

OPTIMASI BIAYA PONDASI SETEMPAT DENGAN METODE METAHEURISTIK

Vania Regina Husada¹, Ferdian Nathanael², Doddy Prayogo³ and Y.T. Teddy Susanto⁴

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia

^{3,4} Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia

¹b11170039@john.petra.ac.id, ²b11170039@john.petra.ac.id, ³prayogo@petra.ac.id,
⁴tsusanto53@gmail.com

ABSTRAK: Pondasi adalah bagian dari struktur bangunan yang berfungsi meneruskan beban struktur atas ke lapisan tanah dengan aman. Sementara pondasi dangkal digunakan apabila lapisan tanah keras terletak dekat dengan permukaan tanah. Untuk mendapatkan hasil desain pondasi dangkal yang optimal, terdapat tiga kriteria penting yang harus diperhatikan yaitu *ultimate limit state* (ULS), *serviceability limit state* (SLS), dan ekonomis. Penggunaan metode optimasi yang baik akan membantu menghasilkan dimensi pondasi yang optimal dan ekonomis namun tetap memenuhi syarat aman. Penelitian ini menggunakan metode metaheuristik *particle swarm optimization* (PSO) dan *symbiotic organisms search* (SOS) untuk menyelesaikan permasalahan optimasi pondasi dangkal. PSO dan SOS bekerja untuk menemukan solusi dimensi pondasi setempat yang diharapkan dapat memiliki biaya konstruksi terendah dan dibatasi oleh *constraint* dari SNI 8460:2017, SNI 2847:2013, dan *bearing capacity theory*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SOS memiliki performa yang lebih baik dari PSO untuk studi kasus bangunan dua lantai.

KATA KUNCI: optimasi pondasi dangkal, metaheuristik, *symbiotic organisms search*, *particle swarm optimization*

1. PENDAHULUAN

Pondasi dangkal merupakan pondasi yang dapat digunakan jika lapisan tanah kerasnya terletak dekat dengan permukaan tanah, dengan perbandingan antara kedalaman dan lebar pondasi tiga hingga empat (Das, 2015). Terdapat tiga kriteria yang harus dipenuhi dalam mendesain suatu pondasi, yaitu *ultimate limit state* (ULS), *serviceability limit state* (SLS), dan ekonomis (Wang & Kulhawy, 2008). Tantangan terbesar bagi seorang insinyur adalah menyeimbangkan ketiga kriteria ini sehingga mendapatkan desain pondasi yang kuat dengan biaya yang ekonomis. Metode optimasi akan membantu insinyur untuk mendapatkan dimensi pondasi yang paling optimal dan juga ekonomis dengan tetap memperhatikan *constraint* yang ada. Pada penelitian terdahulu, metode deterministik seperti *linear programming* dan *gradient based method* sering digunakan dalam proses optimasi. Namun, karena beberapa kelemahan yang dimiliki oleh metode deterministik, maka diperlukan adanya alternatif metode optimasi yang mampu mengatasi permasalahan yang lebih rumit, yaitu metode metaheuristik seperti *particle swarm optimization* (PSO) dan *symbiotic organisms search* (SOS).

