

Analisis perilaku *displacement* fondasi blok akibat beban vibrasi pada tanah pasir padat

Faruq Al-Qabil Marada¹, Anisa Nur Amalina^{1,*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

PLAXIS

Machine foundation

Foundation subsidence

Hardening soil

Corresponding Author:

Anisa Nur Amalina

anisa.amalina@uii.ac.id

Abstract

Machine foundations play a crucial role in transmitting static and dynamic loads generated during rotating machinery operation. Uncontrolled dynamic responses of foundations may lead to operational disturbances and degradation of system performance. One of the key geometric parameters influencing this response is the block foundation thickness, which is directly related to the foundation mass and inertia. This study investigates the effect of varying block foundation thickness on the displacement response of machine foundations subjected to harmonic dynamic loads. The analysis was conducted using finite element-based numerical modeling with PLAXIS software. The subgrade was modeled as dense sand using the Hardening Soil Model, while the foundation was represented as an elastic concrete block placed directly on the ground. Harmonic dynamic loads with a frequency of 50 Hz and a phase angle of 0° were applied to simulate generator and turbine vibrations. The results indicate that increasing the foundation block thickness significantly reduces the displacement amplitude, with the response dominated by the vertical displacement component. For generator loading, increasing the block thickness from 0.5 m to 1.5 m reduces the resultant displacement by approximately 46%, while turbine loading results in a reduction of approximately 26% over the same thickness range. The most effective reduction occurs for block thicknesses between 1.0 m and 1.5 m, beyond which additional increases in thickness provide only marginal displacement reduction, indicating a diminishing return effect. Based on these findings, a block foundation thickness of approximately 1.5 m can be indicatively recommended as an optimal thickness to mitigate displacement response due to vibration loads under the analyzed soil and loading conditions..

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia

All rights reserved

Pendahuluan

Fondasi mesin merupakan elemen penting dalam sistem struktur industri karena berfungsi untuk menopang beban statik sekaligus menyalurkan beban dinamik yang dihasilkan selama operasi mesin. Beban dinamik yang berasal dari ketidakseimbangan massa berputar, gaya inersia, serta getaran periodik dapat menimbulkan respon dinamik pada fondasi

dan tanah di sekitarnya. Apabila respon tersebut tidak dikendalikan dengan baik, maka dapat menyebabkan gangguan operasional, penurunan umur layanan peralatan, hingga kerusakan struktural pada sistem fondasi dan bangunan pendukungnya (Richart, Hall, & Woods, 1970).

Dalam perencanaan fondasi mesin, parameter pelayanan seperti perpindahan (*displacement*) dan getaran sering kali

menjadi kriteria utama dibandingkan kapasitas ultimit tanah. Amplitudo getaran fondasi harus berada di bawah batas tertentu agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap mesin maupun lingkungan sekitarnya. Oleh karena itu, evaluasi respon perpindahan fondasi akibat beban dinamik menjadi aspek yang sangat penting dalam desain fondasi mesin (Das, 2011).

Pendekatan analitik klasik untuk analisis getaran fondasi mesin umumnya menggunakan model massa–pegas–peredam dengan asumsi tanah sebagai media elastis homogen (Richart et al., 1970). Selain itu, parameter fondasi seperti massa dan ketebalan *block* sering kali direpresentasikan secara sederhana sehingga pengaruh geometrinya terhadap respon dinamik tidak dapat dievaluasi secara rinci.

Metode elemen hingga (Finite Element Method, FEM) menjadi alternatif yang banyak digunakan untuk menganalisis fondasi mesin. FEM dapat digunakan untuk pemodelan geometri fondasi secara eksplisit serta memodelkan perilaku tanah yang lebih realistis melalui model konstitutif nonlinier. Salah satu perangkat lunak FEM yang banyak digunakan dalam analisis geoteknik adalah PLAXIS, yang mampu memodelkan interaksi tanah–struktur dan respon dinamik secara komprehensif (Brinkgreve, Engin, & Swolfs, 2010).

Secara umum terdapat dua jenis fondasi yang biasa digunakan untuk fondasi mesin, yaitu fondasi blok (*block-type*) dan fondasi dengan pedestal (*elevated pedestal foundation*). Dalam konteks fondasi mesin tipe *block*, ketebalan *block foundation* merupakan parameter penting karena secara langsung memengaruhi massa, inersia, dan kekakuan sistem fondasi. Perubahan ketebalan *block* berpotensi mengubah karakteristik respon dinamik fondasi, khususnya amplitudo perpindahan akibat beban harmonik.

