

## 4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Proses Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efisiensi dan kemampuan dari algoritma PSO dan SOS. Kemampuan dari program metaheuristik dengan algoritma PSO dan SOS ini memiliki jangkauan luas dan dapat menyelesaikan permasalahan kasus optimasi *retaining wall*. Program ini dapat mengidentifikasi keperluan penahan tambahan seperti *counterfort* dan *shear key*, dengan tetap memperhatikan biaya dan kekuatan struktur. Pada Penelitian ini kami menggunakan studi kasus dengan jenis tanah *stiff clay* atau tanah lempung yang kaku.

Data tanah yang diambil di jadikan sebagai parameter *input* yang digunakan dalam pengolahan data masing-masing algoritma, meliputi sudut geser dalam tanah dasar ( $\phi_{base}$ ), berat jenis tanah dasar ( $\gamma_{base}$ ), dan kohesi tanah dasar ( $c$ ). Parameter *input* lainnya berupa: tinggi stem ( $H$ ), selimut beton ( $cc$ ), beban surcharge ( $Q$ ), kemiringan urugan ( $\beta$ ), sudut gesekan tanah tertahan ( $\phi$ ), berat jenis tanah tertahan ( $\gamma_{fill}$ ), kedalaman tanah di depan dinding ( $D$ ), berat jenis tulangan ( $\gamma_s$ ), massa jenis beton ( $\gamma_c$ ), kekuatan leleh tulangan baja ( $f_y$ ), kekuatan tekan beton ( $f_c$ ), harga satuan baja ( $C_s$ ), harga satuan beton ( $C_c$ ), rasio tulangan susut dan rangkai ( $\rho_{st}$ ).

*Random variable* yang digunakan berkaitan dengan dimensi struktur dan tulangan yang dibutuhkan. Dimensi struktur meliputi: total lebar *base*, proyeksi *toe*, ketebalan *stem* di *bottom*, ketebalan *stem* di *top*, ketebalan *base slab*, jarak dari bagian depan *toe slab* ke bagian depan *shear key*, lebar *base shear key*, ketinggian *base shear key*, ketebalan *counterfort*. Tulangan yang menjadi *random variable* meliputi : luas dari tulangan horizontal *toe slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan horizontal lapangan *stem slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan horizontal tumpuan *stem slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan vertikal lapangan *stem slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan vertikal tumpuan *stem slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan horizontal lapangan *heel slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan horizontal tumpuan *heel slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan vertikal lapangan *heel slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan vertikal tumpuan *heel slab* per unit panjang dinding, luas dari tulangan tarik *counterfort* per unit *counterfort*.

Batasan (*constraint*) yang digunakan berkaitan dengan analisis stabilitas antara lain: faktor keamanan terhadap guling, faktor keamanan terhadap geser lateral, faktor keamanan terhadap daya dukung, faktor keamanan terhadap guling akibat gempa, faktor keamanan

terhadap geser lateral akibat gempa, faktor keamanan terhadap daya dukung akibat gempa. Sedangkan, Batasan (*constraint*) yang digunakan berkaitan dengan kekuatan struktural antara lain: kapasitas geser, kapasitas lentur, dan panjang penyaluran. Batasan-batasan tersebut disesuaikan dengan SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik dan SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.

*Objective function* yang menjadi tujuan dari proses optimasi ini adalah untuk menghasilkan desain struktur *counterfort retaining wall* dengan *shear key* yang paling optimum dengan biaya yang minimum dengan tetap memenuhi syarat aman. Biaya ditentukan berdasarkan volume beton dan berat tulangan baja. Harga satuan beton dan baja yang digunakan berdasarkan hasil wawancara dengan praktisi lapangan di lokasi magang penulis yaitu di Kota Surabaya, Jawa Timur, Indonesia. Syarat aman untuk struktur *counterfort retaining wall* dengan *shear key* didasarkan atas syarat stabilitas dan syarat struktural.

