1/K) | 10^{-5} | 10^{-5} |



Gambar 9. Deformasi vertikal akibat variasi mutu beton dan data termal a) Model 1, b) Model 2

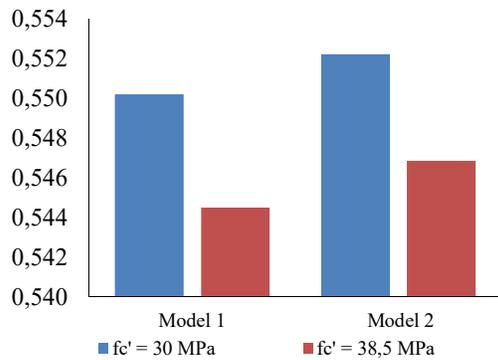
Hasil analisis menunjukkan tidak adanya perubahan yang signifikan. Fondasi dengan $fc' = 38,5$ MPa pada Model 1 menghasilkan nilai deformasi pada hari ke-12 adalah sebesar 1,231 mm. Pada Model 2 menghasilkan nilai deformasi pada hari ke-12 sebesar 1,240 mm. Sedangkan pada Fondasi dengan $fc' = 30$ MPa pada Model 1 menghasilkan nilai deformasi pada hari ke-12 sebesar 1,211 mm, Model 2 menghasilkan nilai deformasi pada hari ke-12 sebesar 1,219 mm, ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 10. Grafik deformasi akibat variasi nilai kapasitas termal khusus

Tabel 6. Perbandingan nilai deformasi akibat variasi nilai mutu beton fondasi

| Waktu (Hari) | Deformasi arah vertikal (mm) | | | |
|--------------------|------------------------------|---------|--------------|---------|
| | fc' = 38,5 MPa | | fc' = 30 MPa | |
| | Model 1 | Model 2 | Model 1 | Model 2 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 1,231 | 1,240 | 1,211 | 1,219 |
| 28 | 0,419 | 0,417 | 0,422 | 0,421 |
| Rata-rata | 0,550 | 0,552 | 0,544 | 0,547 |
| % Perbedaan | | 0,367 | -1,034 | -0,607 |
| Keterangan | | Naik | Turun | Turun |



Gambar 11. Grafik perbandingan rata-rata nilai deformasi akibat variasi mutu beton

Berdasarkan Gambar 11. fondasi dengan mutu beton 38,5 MPa Model 2 memiliki konduktivitas dan kapasitas termal lebih besar daripada Model 1 menghasilkan nilai deformasi lebih besar 0,367%. Sedangkan, pada fondasi dengan mutu beton 30 MPa menghasilkan nilai deformasi yang lebih rendah dibandingkan dengan mutu beton $fc' = 38,5$ MPa, penurunan nilai deformasi tersebut tidak terlalu signifikan. Dalam hal ini, besar kecilnya mutu beton hanya berpengaruh sedikit terhadap nilai deformasi, mutu beton yang rendah memiliki nilai kekakuan yang rendah juga, suhu panas yang terdapat pada struktur fondasi dapat meningkatkan besarnya nilai tegangan dan regangan, semakin rendah nilainya maka semakin rendah juga suhu maksimal yang terdistribusi dalam fondasi.

Kesimpulan

Besarnya nilai deformasi akibat variasi terhadap parameter termal yakni konduktivitas termal dan kapasitas termal hanya berpengaruh kecil. Hasil analisis menunjukkan bahwa besarnya nilai deformasi yang didapat dapat dilihat pada besarnya kombinasi nilai konduktivitas dan kapasitas termal yang digunakan. Nilai konduktivitas termal yang besar pada kapasitas termal yang kecil dapat menghasilkan panas yang lebih tinggi akibat ruang yang kecil sehingga penghantaran panas pun akan lebih sempurna, karena semakin besar kapasitas termal membutuhkan konduktivitas termal yang

besar pula untuk dapat menghantarkan panas secara maksimal. Panas yang tinggi dapat memperbesar nilai deformasi, hal ini dibuktikan pada Model 2 akibat variasi nilai konduktivitas termal menunjukkan penurunan nilai deformasi sebesar 34,112% akibat konduktivitas termal yang diturunkan dengan kapasitas termal yang tetap. Besarnya nilai konduktivitas termal dan kapasitas termal khusus dipengaruhi oleh kerapatan partikel tanah yang merupakan berat partikel tanah individu per satuan volume, besarnya kerapatan partikel tanah dipengaruhi oleh besarnya berat jenis (Gs). Selain itu, nilai porositas (n) yang menunjukkan besarnya persentase total pori yang dapat mempengaruhi besarnya kapasitas termal sesuai dengan ukuran butiran serta berat jenis tanah. Selain itu kerapatan massa tanah juga dapat mempengaruhi berat tanah per satuan volumenya itu sendiri, semakin besar nilainya maka semakin berat tanah tersebut. Dalam hal ini, interaksi antara parameter tanah dan parameter termal saling berhubungan dan dapat berpengaruh satu sama lain terhadap besarnya deformasi yang terjadi. Pengaruh akibat variasi terhadap besarnya mutu beton yang digunakan pada fondasi menunjukkan persentase perbedaan yang tidak terlalu besar atau dapat dikatakan tidak berpengaruh signifikan. Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh, semakin besar mutu beton apabila dikombinasikan dengan konduktivitas termal dan kapasitas termal yang lebih besar akan menghasilkan suhu yang lebih panas sehingga dapat memperbesar deformasi pada fondasi.