Namun demikian, kajian numerik yang secara khusus membahas pengaruh variasi ketebalan *block foundation* terhadap respon

perpindahan fondasi mesin masih relatif terbatas, terutama dengan fokus pada mekanisme deformasi tanah dan fondasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketebalan *block foundation* terhadap respon perpindahan fondasi mesin akibat beban dinamik harmonik menggunakan pemodelan numerik berbasis PLAXIS.

Tanah dasar dimodelkan sebagai pasir padat menggunakan Hardening Soil Model untuk merepresentasikan perilaku tanah granular yang nonlinier. Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi respon perpindahan vertikal dan horizontal fondasi serta pola deformasi tanah akibat variasi ketebalan *block foundation*.

Teori Fundamental Getaran

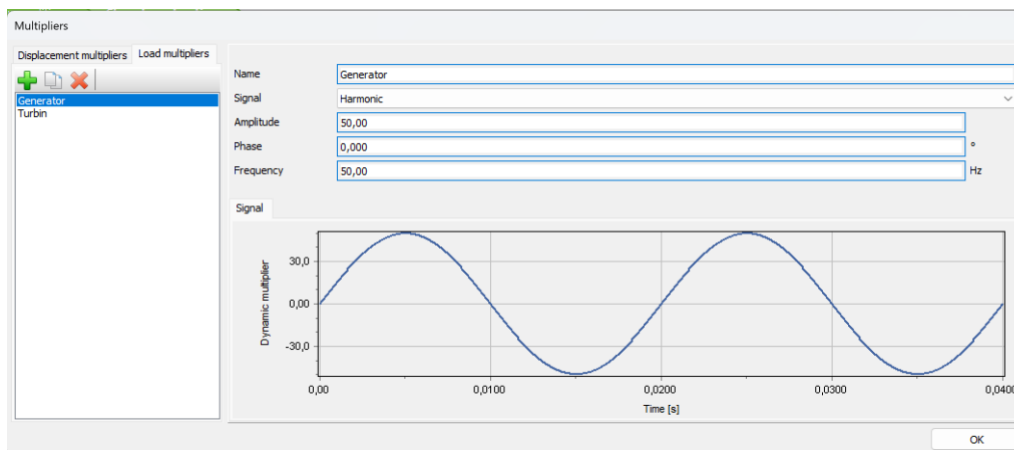
Getaran atau vibrasi merupakan respons osilasi suatu sistem fisik akibat adanya gaya dinamik yang bekerja terhadap sistem tersebut. Setiap sistem fisik yang memiliki massa dan kekakuan elastis mempunyai frekuensi alami yang menjadi karakteristik dinamik sistem. Ketika suatu struktur teknik dikenai gaya berulang atau periodik, respons getaran yang timbul bergantung pada sifat dinamik sistem, termasuk massa, kekakuan, dan redaman. Oleh karena itu, analisis perilaku osilasi struktur menjadi aspek penting dalam perencanaan struktur yang menerima beban dinamik, seperti fondasi mesin (Arya et al., 1979).

Dalam praktik rekayasa, analisis getaran umumnya dilakukan dengan asumsi perilaku linier, di mana hubungan antara gaya eksitasi dan respons struktur dianggap proporsional. Namun, pada kondisi amplitudo getaran yang besar, respons struktur dapat menunjukkan perilaku nonlinier akibat perubahan kekakuan material, kondisi batas, atau interaksi antar elemen sistem. Dalam kondisi tersebut, pendekatan linier menjadi kurang memadai, sehingga analisis nonlinier diperlukan untuk merepresentasikan perilaku struktur secara lebih realistis (Arya et al., 1979).

Karakteristik Beban Dinamik Mesin

Pada fondasi blok mesin, pembebanan yang bekerja tidak bersifat statis, melainkan didominasi oleh beban dinamik akibat operasi mesin berputar. Ketidakseimbangan massa (*unbalance*) pada komponen mesin seperti rotor, turbin, atau generator menghasilkan gaya periodik yang diteruskan ke fondasi dan tanah pendukung dalam bentuk getaran. Oleh karena itu, dalam analisis numerik, beban dinamik tersebut lebih tepat direpresentasikan sebagai pembebanan harmonik dibandingkan sebagai gaya sesaat atau impulsif (Barkan, 1962).