Proses optimasi dalam penelitian ini menggunakan metode metaheuristik dengan dua algoritma, yaitu PSO dan SOS. Inisiasi awal dari algoritma PSO adalah penempatan partikel secara acak. Setiap partikel memiliki kecepatan masing-masing. Pergerakan setiap partikel untuk menentukan lokasi selanjutnya dipengaruhi oleh kecepatan partikel saat ini, lokasi terbaik yang pernah ditempati partikel tersebut, lokasi terbaik dari populasi, dan lokasi dari partikel tersebut. Lokasi terbaik dari seluruh partikel akan dipilih menjadi *global solution* yang paling optimal. Sedangkan, untuk algoritma SOS menggunakan simbiosis yang umum meliputi simbiosis mutualisme, komensalisme, dan parasitisme. Cara kerja dari algoritma SOS adalah melalui semua fase dengan proses yang terus berulang sampai kriteria terpenuhi. Penerapan simbiosis mutualisme adalah menggantikan organisme lama jika hasil organisme baru lebih baik untuk kemudian digunakan dalam fase komensalisme lalu fase parasitisme.

Hasil optimasi dari algoritma PSO dan SOS yang digunakan pada penelitian ini kemudian akan dibandingkan. Perbandingan ini bertujuan untuk menentukan algoritma yang paling efisien dalam menyelesaikan permasalahan kasus optimasi struktur dan biaya *counterfort retaining wall* dengan *shear key*. Dari program metaheuristik ini kami tidak terbatas untuk harus menggunakan penahan tambahan seperti *counterfort* dan *shear key*. Program ini bersifat lebih fleksibel dan dapat mengoptimasi struktur *retaining wall* dengan biaya yang termurah.

#### **4.2. Studi Kasus Penelitian**

Parameter umum studi kasus penelitian ini mengacu pada penelitian "*Design of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Wall Using Grey Wolf Optimization Algorithm*"

(Kalemci et al., 2020) sedangkan untuk parameter tinggi stem (m) mengacu pada penelitian “*Optimum Design Of Reinforced Concrete Counterfort Retaining Walls Using TLBO, Jaya Algorithm*” (Tahsin Öztürk et al., 2020), dimana proses optimasi dari kedua algoritma metaheuristik akan dijalankan sebanyak 30 kali *run* untuk mengetahui persebaran hasil yang diperoleh dari masing-masing algoritma (Kalemci et al., 2020). Dalam 1 kali *run* terdiri dari 1000 iterasi untuk satu algoritma dengan menggunakan populasi sebesar 50 berdasarkan penelitian. Setelah dilakukan 30 kali *run*, dilakukan analisis terhadap biaya keseluruhan struktur *counterfort retaining wall* dengan *shear key* mulai dari yang terbaik, terburuk, median, rata-rata, dan standar deviasi dari setiap algoritma yang digunakan.

Algoritma PSO memerlukan pengaturan awal berupa input beberapa nilai parameter. Parameter pengaturan antara lain berat partikel ( $w$ ), konstanta  $c_1$ , dan konstanta  $c_2$ . Nilai 0.5 digunakan untuk parameter ( $w$ ), konstanta  $c_1$  dan  $c_2$  keduanya ditetapkan sebesar 2.

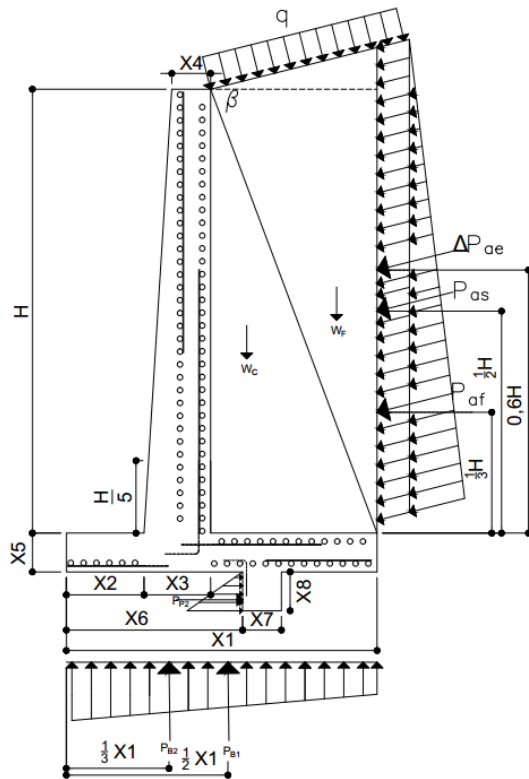
Penelitian ini menggunakan data tanah dengan pengambilan parameter input berupa sudut geser dalam tanah dasar ( $\phi_{base}$ ) sebesar  $0^\circ$ , berat jenis tanah dasar ( $\gamma_{base}$ ) sebesar  $18.5 \text{ kN/m}^3$ , dan kohesi tanah dasar (cB) sebesar 125 kPa. Untuk tanah tertahan menggunakan sudut gesekan tanah tertahan ( $\phi$ ) sebesar  $36^\circ$ , berat jenis tanah tertahan ( $\gamma_{fill}$ ) sebesar  $17.5 \text{ kN/m}^3$ , dan kohesi (cF) sebesar 0 kPa. Sedangkan untuk muka air tanah dalam penelitian ini tidak diperhitungkan karena air dalam tanah akan di *drain* atau di sedot keluar hingga kering. Parameter input lain dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan variabel-variabel yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Tabel 4.1