Wang & Kulhawy (2008) telah melakukan penelitian mengenai optimasi pondasi dangkal berupa pondasi setempat dan menghemat biaya konstruksi sebesar 30% dari desain awal dengan menggunakan *linear programming* yang merupakan metode deterministik. Sementara Ukritchon & Keawsawasvong (2016) juga telah melakukan penelitian mengenai optimasi pondasi dangkal berupa pondasi lajur dengan menggunakan *ant colony optimization*. Pada penelitian ini, akan digunakan metode metaheuristik berupa algoritma PSO dan SOS untuk melakukan optimasi terhadap pondasi setempat yang akan menghasilkan pondasi dangkal dengan biaya konstruksi yang ekonomis sesuai dengan bangunan yang akan ditinjau. Diharapkan dengan adanya optimasi ini, insinyur akan lebih mudah untuk menentukan pondasi yang akan digunakan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Terdapat berbagai jenis pondasi mulai pondasi dangkal diantaranya pondasi setempat dan pondasi lajur. Selain menahan beban sendirinya, pondasi harus mampu menahan beban bangunan di atasnya dengan memperhatikan daya dukung tanah di lokasi tersebut. Pondasi dangkal cocok digunakan untuk bangunan yang memiliki tanah keras dekat dengan permukaan tanah serta beban bangunan yang relatif ringan. Hal yang dipertimbangkan dalam pembuatan pondasi dangkal adalah dimensi dan kedalamannya. Semakin besar dimensi pondasi, maka biaya yang dikeluarkan semakin besar pula dan begitu pula sebaliknya. Sementara dimensi pondasi lajur tersebut belum tentu efisien untuk beban bangunan di atasnya sehingga dibutuhkan adanya optimasi. Untuk melakukan proses optimasi sehingga tercapainya hasil yang optimal, dari desain suatu struktur dibutuhkan variabel yang akan dioptimasi, *constraint*, dan tujuan atau *objective* yang ingin dicapai dari proses optimasi.

Variabel-variabel yang digunakan dalam proses optimasi berhubungan dengan dimensi dari pondasi setempat serta tulangan baja yang akan digunakan. Variabel desain yang digunakan di antara lain adalah *footing width* (B), *footing thickness* (H), *footing depth* (D), *footing length* (L). Variabel B , H , D , L berhubungan dengan dimensi dari pondasi dangkal. Parameter desain lain yang digunakan adalah *properties* tanah, beban bangunan, mutu beton, mutu tulangan, tebal selimut beton, harga satuan pekerjaan galian, harga satuan pekerjaan bekisting, harga satuan pekerjaan penulangan, harga satuan pekerjaan pengecoran, harga satuan pekerjaan pemadatan kembali. *Properties* tanah yang menjadi parameter desain meliputi sudut gesekan tanah (ϕ), kohesi tanah, berat jenis tanah.

Adanya *upper bound* dan *lower bound* bertujuan untuk membatasi *random variable*. *Upper bound* atau batas atas adalah pembatasan nilai maksimum yang dimiliki oleh *random variable*, sedangkan *lower bound* atau batas bawah merupakan nilai minimum yang dimiliki oleh *random variable*. Untuk *upper bound* yang digunakan untuk masing-masing variable B , H , D , L adalah 0,5 m, 0,15 m, 0,5 m, 0,5 m. Sementara *lower bound* yang digunakan adalah 1,5 m, 1 m, 2 m, 1,5 m.

Dalam optimasi pondasi dangkal, dibutuhkan suatu *constraint*. *Constraint* tersebut digunakan untuk memastikan bahwa desain yang dihasilkan dari proses optimasi tidak mengalami kegagalan. *Constraint* yang digunakan antara lain *safety factor for bearing capacity*, *safety factor for sliding force*, dan *allowable shear force of concrete*. Syarat-syarat *constraint* yang digunakan mengacu pada SNI 8460:2017, SNI 2847:2013, dan *bearing capacity theory*. SNI 8460:2017 mengatur mengenai persyaratan dan tata cara perencanaan pondasi dangkal beserta dengan dimensi pondasi dangkal. Dari SNI tersebut, juga terdapat syarat keamanan untuk pondasi dangkal baik terhadap *bearing capacity* maupun *sliding force*. Sementara SNI 2847:2013 mengatur mengenai persyaratan beton yang digunakan dalam pondasi dangkal, baik perhitungan gaya geser beton maupun persyaratan tulangan yang digunakan. *Bearing capacity theory* digunakan untuk menghitung daya dukung pada pondasi dangkal untuk disesuaikan dengan persyaratan yang terdapat pada SNI 8460:2017.