Daftar Pustaka

- Agar, J. G., Morgenstern, N. R., & Scott, J. D. (1986). Thermo expansion and pore pressure generation in oil sands. *Can. Geotech. J.*, 23, 327-333.
- Bi, J., Zhang, M., Chen, W., Lu, J., & Lai, Y. (2018). A new model to determine the thermal conductivity of fine-grained soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 407-417.
- Bui, T. A., Casarella, A., Di Donna, A., & Brinkgreve, R. B. (2019). Advanced Thermo-Hydro-Mechanical modelling features for practical applications in energy geotechnics. *Proceedings of the XVII ECSMGE* (pp. 1-8). Geotechnical Engineering Foundation of the future.
- Chen, R. P., Chen, Y. M., Han, J., & Xu, Z. Z. (2008). A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soil. *Can. Geotech. J.*, 45(5), 611-623.
- Fang, J., Kong, G., Meng, Y., Wang, L., & Yang, Q. (2020). Thermomechanical behavior of energy

- piles and interactions within energy pile-raft foundations. *J. Geotech. Geoenviron*, 146(9), 04020079.
- Farivar, A., Jafarzadeh, F., & Leung, A. K. (2023). Influence of pile head restraint on the performance of floating elevated energy pile groups in soft clay. *Computers and Geotechnics*, 154, 105141.
- Gonnet, P. (2004). *Thermal Conductivity and Coefficients of Thermal Expansion of SWNTs/Epoxy Nanocomposites*. Tallahassee: Florida State University Libraries.
- Hamdhan, I. N., & Clarke, B. G. (2010). Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils. *Proceedings World Geothermal Congress*, (pp. 1-7). Bali.
- Jensen-Page, L., Loveridge, F., & Narsilio, G. A. (2019). Thermal Response Testing of Large Diameter Energy Piles. *Energies*, 12(14), 2700.
- Khandouzi, O., Pourfallah, M., Yoosefirad, E., Shaker, B., Gholinia, M., & Mooloodi, S. (2021). Evaluating and optimizing the geometry of thermal foundation pipes for the utilization of the geothermal energy: Numerical simulation. *Journal of Energy Storage*, 37, 102464.
- Kong, G. Q., Chen, Y., Wang, L., Meng, Y., & Yang, Q. (2024). Seasonal performance of energy pile heat pump system and prediction of thermal load. *Appl. Therm. Eng.*, 241, 122359.
- Kong, G. Q., Wu, D., Liu, H., Laloui, L., Cheng, X., & Zhu, X. (2019). Performance of a geothermal energy deicing system for bridge deck using a pile heat exchanger. *Int. J. Energy. Res.*, 43(1), 596-603.
- Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30, 763-781.
- López-Acosta, N. P., Barba-Galdámez, D. F., & Sánchez, M. (2019). Numerical Analysis of the Thermo-Mechanical. In A. Ferrari, & L. Laloui, *Energy Geotechnics. SEG 2018* (pp. 147-154). Switzerland: Springer, Cham.
- Mar, J. D., Litovsky, E., & Kleiman, J. (2007). Modeling and Database Development of Conductive and Apparent Thermal Conductivity of Moist Insulation Materials. *Journal of Building Physics*, 32(1), 9-31.
- Nguyen, V. T., Wu, N., Gan, Y., Pereira, J. M., & Tang, A. M. (2020). Long-term thermo-mechanical behaviour of energy piles in clay. *Environ. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 146(7), 04020047.
- PLAXIS. (2023). *Reference Manual 2D*. Bentley Advancing Infrastructure.
- Ravera, E., Sutman, M., & Laloui, L. (2020). Analysis of the interaction factor method for energy pile groups with slab. *Computers and Geotechnics*, 119, 103294.
- Russo, G., Marone, G., & Di Girolamo, L. (2021). Hybrid Energy Piles as a Smart and Sustainable Foundation. *Journal of Human, Earth, and Future*, 2(3), 306-322.
- Smith, G. N., & Smith, I. N. (1998). *Elements of Soil Mechanics 7th edition*. Bristol: Blackwell Science.
- Zhou, Y., Kong, G., Wen, L., & Yang, Q. (2021). Evaluation of geosynthetic-encased column-supported embankments with emphasis on penetration of column toe. *Comput. Geotech.*, 132, 104039.
- Zhou, Y., Wang, J., Li, C., & Kong, G. (2024). A simplified model for energy pile-supported embankment. *Computers and Geotechnics*, 169, 106184.