

OPTIMASI FONDASI DANGKAL SETEMPAT PADA TANAH PASIR DENGAN METODE METAHEURISTIK

Dani Nugraha Limantono¹, Ronaldo Richard Gunawan², Doddy Prayogo³ and Y.T. Teddy Susanto⁴

ABSTRAK : Pengertian fondasi adalah bagian bawah struktur bangunan yang terhubung langsung ke dalam tanah yang berguna untuk menahan berat bangunan pada bagian atas struktur bangunan. Fondasi dangkal biasanya digunakan untuk bangunan sederhana bertingkat rendah dan tidak membutuhkan galian tanah yang dalam. Setidaknya ada tiga syarat yang perlu diperhatikan dalam desain fondasi yaitu *Ultimate Limit State* (ULS), *Serviceability Limit State* (SLS) dan ekonomis. Penggunaan metode optimasi dapat membantu menghasilkan dimensi fondasi beserta tulangnya yang optimal dan ekonomis namun tetap aman. Pada penelitian yang dilakukan menggunakan metode metaheuristik *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Symbiotic Organisms Search* (SOS) dalam menyelesaikan masalah terkait optimasi fondasi dangkal setempat. Studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini adalah Bangunan Rumah Toko (Ruko) dua lantai dan tiga lantai. PSO dan SOS akan bekerja untuk menemukan biaya konstruksi termurah tetapi tetap memenuhi persyaratan yang berlaku. Melalui optimasi, metode metaheuristik dapat memberikan hasil yang optimal. Secara umum, performa dari algoritma SOS lebih unggul daripada algoritma PSO.

KATA KUNCI : optimasi, fondasi dangkal, metaheuristik, ekonomis

1. PENDAHULUAN

Pengertian fondasi secara harfiah adalah bagian bawah struktur bangunan yang terhubung langsung ke dalam tanah yang berguna untuk menahan berat bangunan pada bagian atas struktur bangunan (Das, 2015). Setidaknya ada tiga syarat yang perlu diperhatikan dalam desain fondasi yaitu *Ultimate Limit State* (ULS), *Serviceability Limit State* (SLS) dan ekonomis (Wang dan Kulhawy, 2008). Fondasi dangkal yang didesain harus dapat menghemat biaya konstruksi, maka diperlukan proses optimasi yang benar-benar presisi. Pada optimasi yang akan dilakukan *constraint* yang digunakan kompleks dan jumlahnya banyak maka tidak dapat digunakan metode deterministik untuk menyelesaikannya, sehingga perlu menggunakan metode metaheuristik yaitu *particle swarm optimization* (PSO) dan *symbiotic organisms search* (SOS).

Azhim dan Prakoso (2018) sudah melakukan penelitian terkait optimasi fondasi dangkal untuk *sand soil* dengan menggunakan *Microsoft Excel* pada dimensinya saja. Kemudian, Husada dan Nathanael (2021) melakukan penelitian terkait optimasi fondasi dangkal dengan menggunakan PSO dan SOS akan tetapi hanya terbatas dalam dimensinya saja. Sementara itu, Khajehzadeh, et al., (2013) sudah melakukan penelitian terkait optimasi fondasi dangkal meliputi dimensi dan tulangnya menggunakan GA dan GSA. Optimasi yang digunakan di penelitian ini adalah dua metode metaheuristik, yaitu SOS dan PSO untuk didapat desain fondasi dangkal yang dapat menghemat biaya konstruksi dari bangunan rencana.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, b11180108@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, b11180136@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, prayogo@petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, teddy.susanto@petra.ac.id

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada proyek konstruksi, terdapat dua jenis fondasi, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Selain menahan beban sendirinya, fondasi juga harus mampu menahan beban bangunan struktur di atasnya dengan memperhatikan daya dukung tanah di titik lokasi fondasi tersebut berada. Fondasi dangkal pada umumnya digunakan untuk bangunan yang memiliki tanah keras dekat dengan permukaan tanah serta beban bangunan yang relatif ringan. Hal yang dipertimbangkan dalam pembuatan fondasi dangkal setempat ini adalah dimensi, kebutuhan tulangan dan juga kedalamannya. Semakin besar dimensi fondasi, maka biaya yang akan dikeluarkan akan semakin besar pula dan begitu juga sebaliknya. Sementara dimensi fondasi dangkal tersebut belum tentu efisien untuk menahan beban bangunan di atasnya, sehingga dibutuhkan adanya proses optimasi. Untuk melakukan proses optimasi tersebut, maka dari desain suatu struktur dibutuhkan variabel yang akan dioptimasi, *constraint*, dan tujuan atau *objective* yang ingin dicapai dari proses optimasi.