Objective function adalah suatu rumusan fungsi yang digunakan untuk menggambarkan suatu nilai yang menjadi tujuan dari suatu proses optimasi. Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah biaya konstruksi yang paling rendah. *Objective function* yang digunakan dirumuskan dalam Persamaan (1). Sementara *apabila objective function* yang dihasilkan melanggar *constraints* maka akan diberi *penalty* berupa penambahan biaya konstruksi.

$$f(X) = C_e V_e + C_{ff} A_{ff} + C_{fs} A_{fs} + C_r W_r + C_c V_c + C_b V_b \quad (1)$$

di mana:

- C_e = biaya penggalian tanah per satuan volume (Rp/m³)
- V_e = volume penggalian tanah (m³)
- C_{ff} = biaya bekisting pondasi per satuan luas (Rp/m²)
- A_{ff} = luas bekisting pondasi (m²)
- C_{fs} = biaya bekisting sloof per satuan luas (Rp/m²)
- A_{fs} = luas bekisting sloof (m²)
- C_r = biaya pembesian per satuan massa (Rp/kg)
- W_r = massa tulangan baja (kg)
- C_c = biaya pengecoran beton per satuan volume (Rp/m³)
- V_c = volume pengecoran beton (m³)
- C_b = biaya pengurugan dan pemadatan tanah kembali per satuan volume (Rp/m³)
- V_b = volume pemadatan tanah (m³)

Proses optimasi pada penelitian ini menggunakan metode metaheuristik berupa algoritma PSO (Kennedy & Eberhart, 1995) dan SOS (Cheng & Prayogo, 2014). PSO merupakan algoritma optimasi yang mensimulasikan perilaku sosial kawanan burung atau sekumpulan ikan di mana terdiri dari tindakan individu dan pengaruh individu lain dalam suatu kelompok. Pencarian solusi dilakukan oleh suatu populasi yang terdiri dari beberapa partikel (Shi, 2001). Partikel diletakkan secara acak dan memiliki kecepatan awal masing-masing. Kecepatan partikel dipengaruhi oleh kecepatan partikel saat ini, lokasi terbaik yang pernah ditempati oleh partikel tersebut, lokasi terbaik dari populasi, dan lokasi dari partikel tersebut.

Sementara SOS mensimulasikan interaksi simbiotik dalam hubungan organisme berpasangan yang digunakan untuk mencari organisme yang paling sesuai. Terdapat 3 fase yang digunakan, seperti dalam interaksi biologi antara dua organisme dalam ekosistem yaitu fase mutualisme, fase komensalisme, fase parasitisme. Di mana pada fase mutualisme penerapannya adalah iterasi selanjutnya dapat menggantikan iterasi sebelumnya apabila hasil yang didapatkan lebih baik sehingga saling menguntungkan kemudian digunakan dalam fase komensalisme lalu fase parasitisme.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Optimasi dimensi pondasi dangkal berupa pondasi setempat dilakukan dengan menggunakan metode metaheuristik. Dalam optimasi ini, beban yang digunakan untuk pondasi berasal dari reaksi perletakan terhadap studi kasus pada bangunan ruko bertingkat. Pemodelan untuk struktur bangunan menggunakan ETABS2000 v16. Selain beban bangunan, juga terdapat parameter lain yang digunakan di dalam optimasi seperti karakteristik tanah yang didasarkan pada kondisi tanah di Semarang. Parameter-parameter tersebut akan menjadi *input* dalam *coding* dengan MATLAB R2019a. Proses optimasi menggunakan algoritma PSO dan SOS, di mana masing-masing algoritma akan bekerja untuk pondasi setempat. *Constraint* yang digunakan di dalam optimasi ini berupa *safety factor for bearing capacity*, *safety factor for sliding force*, dan *allowable shear force of concrete*. Jika *output* yang dihasilkan melanggar *constraint* maka algoritma akan memberikan *penalty function* berupa penambahan biaya konstruksi sehingga *output* yang dihasilkan tidak optimum. Proses iterasi akan berhenti hingga iterasi maksimum tercapai. Kemudian hasil dari PSO dan SOS juga akan dibandingkan untuk menentukan algoritma yang dapat menghasilkan biaya konstruksi yang paling minimum sebagai *final output*.