*Input Parameter* pada Studi Kasus *Counterfort Retaining Wall* dengan *Shear key*

| <b><i>Input Parameter</i></b>                  | <b><i>Symbol</i></b> | <b><i>Input Value</i></b> |
|------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Tinggi stem (m)                                | $H$                  | 10                        |
| Selimut Beton (cm)                             | $cc$                 | 7                         |
| Beban Surcharge (kPa)                          | $Q$                  | 20                        |
| Kemiringan urugan ( $^\circ$ )                 | $B$                  | 10                        |
| Sudut Gesekan Tanah Tertahan ( $^\circ$ )      | $\phi$               | 36                        |
| Sudut Gesekan Tanah Dasar ( $^\circ$ )         | $\phi_{base}$        | 0                         |
| Berat Jenis Tanah Tertahan ( $\text{kN/m}^3$ ) | $\gamma_{fill}$      | 17.5                      |
| Berat Jenis Tanah Dasar ( $\text{kN/m}^3$ )    | $\gamma_{base}$      | 18.5                      |
| Kohesi Tanah Dasar (kPa)                       | cB                   | 125                       |
| Kohesi Tanah Tertahan (kPa)                    | cF                   | 0                         |

|                                               |            |      |
|-----------------------------------------------|------------|------|
| Kedalaman Tanah di Depan Dinding              | D          | 0.5  |
| Berat Jenis Tulangan Baja ( $\text{kN/m}^3$ ) | $\gamma_s$ | 78.5 |
| Massa Jenis Beton ( $\text{kN/m}^3$ )         | $\gamma_c$ | 23.5 |
| Kekuatan Leleh Tulangan Baja (MPa)            | $f_y$      | 400  |
| Kekuatan Tekan Beton (MPa)                    | $f_c$      | 25   |



Gambar 4.1 Pemodelan *Counterfort Retaining Wall* dengan *Shear Key*

Variabel  $X_1$  adalah total lebar base,  $X_2$  adalah proyeksi *toe*,  $X_3$  adalah ketebalan *stem* di *bottom*,  $X_4$  adalah ketebalan *stem* di *top*,  $X_5$  adalah ketebalan *base slab*,  $X_6$  adalah jarak dari bagian depan *toe slab* ke bagian depan *shear key*, dan  $X_7$  adalah lebar *base shear key*,  $X_8$  adalah ketinggian *base shear key*,  $X_9$  adalah ketebalan *counterfort*, dan  $X_{10}$  adalah jarak antar *counterfort*. Kesepuluh variabel ini akan diacak sampai menemukan hasil optimal pada akhir iterasi menurut *upper bound* serta *lower bound* masing-masing yang dapat dilihat pada Tabel 4.2 dengan batasan atau constraint pada Tabel 2.2.

Tabel 4.2

*Upper Bound* dan *Lower Bound* untuk Variabel Desain dari Studi Kasus Penelitian ( $H=10\text{ m}$ )

| Parameter        | <i>Lower Bounds</i> | <i>Upper Bounds</i> |
|------------------|---------------------|---------------------|
| $X_1\text{ (m)}$ | 4                   | 7                   |

|                             |                        |                   |
|-----------------------------|------------------------|-------------------|
| $X_2$ (m)                   | 1.333                  | 2.333             |
| $X_3$ (m)                   | $\frac{H + 48X_4}{48}$ | 1                 |
| $X_4$ (m)                   | 0.3                    | 1                 |
| $X_5$ (m)                   | 0.833                  | 1                 |
| $X_6$ (m)                   | 0                      | $X_1 - X_7$       |
| $X_7$ (m)                   | 0                      | 0.5               |
| $X_8$ (m)                   | 0                      | 0.5               |
| $X_9$ (m)                   | 0.2                    | 0.2               |
| $X_{10}$ (m)                | 3                      | 100               |
| $R_1$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_2$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_3$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_4$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_5$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_6$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_7$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_8$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_9$ (mm <sup>2</sup> )    | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |
| $R_{10}$ (mm <sup>2</sup> ) | 235.62 (3D10)          | 28,148.67 (35D32) |