Variabel-variabel desain yang akan digunakan dalam proses optimasi berhubungan dengan dimensi, kebutuhan tulangan dan kedalaman dari fondasi dangkal setempat. Variabel desain yang dipakai yaitu panjang fondasi (B), lebar fondasi (L), tebal fondasi (T), kedalaman fondasi (Df), kebutuhan tulangan lentur memanjang (Asb), kebutuhan tulangan lentur melebar (Asl). Masing-masing variabel mempunyai batas bawah (*lower bound*) dan batas atas (*upper bound*) sendiri-sendiri. Hal ini bertujuan agar *random* yang dilakukan lebih terarah dan dapat sesuai standar yang berlaku secara umum. Batas bawah (*lower bound*) yang dipakai masing-masing variabel berturut-turut B, L, T, Df, Asb, Asl adalah 0 m, 0 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,002BT, 0,002LT. Di lain sisi, batas atas (*upper bound*) yang dipakai masing-masing 3 m, 3 m, 0,5 m, 2 m, As max, As max.

Dalam proses optimasi, dibutuhkan *constraint* yang bertujuan agar optimasi yang kita lakukan memenuhi syarat-syarat yang sesuai. Dalam kaitannya dengan fondasi dangkal setempat, dengan adanya *constraint* diharapkan struktur yang kita desain walaupun ekonomis secara biaya, namun tetap kuat dan tidak menyalahi standar peraturan yang berlaku. *Constraint* yang digunakan pada penelitian ini ada 6 macam yaitu *bearing capacity limit state*, *sliding force limit state*, *punching shear failure mode*, *one way shear failure mode*, *flexure failure mode*, dan *calculated settlement*. Syarat-syarat *constraint* tertuang di SNI 8460:2017, SNI 2847:2019 dan *bearing capacity theory*. Melalui SNI 8460:2017 membahas persyaratan perancangan geoteknik dan juga syarat keamanan untuk fondasi dangkal yang mencakup *bearing capacity* dan *sliding force limit state*. Lalu, SNI 2847:2019 membahas persyaratan beton yang mencakup perhitungan gaya geser beton dan syarat tulangan yang dipakai dalam desain fondasi dangkal. Terakhir, *bearing capacity theory* membahas daya dukung pada fondasi dangkal yang bersesuaian dengan SNI 8460:2017.

Objective function merupakan fungsi yang dapat menggabungkan semua variabel dan parameter menjadi satu-kesatuan untuk mendapatkan hasil optimasi yang diinginkan, baik mencari nilai maksimum, minimum, ataupun optimum. Pada penelitian yang dilakukan kali ini, *objective function*-nya bertujuan untuk mencari biaya yang paling minimum (*cost optimization*) tetapi tetap memenuhi syarat desain sesuai peraturan yang berlaku. *Objective function* yang digunakan dirumuskan dalam **Persamaan 1**. Jika *objective function* memberikan hasil yang menyalahi *constraint*, akan mendapat *penalty* yaitu penambahan biaya konstruksi keseluruhan.

$$f(X) = P_c V_c + P_e V_e + P_b V_b + P_f A_f + P_s W_s \quad (1)$$

di mana:

$$f(X) = \text{objective function (Rp)}$$

$$P_c = \text{biaya pengecoran beton per satuan volume (Rp/m}^3\text{)}$$

$$V_c = \text{volume pengecoran beton (m}^3\text{)}$$

$$P_e = \text{biaya penggalian tanah per satuan volume (Rp/m}^3\text{)}$$

V_e	= volume penggalian tanah (m^3)
P_b	= biaya pengurangan dan pemadatan tanah kembali per satuan volume (Rp/m^3)
V_b	= volume pengurangan dan pemadatan tanah kembali (m^3)
P_f	= biaya bekisting fondasi per satuan luas (Rp/m^2)
A_f	= luas bekisting fondasi (m^2)
P_s	= biaya pembesian per satuan massa (Rp/kg)
W_s	= massa tulangan baja (kg)