4. HASIL DAN DISKUSI

Penelitian menggunakan data dari salah satu bangunan tinggi di Semarang. Studi kasus yang digunakan adalah bangunan ruko dua lantai yang bertujuan untuk menghasilkan pondasi setempat dengan biaya konstruksi yang paling ekonomis. Parameter input yang digunakan adalah sudut gesekan tanah sebesar 25° , tidak ada kohesi tanah, berat jenis tanah sebesar $17,9 \text{ kN/m}^3$, tinggi muka air tanah sebesar $-2,5 \text{ m}$, berat jenis air sebesar 10 kN/m^3 . Parameter input lainnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter *input* pada studi kasus pondasi dangkal

Jenis Parameter	Input Parameter	Input Value Setempat 2 Lantai
Parameter Tanah	Penambahan galian tanah (m)	0,3
	Required safety factor for bearing capacity	3
	Required safety factor for sliding shear	1,5
Parameter Beton	Kekuatan tekan beton (MPa)	25
	Berat jenis beton (kN/m^3)	24
	Selimut beton pondasi (mm)	75
	Selimut beton sloof (mm)	40
Parameter Baja Tulangan	Diameter tulangan utama (mm)	16
	Diameter tulangan sengkang (mm)	13
	Kekuatan leleh baja tulangan utama (kPa)	400.000
	Kekuatan leleh baja tulangan sengkang (kPa)	400.000
	Panjang kolom (mm)	300
Parameter Struktur Bangunan	Lebar kolom (mm)	300
	Tebal dinding (m)	0,15
	Tinggi antar lantai (m)	3,5
	Lebar sloof (mm)	300
	Tinggi sloof (mm)	500
	Konstanta letak kolom	40
	Sudut beban terhadap horizontal ($^\circ$)	90
	Berat jenis dinding batu bata (kN/m^3)	18

Objective function yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dalam Persamaan 1. Dalam penelitian ini, perhitungan *objective function* tidak hanya pada biaya material, melainkan juga biaya tenaga kerja. Analisa harga yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2. Sementara Tabel 3 menunjukkan perbandingan hasil run optimasi pondasi dangkal dengan SOS dan PSO.

Tabel 2. Harga material dan tenaga kerja

Jenis Pekerjaan	Uraian	Jumlah Harga
Galian tanah	Tenaga kerja	Rp 100.125,00
	Bahan	-
Pemasangan bekisting pondasi	Tenaga kerja	Rp 54.275,00
	Bahan	Rp 32.750,00
Pemasangan bekisting sloof	Tenaga kerja	Rp 54.275,00
	Bahan	Rp 90.775,00
Pembesian	Tenaga kerja	Rp 1.805,00
	Bahan	Rp 11.030,00
Pengecoran dengan <i>ready mix</i>	Tenaga kerja	Rp 165.000,00
	Bahan	Rp 877.200,00
Pengurugan dan pemadatan tanah kembali	Tenaga kerja	Rp 122.500,00
	Bahan	-

Tabel 3. Hasil *run* optimasi pondasi setempat

Variabel	Setempat	
	SOS	PSO
B1 (m)	0,6509	1,5583
H1 (m)	0,2595	0,2995
D1 (m)	1,9824	1,5739
L1 (m)	0,6509	1,5583
B2 (m)	1,1086	1,9121
H2 (m)	0,3337	0,3699
D2 (m)	1,9998	1,9349
L2 (m)	1,1086	1,9121
B3 (m)	0,6509	1,5953
H3 (m)	0,2585	0,3021
D3 (m)	1,9824	1,4992
L3 (m)	0,6509	1,5953
B4 (m)	0,6509	1,4836
H4 (m)	0,2585	0,3011
D4 (m)	1,9825	1,7409
L4 (m)	0,6509	1,4836
B5 (m)	1,1087	1,9269
H5 (m)	0,3238	0,3689
D5 (m)	1,9996	1,9153
L5 (m)	1,1087	1,9269
B6 (m)	0,6509	1,5803
H6 (m)	0,2585	0,3045
D6 (m)	1,9824	1,5427
L6 (m)	0,6509	1,5803
B7 (m)	-	-
H7 (m)	-	-
D7 (m)	-	-
L7 (m)	-	-
Terbaik (Rp)	27.242.447,89	28.996.686,43
Terburuk (Rp)	27.515.561,29	32.763.099,73
Median (Rp)	27.254.128,09	29.813.553,35
Rata-rata (Rp)	27.275.011,99	30.074.066,36
Standar Deviasi (Rp)	60.851,36	920.382,69
<i>Success Rate</i>	30/30	28/30