Dalam pemodelan menggunakan PLAXIS, pembebanan dinamik akibat getaran didefinisikan secara sederhana namun representatif melalui tiga parameter utama, yaitu *amplitude*, *phase*, dan *frequency*. Ketiga parameter ini digunakan untuk mendeskripsikan karakteristik dasar dari beban harmonik yang bekerja pada fondasi, tanpa memodelkan detail mekanisme internal mesin. Pendekatan ini umum digunakan pada studi fondasi mesin, khususnya untuk tujuan evaluasi respons tanah–fondasi (Prakash dan Puri, 1988; PLAXIS Reference Manual). Input parameter beban dinamik pada PLAXIS dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Input beban dinamik pada PLAXIS

Dengan menggunakan parameter *amplitude* sebagai representasi besar gaya dinamik, *phase* sebagai kondisi awal pembebanan, dan *frequency* sebagai representasi kecepatan operasi mesin, respons dinamik fondasi dapat dianalisis secara efisien tanpa kehilangan makna fisik utama dari fenomena getaran yang terjadi. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi simpangan, tegangan, dan percepatan pada fondasi serta tanah pendukung secara konsisten dan terkontrol (Das, 2011).

Amplitude

Secara teoritis, gaya dinamik yang dihasilkan oleh *unbalance* mesin dapat dinyatakan sebagai fungsi massa tidak seimbang, eksentrisitas, dan kecepatan sudut

putaran mesin, sehingga gaya tersebut bersifat sinusoidal dan berulang terhadap waktu (Barkan, 1962). Pada fondasi blok mesin, *amplitude* merepresentasikan intensitas pembebanan yang diteruskan dari mesin ke fondasi dan selanjutnya ke tanah pendukung. Pada penelitian ini nilai *amplitude* mengacu pada *worst-case* beban rencana yang diperhitungkan berdasarkan beban mesin.

Phase

Parameter ini menentukan kondisi awal pembebanan pada saat analisis dimulai, serta hubungan waktu antar komponen beban jika lebih dari satu sumber getaran dimodelkan secara simultan. Dalam studi ini, nilai *phase* diambil sebesar nol, yang berarti beban

dinamik diasumsikan mulai bekerja dari kondisi maksimum pada waktu awal analisis.

Frequency

Frequency didefinisikan sebagai jumlah siklus getaran per detik dan dinyatakan dalam satuan Hertz (Hz). Frekuensi pembebanan dinamik secara langsung berkaitan dengan kecepatan putar mesin, yang umumnya dihitung dari nilai putaran mesin per menit (RPM). Pada penelitian ini, frekuensi mesin yang digunakan adalah 3000 RPM dan diubah menjadi satuan Hz dalam input PLAXIS.

Metode Penelitian

Penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan respon dinamik fondasi mesin akibat beban harmonik yang dihasilkan oleh generator dan turbin. Selanjutnya dilakukan pemodelan numerik fondasi mesin tipe *block foundation* menggunakan metode elemen hingga berbasis perangkat lunak PLAXIS 2D.

Tahap berikutnya adalah pendefinisian model tanah dan fondasi. Tanah dasar dimodelkan sebagai pasir padat menggunakan *Hardening Soil Model* untuk menangkap perilaku nonlinier tanah granular, sedangkan fondasi mesin dimodelkan sebagai elemen blok elastik dengan variasi ketebalan tertentu. Beban dinamik mesin diterapkan dalam bentuk beban harmonik dengan frekuensi dan amplitudo yang merepresentasikan kondisi operasi generator dan turbin.

Pemodelan Numerik

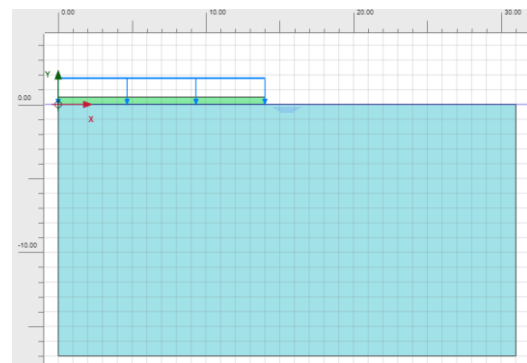
Geometri dan kondisi batas

Penelitian ini menggunakan fondasi tipe blok, di mana berupa fondasi beton masif dengan ketebalan yang dirancang sedemikian rupa sehingga lendutan dan deformasi struktural akibat beban terapan sangat kecil. Fondasi dapat dianggap sebagai benda kaku (*rigid body*). Geometri pemodelan dilakukan dengan membuat model *block foundation* berupa blok beton

dengan parameter model berupa *linear elastic non-porus* pada PLAXIS.