*Objective function* merupakan suatu rumusan fungsi yang digunakan untuk menggambarkan suatu nilai yang merupakan tujuan dalam suatu proses optimasi. *Objective function* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Persamaan 4.1.

$$f(X) = V_c C_c + W_s C_s \quad (4.1)$$

di mana:

$C_c$  = Harga Beton (Rp/m<sup>3</sup>)

$V_c$  = Volume Beton (m<sup>3</sup>)

$C_s$  = Harga Tulangan (Rp/kg)

$W_s$  = Berat Tulangan (kg)

Dalam penelitian ini, perhitungan *objective function* tidak memperhatikan biaya tenaga kerja dan hanya berfokus pada biaya material. Analisa harga yang digunakan dalam penelitian

ini dapat dilihat pada Tabel 4.3. Harga ini diambil berdasarkan wawancara dengan praktisi lapangan di tempat magang penulis yang berlokasi di Kota Surabaya, Jawa Timur, Indonesia.

Tabel 4.3  
Harga Material

| Jenis Pekerjaan                      | Uraian | Jumlah Harga |
|--------------------------------------|--------|--------------|
| Pekerjaan Beton (Rp/m <sup>3</sup> ) | Bahan  | 1,300,000.00 |
| Pekerjaan Pembesian (Rp/kg)          | Bahan  | 18,000.00    |

#### 4.3. Hasil Penelitian

##### 4.3.1. Hasil Optimasi Algoritma PSO dan SOS

Tabel 4.4 menunjukkan 30 hasil *run* algoritma SOS dan PSO. Nilai yang ditampilkan merupakan biaya akhir hasil optimasi algoritma.

Tabel 4.4  
Hasil Optimasi 30 kali run Struktur *Counterfort Retaining Wall* dengan *Shear Key*

| <i>Run</i> | PSO<br>(Rp /m <sup>1</sup> ) | SOS<br>(Rp /m <sup>1</sup> ) |
|------------|------------------------------|------------------------------|
| 1          | 27,152,172.40                | 24,493,717.15                |
| 2          | 25,899,258.41                | 24,081,071.57                |
| 3          | 27,018,897.82                | 25,588,525.89                |
| 4          | 27,024,280.21                | 24,518,293.19                |
| 5          | 27,146,639.64                | 24,286,310.12                |
| 6          | 24,957,369.63                | 24,128,706.66                |
| 7          | 26,512,690.95                | 23,956,617.73                |
| 8          | 29,531,946.05                | 24,411,200.89                |
| 9          | 28,345,334.89                | 24,027,369.90                |
| 10         | 25,758,827.90                | 25,831,324.00                |
| 11         | 26,965,093.47                | 24,041,580.61                |
| 12         | 28,237,733.63                | 24,584,674.56                |
| 13         | 27,014,801.53                | 24,367,283.50                |
| 14         | 25,759,909.07                | 24,511,705.24                |
| 15         | 26,013,555.51                | 23,989,721.47                |
| 16         | 28,490,292.74                | 25,092,594.16                |