Pada penelitian yang dilakukan menggunakan metode metaheuristik yaitu PSO dan SOS. Pada algoritma PSO, pencarian solusi dilakukan oleh suatu populasi yang terdiri dari beberapa partikel (Shi, 2001). Partikel tersebut diletakkan secara acak dan memiliki kecepatan awalnya masing-masing. Kecepatan partikel tersebut dipengaruhi oleh kecepatan partikel saat ini ($V_i(t)$), lokasi terbaik yang pernah ditempati oleh partikel tersebut ($P_i(t)$), lokasi terbaik dari populasi ($P_g(t)$), dan lokasi dari partikel tersebut ($X_i(t)$).

SOS sendiri terinspirasi dari ilmu biologi mengenai hubungan antara dua makhluk hidup, yang dikenal dengan istilah simbiosis. Simbiosis ini ada tiga macam yaitu simbiosis mutualisme, simbiosis komensalisme, dan simbiosis parasitisme. Penerapan simbiosis mutualisme dalam algoritma metaheuristik ini adalah ketika dilakukan iterasi ditemukan hasil yang lebih baik, hasil sebelumnya akan di-*replace* dengan hasil yang lebih baik. Kemudian akan dilanjutkan ke simbiosis komensalisme dan terakhir simbiosis parasitisme. Penerapan simbiosis parasitisme dalam algoritma metaheuristik ini adalah adanya *parasite vector* akan menggantikan organisme apabila mempunyai *fitness value* yang lebih baik.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Optimasi ukuran fondasi dangkal setempat dilakukan dengan menggunakan algoritma metaheuristik. Sebelum melakukan proses optimasi dengan algoritma, tim penulis meneliti terlebih dahulu mengenai karakteristik komponen peninjau dari fondasi dangkal setempat tersebut berikut dengan parameter-parameter yang akan digunakan dalam perhitungan. Dalam proses optimasi yang akan dilakukan, melalui program ETABS2000 v17 akan dimodelkan konstruksi bangunan yang akan diteliti dengan lokasi bangunan berada di pusat kota Surabaya yang kemudian didapat *output* berupa reaksi perletakan. Selanjutnya, proses optimasi akan dijalankan dengan menggunakan algoritma PSO dan SOS kemudian dibandingkan hasilnya. *Constraint* yang dipakai dalam penelitian ini didapatkan dari *bearing capacity limit state*, *sliding force limit state*, *punching shear failure mode*, *one way shear failure mode*, *flexure failure mode* dan *calculated settlement*. Bila hasil yang diberikan tidak dapat memenuhi *constraint* yang telah diberikan, maka algoritma akan memberikan *penalty function* sampai diperoleh hasil yang dapat memenuhi *constraint*. Tim penulis juga akan melakukan *performance evaluation* antara PSO dan SOS untuk mengetahui mana algoritma yang lebih baik untuk optimasi fondasi dangkal setempat yang paling optimal dengan biaya optimum.

4. HASIL DAN DISKUSI

Pada penelitian yang dilakukan menggunakan Bangunan Rumah Toko (Ruko) dua lantai yang berlokasi di Kota Surabaya dengan tujuan menghasilkan biaya konstruksi fondasi dangkal setempat seekonomis mungkin dan tetap memenuhi standar yang berlaku. Parameter *input* yang dipakai dalam penelitian ini meliputi sudut gesekan tanah bernilai 24° , tidak ada kohesi tanah, berat jenis tanah bernilai 18 kN/m^3 , kedalaman muka air tanah bernilai $-1,5 \text{ m}$, berat jenis air bernilai 10 kN/m^3 . Selanjutnya, parameter *input* lain yang mencakup parameter tanah, parameter beton, parameter baja tulangan dan parameter struktur bangunan dicantumkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter *Input* yang Diperlukan pada Fondasi Dangkal Setempat