Lebar fondasi disesuaikan dengan kasus kondisi di lapangan, dimana digunakan lebar fondasi 14 m. Pada penelitian ini, ketebalan blok fondasi dibuat bervariasi jadi 0,5 m, 1 m, 1,5 m dan 2 m. Input parameter block foundation antara lain sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{unsat}} &= 24 \text{ kN/m}^3 \\ E &= 30.000.000 \text{ kPa} \\ \nu &= 0,20\end{aligned}$$



Gambar 2. Geometri pada pemodelan

Parameter tanah yang digunakan dalam penelitian ini hanya satu lapis dan dikondisikan berupa tanah padat jenuh (*saturated sand dense*) dengan model tanah berupa *hardening soil*. Model ini digunakan untuk menunjukkan perilaku *nonlinier* tanah pasir padat yang bergantung pada tingkat tegangan atau kedalaman.

Pendekatan ini sejalan dengan teori dinamika fondasi mesin pada tanah granular serta rekomendasi pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga untuk analisis deformasi dan interaksi tanah-struktur (Richart, Hall, & Woods, 1970; Brinkgreve, 2005; Brinkgreve et al., 2010). Input parameter tanah dapat dilihat pada Tabel 1, dimana beberapa parameter merupakan nilai tipikal untuk pasir padat yang mengacu pada Richart et al., (1970), Das (2011) dan Brinkgreve (2005).

Tahapan pembebanan

Pemodelan fase dalam analisis dinamik ini mengikuti prosedur yang direkomendasikan dalam PLAXIS (2025) untuk analisis

fondasi mesin, di mana tahapan konstruksi dan pembebanan dinyatakan secara eksplisit melalui *staged construction*. Setelah fase awal (*initial phase*) yang berfungsi untuk menghasilkan kondisi tegangan awal tanah, analisis difokuskan pada fase-fase ketika mesin beroperasi, yaitu fase generator dan turbin dengan pembebanan dinamik aktif.

Setiap fase merepresentasikan kondisi kerja mesin yang terpisah dengan karakteristik beban harmonik tertentu. Input parameter beban vibrasi pada generator dan turbin dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Parameter input tanah

Parameter	Parameter (PLAXIS)	Nilai	Satuan
Model tanah	—	Hardening Soil	—
Berat isi kering	γ_{unsat}	18	kN/m ³
Berat isi jenuh	γ_{sat}	20	kN/m ³
Modulus secant	$E_{so,ref}$	50.000	kPa
Modulus oedometric	$E_{oed,ref}$	50.000	kPa
Modulus unloading–reloading	$E_{ur,ref}$	150.000	kPa
Rasio Poisson	ν	0,30	—
Sudut geser dalam	ϕ	38	°
Kohesi	c	0	kPa
Sudut dilatasi	ψ	8	°
Exponent kekakuan	m	0,5	—
Tegangan referensi	p_{ref}	100	kPa
Damping material	ζ	3	%
Drainage type	—	Drained	—

Tabel 2. Input parameter beban vibrasi

Part	RPM	Frequency (Hz)	Amplitude (kN)	Phase (deg)
Generator	3000	50	8.5	0
Turbine	3000	50	4.2	0

Output pemodelan

Output atau hasil dari pemodelan ini berupa *displacement* pada arah horizontal (u_x), vertikal (u_y) dan perpindahan total ($|u|$). Nilai u_x merepresentasikan perpindahan tanah atau fondasi sejajar sumbu horizontal akibat pengaruh gaya lateral dari getaran mesin, sedangkan u_y menunjukkan perpindahan pada arah vertikal yang umumnya dipengaruhi oleh komponen gaya dinamik vertikal dan respons elastis tanah. Sementara itu, $|u|$ merupakan resultan perpindahan total yang dihitung sebagai kombinasi vektor dari komponen u_x dan u_y , sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai intensitas respons deformasi yang dialami sistem tanah–fondasi. Dalam konteks evaluasi fondasi blok mesin, u_x dan u_y digunakan untuk mengidentifikasi arah dominan respons getaran, sedangkan $|u|$ digunakan sebagai parameter pembandingan utama untuk menilai

tingkat deformasi total akibat pembebanan dinamik.