|                   |               |               |
|-------------------|---------------|---------------|
| 17                | 28,692,340.74 | 24,024,037.58 |
| 18                | 24,944,093.61 | 23,976,050.52 |
| 19                | 25,608,117.78 | 24,476,575.95 |
| 20                | 25,003,736.86 | 24,092,407.72 |
| 21                | 27,001,225.47 | 24,399,714.45 |
| 22                | 35,912,845.30 | 23,961,809.03 |
| 23                | 24,525,850.19 | 24,498,546.95 |
| 24                | 25,625,848.09 | 24,419,051.66 |
| 25                | 26,984,391.94 | 25,623,791.20 |
| 26                | 27,145,113.44 | 23,957,741.65 |
| 27                | 24,553,452.08 | 24,637,163.70 |
| 28                | 25,797,384.92 | 24,545,237.24 |
| 29                | 25,468,168.66 | 24,028,498.13 |
| 30                | 27,864,984.35 | 24,531,803.72 |
| Terbaik           | 24,525,850.19 | 23,956,617.73 |
| Terburuk          | 35,912,845.30 | 25,831,324.00 |
| Median            | 26,974,742.70 | 24,405,457.67 |
| Rata-Rata         | 26,898,545.24 | 24,436,104.20 |
| Std. Deviasi      | 2,136,661.22  | 503,180.24    |
| Koef. Variasi (%) | 7.94%         | 2.06%         |

Tabel 4.5 menunjukkan perbandingan hasil optimasi yang diperoleh dari algoritma PSO dan SOS untuk memperoleh hasil struktur *counterfort retaining wall* dengan *shear key* yang paling optimal.

Tabel 4.5

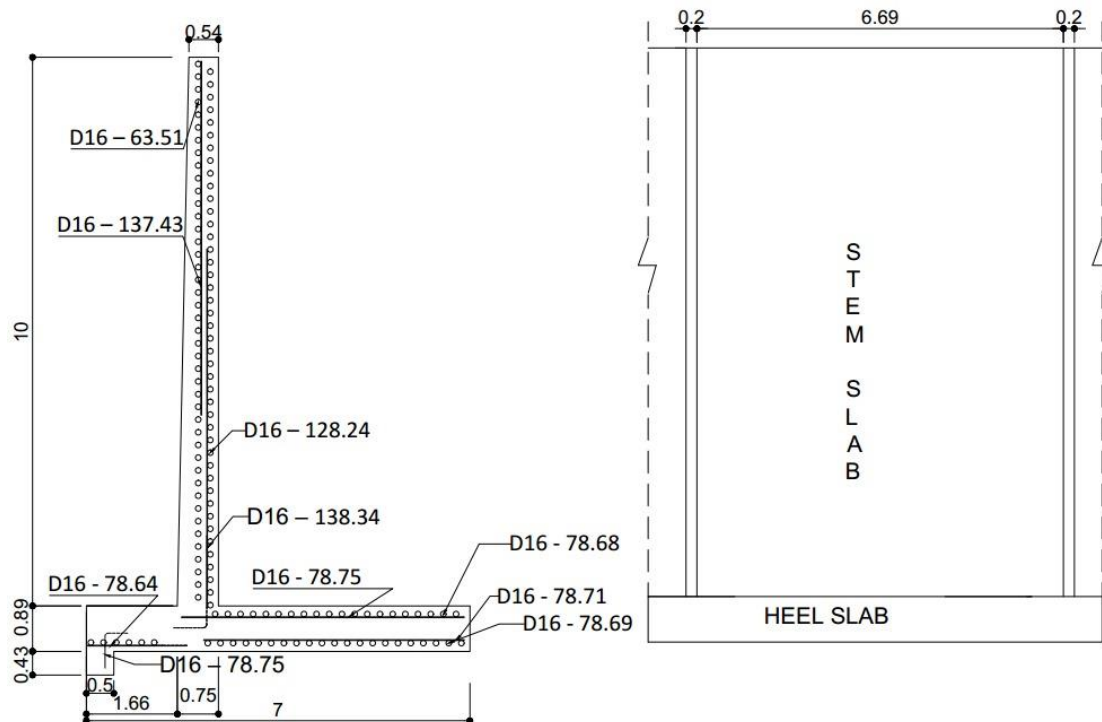
Hasil Optimasi Struktur *Counterfort Retaining Wall* dengan *Shear Key*

| Variabel | Keterangan                                 | PSO<br>(Terbaik) | SOS<br>(Terbaik) |
|----------|--------------------------------------------|------------------|------------------|
| X1       | total lebar <i>base</i> [m]                | 7.00             | 6.82             |
| X2       | projeksi <i>toe</i> [m]                    | 1.66             | 1.67             |
| X3       | ketebalan <i>stem</i> di <i>bottom</i> [m] | 0.75             | 0.68             |
| X4       | ketebalan <i>stem</i> di <i>top</i> [m]    | 0.54             | 0.47             |
| X5       | ketebalan <i>base slab</i> [m]             | 0.89             | 0.91             |