Jenis Parameter	Parameter Input	Satuan	<i>Input Value</i> Setempat 2 Lantai	<i>Input Value</i> Setempat 3 Lantai
Parameter Tanah	Sudut gesekan tanah	°	24	24
	Kohesi tanah	kPa	0	0
	Berat jenis tanah	kN/m ³	18	18
	Tinggi muka air tanah	m	1,5	1,5
	Berat jenis air	kN/m ³	10	10
	<i>SF bearing capacity</i>	-	3	3
	<i>SF sliding shear</i>	-	1,5	1,5
Parameter Beton	Kekuatan tekan beton	MPa	25	25
	Berat jenis beton	kN/m ³	24	24
	Selimut beton	mm	75	75
Parameter Baja Tulangan	Diameter tulangan utama	mm	13	13
	Diameter tulangan sengkang	mm	13	13
	Kuat leleh tulangan utama	MPa	400	400
	Kuat leleh tulangan sengkang	MPa	400	400
Parameter Struktur Bangunan	Panjang kolom	mm	300	300
	Lebar kolom	mm	500	500
	Tinggi antar lantai	m	4	4
	Konstanta kolom	-	40	40
	Sudut beban terhadap vertikal	°	0	0

Objective function yang dipakai pada penelitian ini sudah tercantum melalui **Persamaan 1**. Pada penelitian yang dilakukan, *objective function* mencakup harga bahan dan tenaga kerja. Analisis harga yang dipakai pada penelitian ini yang mencakup pekerjaan penggalian tanah, pekerjaan bekisting fondasi, pekerjaan penulangan fondasi, pekerjaan cor beton, pekerjaan pengurugan dan pemadatan tanah tercantum pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Perincian Harga Bahan dan Tenaga Kerja

Tipe Pekerjaan	Penjelasan	Harga
Pekerjaan penggalian tanah (m ³)	Bahan	-
	Tenaga Kerja	Rp 100.125,00
Pekerjaan bekisting fondasi (m ²)	Bahan	Rp 32.750,00
	Tenaga Kerja	Rp 54.275,00
Pekerjaan penulangan fondasi (m ²)	Bahan	Rp 9.225,00
	Tenaga Kerja	Rp 1.805,00
Pekerjaan cor beton (m ³)	Bahan	Rp 877.200,00
	Tenaga Kerja	Rp 165.000,00
Pekerjaan pengurugan dan pemadatan tanah (m ³)	Bahan	-
	Tenaga Kerja	Rp 122.500,00

Sementara itu, pada **Tabel 3** memberikan komparasi *running* optimasi fondasi dangkal setempat dengan algoritma PSO dan SOS. Pada **Tabel 3**, yang tercantum di atas menunjukkan komparasi hasil antara algoritma PSO dan SOS untuk masing-masing variabel yang ditinjau. Melalui **Tabel 3**, terlihat bahwa algoritma SOS dapat dikatakan memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan algoritma PSO. Jika melihat pada *success rate* dapat dikatakan kedua algoritma, PSO dan SOS, sama baiknya karena menghasilkan *success rate* 100 % yang artinya semua proses optimasi dapat memberikan hasil yang tidak melanggar *constraint*.