Hasil dan Kesimpulan

Hasil

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa respon perpindahan fondasi akibat vibrasi generator secara konsisten lebih besar dibandingkan vibrasi turbin untuk seluruh variasi ketebalan *block foundation*. Perbedaan ini secara langsung berkaitan dengan besarnya amplitudo gaya dinamik yang bekerja, di mana generator memiliki amplitudo beban vibrasi sebesar 8,5 kN, sedangkan turbin hanya sebesar 4,2 kN dengan frekuensi operasi dan fase yang sama, yaitu 50 Hz dan 0°.

Hasil koreksi *input* menunjukkan bahwa respon *displacement* baik pada fondasi generator maupun turbin memperlihatkan tren yang konsisten dan stabil terhadap variasi ketebalan

block foundation. Peningkatan ketebalan block secara umum menurunkan displacement total $|u|$, yang menunjukkan bahwa mekanisme respon dinamik sistem didominasi oleh peningkatan massa dan inersia fondasi. Secara dinamik, sistem fondasi–tanah dapat dimodelkan sebagai sistem massa–pegas–peredam, di mana peningkatan massa fondasi menyebabkan penurunan percepatan dan amplitudo perpindahan akibat gaya harmonik dengan frekuensi tetap (Gazetas, 1983; Karki & Maskey, 2025).

Jika ditinjau berdasarkan komponen *displacement*, respon vertikal (U_y) secara konsisten lebih dominan dibandingkan respon horizontal (U_x) untuk seluruh variasi ketebalan *block*. Dominasi U_y menunjukkan bahwa mekanisme deformasi tanah di bawah fondasi lebih bersifat kompresi vertikal dibandingkan geser lateral. Hal ini berkaitan dengan kondisi fondasi yang relatif lebar dan kaku, sehingga pergerakan *rocking* dan geser lateral dapat teredam dengan efektif oleh kekakuan tanah pasir padat.

Penurunan *displacement* yang signifikan terjadi pada peningkatan ketebalan *block* hingga sekitar 1,0–1,5 m. Pada rentang ini, zona deformasi tanah mengalami perubahan karakter, dari deformasi yang relatif terkonsentrasi di dekat fondasi menjadi distribusi tegangan yang lebih menyebar (Tabel 2 dan Tabel 3). Untuk ketebalan di atas 1,5 m, penurunan *displacement* tambahan menjadi relatif kecil, yang mengindikasikan terjadinya fenomena *diminishing return* dimana setelah ketebalan fondasi mencapai nilai tertentu, penambahan ketebalan selanjutnya hanya menghasilkan penurunan *displacement* yang relatif kecil akibat distribusi tegangan tanah yang telah menyebar secara luas. Hal tersebut juga ditemukan dalam studi numerik fondasi mesin oleh Allawi dan Mohammed (2022).

Perbandingan antara generator dan turbin menunjukkan bahwa fondasi yang menerima beban dengan amplitudo gaya dinamik lebih besar menghasilkan respon *displacement* yang

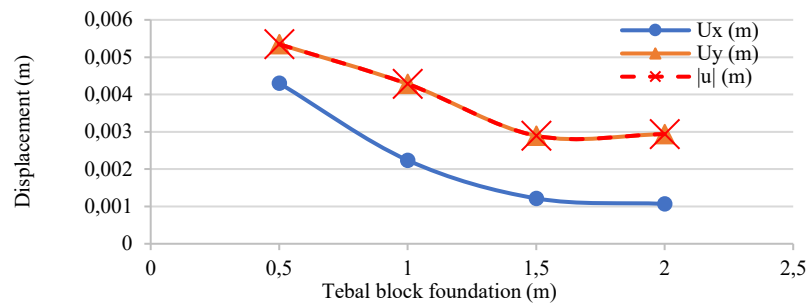
lebih besar, meskipun memiliki frekuensi dan fase yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa pada sistem dinamik linier dengan amplitudo relatif kecil, respon perpindahan berbanding lurus dengan amplitudo gaya eksitasi.

Namun, kesamaan pola respon terhadap variasi ketebalan block menunjukkan bahwa mekanisme dasar respon dinamik dikendalikan oleh karakteristik sistem fondasi–tanah, bukan oleh sumber getaran semata. Temuan ini konsisten dengan hasil analisis numerik menggunakan PLAXIS yang menunjukkan bahwa perubahan massa fondasi memiliki pengaruh lebih dominan terhadap amplitudo respon dibandingkan variasi kecil pada komponen gaya dinamik (Brinkgreve et al., 2010).