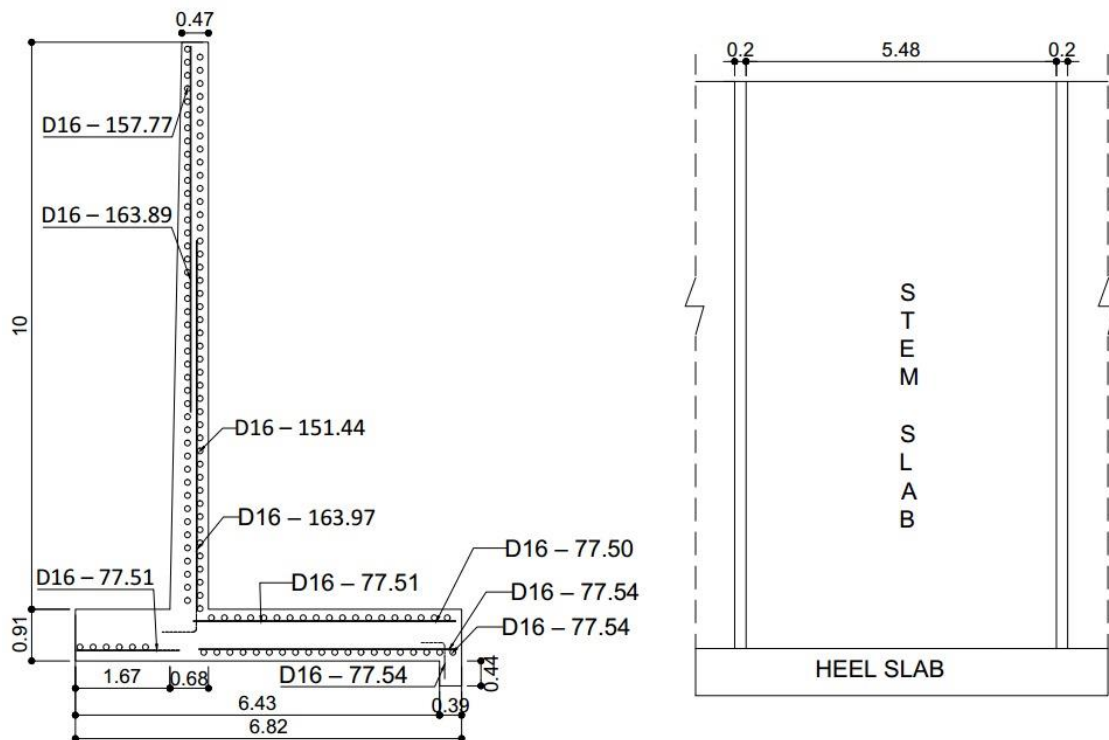
|     |                                                                                                    |                           |                           |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| X6  | jarak dari bagian depan <i>toe slab</i> ke bagian depan <i>shear key</i> [m]                       | 0.00                      | 6.43                      |
| X7  | lebar <i>base shear key</i> [m]                                                                    | 0.50                      | 0.39                      |
| X8  | ketinggian <i>base shear key</i> [m]                                                               | 0.43                      | 0.44                      |
| X9  | ketebalan <i>counterfort</i> [m]                                                                   | 0.20                      | 0.20                      |
| X10 | Jarak antar <i>counterfort</i> [m]                                                                 | 6.69                      | 5.48                      |
| R1  | luas dari tulangan horizontal <i>toe</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]               | 2556.86<br>(D16 – 78.64)  | 2593.98<br>(D16 – 77.51)  |
| R2  | luas dari tulangan horizontal lapangan <i>stem</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]     | 3166.03<br>(D16 – 63.51)  | 1274.41<br>(D16 – 157.77) |
| R3  | luas dari tulangan horizontal tumpuan <i>stem</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]      | 1567.90<br>(D16 – 128.24) | 1327.63<br>(D16 – 151.44) |
| R4  | luas dari tulangan vertikal lapangan <i>stem</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]       | 1462.98<br>(D16 – 137.43) | 1226.81<br>(D16 – 163.89) |
| R5  | luas dari tulangan vertikal tumpuan <i>stem</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]        | 1453.42<br>(D16 – 138.34) | 1226.21<br>(D16 – 163.97) |
| R6  | luas dari tulangan horizontal lapangan <i>heel</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]     | 2555.04<br>(D16 – 78.69)  | 2593.09<br>(D16 – 77.54)  |
| R7  | luas dari tulangan horizontal tumpuan <i>heel slab</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ] | 2555.35<br>(D16 – 78.68)  | 2594.46<br>(D16 – 77.50)  |
| R8  | luas dari tulangan vertikal lapangan <i>heel slab</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]  | 2554.35<br>(D16 – 78.71)  | 2593.09<br>(D16 – 77.54)  |
| R9  | luas dari tulangan vertikal tumpuan <i>heel slab</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]   | 2553.08<br>(D16 – 78.75)  | 2594.00<br>(D16 – 77.51)  |
| R10 | luas dari tulangan <i>shear key</i> per unit panjang dinding [mm <sup>2</sup> ]                    | 2553.01<br>(D16 – 78.75)  | 2593.09<br>(D16 – 77.54)  |