Berdasarkan pada Tabel 3, ditunjukkan perbandingan proses olah data dari kedua algoritma yaitu PSO dan SOS untuk optimasi pondasi setempat. Dapat dilihat bahwa dalam optimasi pondasi setempat, algoritma SOS memiliki performa yang lebih baik daripada algoritma PSO. Hal ini didasarkan pada *success rate* algoritma SOS lebih unggul daripada PSO, yaitu 30/30 yang berarti semua proses optimasi berhasil mengeluarkan dimensi yang optimal. Sementara *success rate* PSO hanya sebesar 28/30 yang berarti hanya 28 kali proses optimasi dengan PSO yang berhasil mengeluarkan dimensi yang optimal. Dari rata-rata 30 kali percobaan, diperoleh bahwa SOS memiliki nilai rata-rata yang lebih baik sebesar Rp 27.275.011,99 dengan standar deviasi sebesar Rp 60.851,36 sementara PSO sebesar Rp 30.074.066,36 dengan standar deviasi sebesar Rp 920.382,69. Selain itu, hasil terbaik yang dihasilkan oleh algoritma SOS sebesar Rp 27.242.447,89 sementara PSO adalah sebesar Rp 28.996.686,43. Sedangkan hasil terburuk yang dihasilkan oleh algoritma SOS sebesar Rp 27.515.561,29 sementara PSO adalah sebesar Rp 32.763.099,73. Hasil optimasi terbaik yang dihasilkan algoritma PSO tidak lebih baik dari hasil optimasi terburuk yang dihasilkan algoritma SOS.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa dan diskusi dari penelitian yang telah dilakukan, dapat dilihat apabila kedua algoritma (PSO dan SOS) mampu menyelesaikan kasus optimasi pondasi dangkal pada studi kasus pada bangunan ruko dua lantai. Algoritma SOS memiliki performa yang lebih baik daripada PSO. Hal ini dapat dilihat *success rate* yang dihasilkan lebih baik dan biaya konstruksi yang dihasilkan lebih rendah. Walaupun untuk beberapa studi kasus, terlihat apabila standar deviasi PSO lebih rendah, namun jumlah rata-rata \pm standar deviasi SOS masih lebih kecil daripada jumlah rata-rata \pm standar deviasi PSO sehingga tetap dapat dikatakan apabila SOS memiliki performa yang lebih baik.

6. DAFTAR REFERENSI

- Cheng, M. Y. and Prayogo, D. (2014). "Symbiotic Organisms Search: A New Metaheuristic Optimization Algorithm." *Computers & Structures*, 139, 98-112.
- Das, B. M. (2015). *Principles of Foundation Engineering*. Cengage learning.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). "Particle Swarm Optimization." *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- Shi, Y. (2001). Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources. *Proceedings of The 2001 Congress On Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)* (Vol. 1, pp. 81-86). IEEE.
- SNI, 2847:2013. (2013). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, 1-265. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- SNI, 8460:2017. (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik*, 1-323. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Ukritchon, B. and Keawsawasvong, S. (2016). "A Practical Method for the Optimal Design of Continuous Footing Using Ant-Colony Optimization." *Acta Geotechnica Slovenica*, 13(2), 45-55.
- Wang, Y. and Kulhawy, F. H. (2008). "Economic Design Optimization of Foundations." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8), 1097-1105.