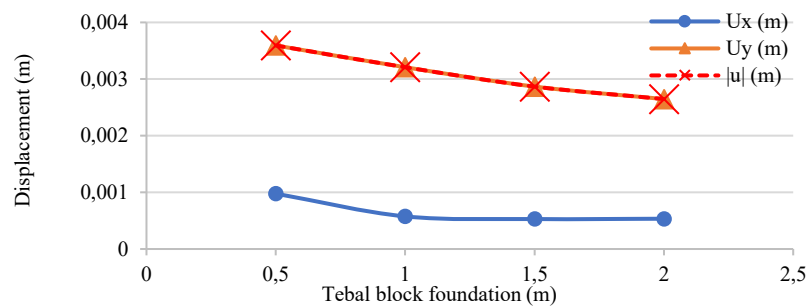
Berdasarkan hasil analisis pada Gambar 3 dan Gambar 4, peningkatan ketebalan *block foundation* secara signifikan menurunkan *respon displacement* akibat vibrasi generator maupun turbin. Persebaran *displacement* hasil pemodelan dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut.

Berdasarkan persebaran tersebut, terlihat bahwa peningkatan ketebalan *block foundation* menyebabkan perubahan karakter persebaran *displacement*, baik dari segi amplitudo maupun kedalaman pengaruh deformasi. Pada ketebalan yang lebih kecil, zona deformasi relatif lebih terkonsentrasi di sekitar fondasi dan menjalar lebih dalam ke tanah, sedangkan pada ketebalan yang lebih besar, amplitudo *displacement* menurun dan pola deformasi menjadi lebih stabil serta menyebar secara lebih merata.

Pola persebaran *displacement* pada Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan terbentuknya zona deformasi berbentuk *bulb* di bawah fondasi, yang merupakan karakteristik umum respon tanah terhadap pembebanan dinamik pada fondasi kaku. Zona bulbing ini mencerminkan distribusi tegangan dan regangan tanah akibat kombinasi gaya dinamik, massa fondasi, dan kekakuan tanah, di mana deformasi maksimum tidak selalu terjadi di permukaan, tetapi bergeser ke kedalaman (Lysmer & Richart, 1966; Gazetas, 1983).