Tabel 3. Hasil *Running* Optimasi Fondasi Dangkal Setempat

Variabel	PSO	SOS
B₁ (m)	1,1294	1,1054
L₁ (m)	1,4246	1,2141
T₁ (m)	0,3023	0,3000
Df₁ (m)	1,4606	1,5000
Asb₁ (mm²)	1063,8775	586,4949
Asl₁ (mm²)	931,5096	791,9185
B₂ (m)	1,3617	1,3752
L₂ (m)	1,4727	1,3752
T₂ (m)	0,3012	0,3000
Df₂ (m)	1,5220	1,5000
Asb₂ (mm²)	986,3819	890,4334
Asl₂ (mm²)	1000,5833	817,3252
B₃ (m)	1,1866	1,0971
L₃ (m)	1,4269	1,2251
T₃ (m)	0,3601	0,3000
Df₃ (m)	1,3711	1,4999
Asb₃ (mm²)	543,0053	557,3584
Asl₃ (mm²)	628,8875	493,6778
B₄ (m)	1,1033	1,1061
L₄ (m)	1,7407	1,2132
T₄ (m)	0,3066	0,3000
Df₄ (m)	1,5212	1,5000
Asb₄ (mm²)	971,9954	630,9955
Asl₄ (mm²)	695,4459	445,1064
B₅ (m)	1,4180	1,3752
L₅ (m)	1,5134	1,3752
T₅ (m)	0,3243	0,3000
Df₅ (m)	1,4088	1,5000
Asb₅ (mm²)	712,2049	617,7078
Asl₅ (mm²)	855,5857	646,7093
B₆ (m)	1,5375	1,4687
L₆ (m)	0,7951	0,7045
T₆ (m)	0,4444	0,3001
Df₆ (m)	1,6461	1,6202
Asb₆ (mm²)	877,3772	511,8763
Asl₆ (mm²)	991,3635	1061,8583
Hasil Terbaik	Rp 19.041.858,56	Rp 16.024.179,68
Hasil Terburuk	Rp 22.182.387,04	Rp 17.076.920,42
Median	Rp 19.953.360,15	Rp 16.169.780,45
Rata-rata	Rp 20.145.726,72	Rp 16.253.297,11
Standar Deviasi	Rp 894.827,04	Rp 235.330,87
Success Rate	100 %	100 %

Melalui percobaan sebanyak 30 kali, didapatkan rata-rata biaya konstruksi untuk algoritma PSO adalah Rp 20.145.726,72 dengan standar deviasi sebesar Rp 894.827,04 sementara rata-rata biaya konstruksi untuk algoritma SOS adalah Rp 16.253.297,11 dengan standar deviasi sebesar Rp 235.330,87. Oleh karena itu, algoritma SOS dapat dikatakan memberikan nilai rata-rata dan standar deviasi yang lebih unggul daripada algoritma PSO. Kemudian, hasil terbaik untuk algoritma PSO menghasilkan biaya konstruksi sebesar Rp 19.041.858,56 sementara algoritma SOS menghasilkan biaya konstruksi sebesar Rp 16.024.179,68. Lalu, hasil terburuk untuk algoritma PSO menghasilkan biaya konstruksi sebesar Rp 22.182.387,04 sementara algoritma SOS menghasilkan biaya konstruksi sebesar Rp 17.076.920,42. Melalui hal tersebut, dapat dilihat bahwa hasil terbaik dari algoritma PSO belum dapat mengungguli hasil terburuk dari algoritma SOS.

5. KESIMPULAN

Pada penelitian yang dilakukan, dapat ditemukan biaya konstruksi yang ekonomis dan tetap memenuhi persyaratan yang berlaku dalam desain fondasi dangkal setempat untuk kedua algoritma (PSO dan SOS) pada studi kasus Bangunan Rumah Toko (Ruko) dua lantai. Algoritma SOS dapat dikatakan memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan algoritma PSO, dan selisihnya cukup signifikan sehingga tidak dapat diabaikan.

6. DAFTAR REFERENSI

- Azhim, A., and Prakoso, W. A. (2018). "Construction Cost Optimization of Shallow Foundation for Sand Soil in Indonesia." *MATEC Web of Conferences* 270. Vol. 05.
- Das, B. M. (2015). *Principle of Foundation Engineering*, Cengage Learning, USA.
- Husada, V. R., and Nathanael, F. (2021). *Optimasi Biaya Pondasi Dangkal dengan Metode Metaheuristik*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Khajehzadeh, et.al. (2012). "Optimization of Shallow Foundation Using Gravitational Search Algorithm." *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*. Vol. 4, No. 9, 1124-1130.
- Shi, Y. (2001). "Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources." *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*.
- Wang, Y., and Kulhawy, F. H. (2008). "Economic Design Optimization of Foundations." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 134, No. 8, 1097-1105.