Berdasarkan tabel yang menunjukkan perbandingan proses olah data dari kedua algoritma, yaitu PSO dan SOS, dapat dilihat bahwa algoritma SOS menghasilkan biaya struktur yang lebih rendah sebesar Rp 23,956,617.73/m<sup>1</sup> dibandingkan PSO sebesar Rp

24,525,850.19/m<sup>1</sup>. Dari rata-rata 30 kali percobaan, diperoleh bahwa SOS memiliki hasil rata-rata yang lebih baik sebesar Rp 24,436,104.20/m<sup>1</sup> dibandingkan PSO sebesar Rp 26,898,545.24/m<sup>1</sup>. Algoritma SOS juga dapat dikatakan memiliki performa yang lebih baik dalam proses optimasi struktur *counterfort retaining wall* dengan *shear key* ini dilihat dari koefisien variasi sebesar 2.06% yang artinya secara keseluruhan proses olah data memberikan hasil yang paling optimal di setiap iterasinya. Sedangkan, koefisien variasi untuk algoritma PSO adalah sebesar 7.94% dengan hasil terburuk selama iterasi sebesar Rp 35,912,845.30/m<sup>1</sup>. Hasil optimasi desain struktur yang paling optimal dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



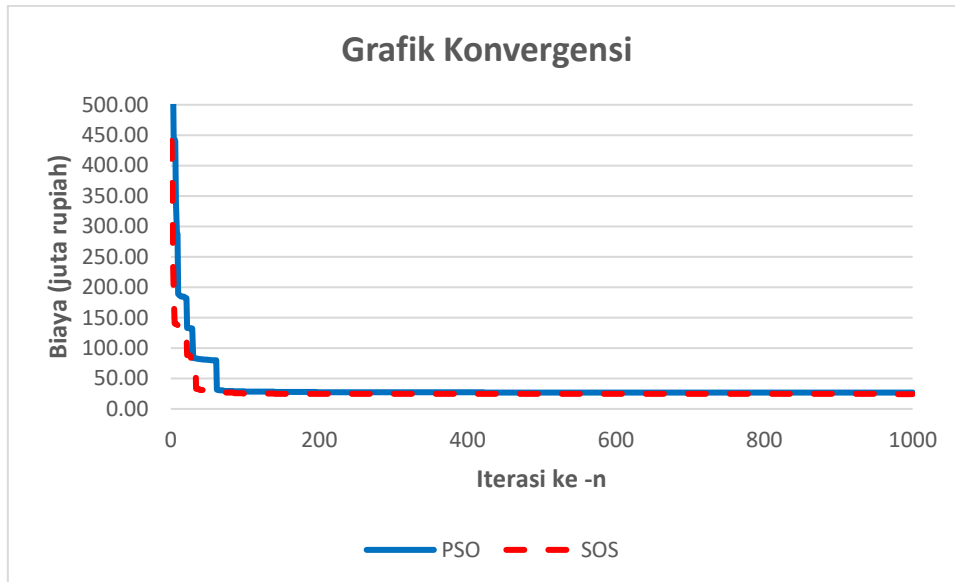
Gambar 4.2 Gambar Struktur *Retaining Wall* berdasarkan Variabel Input dari Biaya Terbaik Algoritma PSO