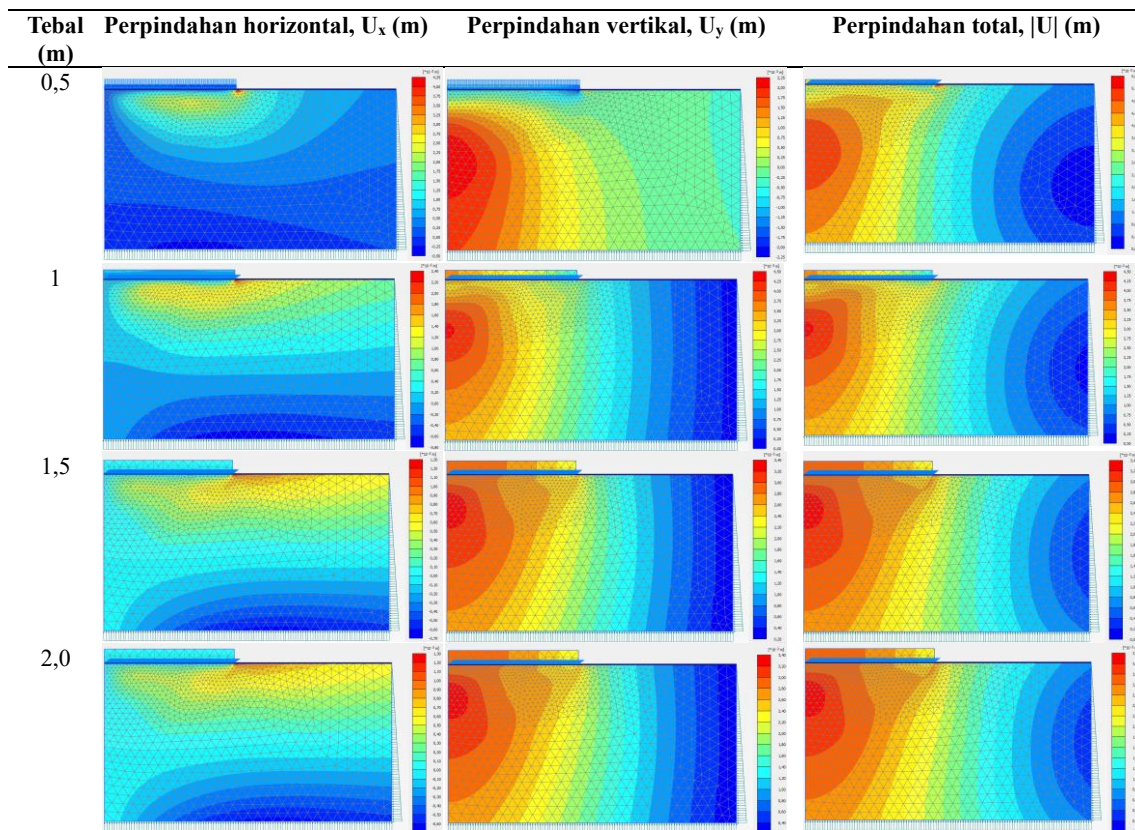


Gambar 3. *Displacement* akibat vibrasi generator

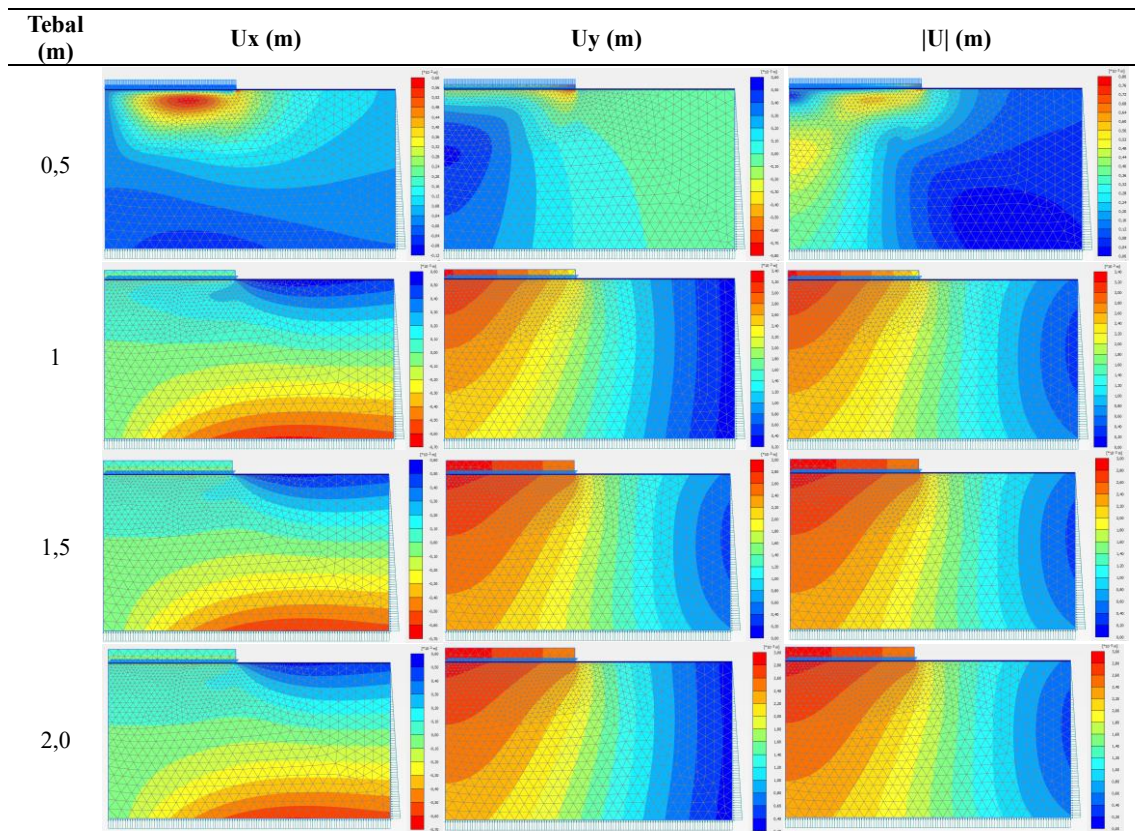


Gambar 4. *Displacement* akibat vibrasi turbin

Tabel 3. Tipikal persebaran perpindahan (*displacement*) akibat beban generator



Tabel 4. Tipikal persebaran perpindahan (*displacement*) akibat beban turbin



Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik dan evaluasi grafik perpindahan fondasi mesin, ketebalan *block foundation* terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap respon dinamik sistem. Untuk beban generator, peningkatan ketebalan fondasi dari 0,5 m menjadi 1,0 m mampu menurunkan displacement horizontal (U_x) hingga sekitar 46–48%, sedangkan displacement vertikal (U_y) dan resultan perpindahan ($|u|$) berkurang sekitar 20–32%. Penurunan yang paling efektif terjadi hingga ketebalan 1,5 m, di mana $|u|$ berkurang total hingga sekitar 46% dibandingkan kondisi awal.

Pada ketebalan di atas 1,5 m, penambahan ketebalan fondasi tidak lagi menghasilkan reduksi displacement yang signifikan. Hal ini tercermin dari perubahan persentase yang relatif kecil, bahkan menunjukkan kecenderungan stabil atau sedikit meningkat

pada beberapa komponen perpindahan. Fenomena ini mengindikasikan terjadinya *diminishing return*, di mana peningkatan massa dan inersia fondasi tidak lagi diikuti oleh peningkatan efektivitas peredaman respon dinamik.

Untuk beban turbin, tren yang serupa juga teramati meskipun dengan amplitudo displacement yang lebih kecil. Peningkatan ketebalan fondasi dari 0,5 m ke 1,0 m menurunkan U_x hingga 41% dan U_y sekitar 11%, sementara reduksi selanjutnya pada ketebalan lebih besar menjadi relatif terbatas ($\leq 10\%$). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun besarnya gaya dinamik memengaruhi amplitudo respon, mekanisme pengendalian respon dinamik melalui peningkatan massa fondasi tetap konsisten untuk kedua jenis mesin.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa ketebalan *block foundation* sekitar 1,0–1,5 m merupakan rentang yang paling

efektif dalam menurunkan respon perpindahan fondasi mesin untuk kondisi tanah dan beban yang dianalisis. Ketebalan di atas rentang tersebut memberikan manfaat tambahan yang terbatas, sehingga dari sisi kinerja dinamik dan efisiensi desain, peningkatan ketebalan fondasi perlu dipertimbangkan secara rasional.

Daftar Pustaka

- Allawi, A. A., & Mohammed, A. A. (2022). Dynamic analysis of machine foundations resting on two-layer dry sand using PLAXIS 3D. *Journal of Engineering*, 28(5), 38–54.
- Barkan, D. D. (1962). *Dynamics of bases and foundations*. McGraw-Hill.
- Brinkgreve, R. B. J. (2005). Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application. *PLAXIS Bulletin*, 2005(1), 7–16.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2010). *PLAXIS 2D reference manual*. Delft, The Netherlands: Plaxis BV.
- Chakraborty, T., & Bhattacharya, S. (2012). Dynamic behavior of machine foundation resting on soil: A numerical study. *Computers and Geotechnics*, 43, 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.02.003>
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Cengage Learning. <https://www.cengage.com/c/principles-of-foundation-engineering-7e-das/>
- Gazetas, G. (1983). Analysis of machine foundation vibrations: State of the art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2(1), 2–42. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(83\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0267-7261(83)90012-1)
- Gazetas, G., & Dobry, R. (1984). Horizontal response of piles in layered soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110(1), 20–40. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:1\(20\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:1(20))
- Karki, R., & Maskey, S. (2025). Dynamic response of machine foundation considering variation of foundation mass and soil stiffness.
- Kumar, J., & Bhargava, K. (2016). Dynamic analysis of block foundation using finite element method. *International Journal of Geomechanics*, 16(6), 04016022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000664](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000664)
- Lysmer, J., & Richart, F. E. (1966). Dynamic response of footings to vertical loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 92(SM1), 65–91.
- PLAXIS. (n.d.). *Dynamic analysis in PLAXIS reference manual*. Bentley Systems. <https://communities.bentley.com/products/ge>

otech-analysis/w/plaxis-soilvision-wiki/49013/dynamic-analysis-in-plaxis

- Prakash, S., & Puri, V. K. (1988). *Foundations for machines: Analysis and design*. John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470172844>
- Richart, F. E., Hall, J. R., & Woods, R. D. (1970). *Vibrations of soils and foundations*. Prentice-Hall.