Gambar 4.3 Gambar Struktur *Retaining Wall* berdasarkan Variabel Input untuk Biaya Terbaik Algoritma SOS

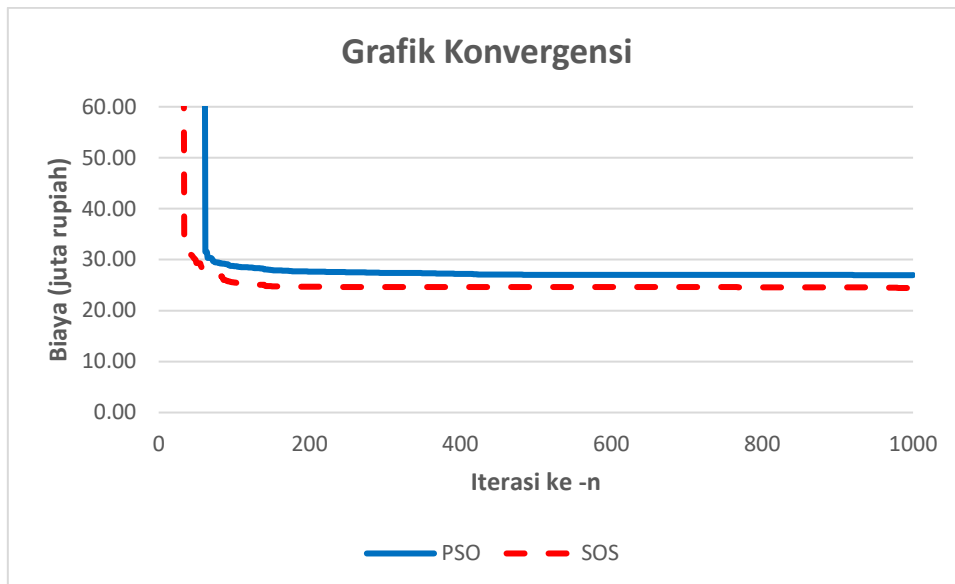
#### 4.3.2. Grafik Konvergensi

Grafik konvergensi digunakan untuk menggambarkan pergerakan dari masing-masing algoritma dalam menemukan hasil yang optimal. Gambar 4.4 menunjukkan grafik konvergensi dari hasil run median tiap algoritma pada optimasi struktur *counterfort retaining wall* dengan *shear key* dengan menggunakan input parameter sesuai dengan Tabel 4.1 dengan batasan sesuai SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik dan SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dengan algoritma PSO dan SOS.



Gambar 4.4 Grafik Konvergensi Hasil *Run* Median pada Kasus *Counterfort Retaining Wall* dengan *Shear Key*

Grafik konvergensi pada gambar Gambar 4.4 menggunakan *run* median karena median berada di antara performa paling baik dan paling buruk, sehingga representatif dalam menunjukkan performa kedua algoritma. Dapat dilihat pada grafik konvergensi menggunakan dua algoritma optimasi, algoritma SOS mampu menemukan biaya struktur lebih rendah pada iterasi yang pertama, yaitu sebesar Rp 440,624,486.45/m<sup>1</sup> dimana terdapat 4 *constraint* yang dilanggar sehingga menerima penalti sebesar  $4 \times \text{Rp } 100,000,000.00 = \text{Rp } 400,000,000.00$ . Sementara hasil biaya algoritma PSO menghasilkan biaya cukup tinggi sebesar Rp 690,388,590.94/m<sup>1</sup> dimana terdapat 6 *constraint* yang dilanggar sehingga menerima penalti sebesar  $6 \times \text{Rp } 100,000,000.00 = \text{Rp } 600,000,000.00$ . Algoritma SOS sudah terbebas dari penalti pada iterasi ke-22 dengan biaya struktur Rp 88,351,070.70/m<sup>1</sup>. Pada iterasi ke-30 algoritma PSO terbebas dari penalti dengan biaya struktur sebesar Rp 83,577,113.12/m<sup>1</sup>.



Gambar 4.5 Grafik yang menunjukkan Proses Konvergensi Algoritma PSO dan SOS sampai mendapat Biaya yang Paling Optimum

Berdasarkan Gambar 4.5 dapat terlihat proses konvergensi kedua algoritma. Algoritma SOS terus mengalami penurunan sampai iterasi ke-297 yaitu sebesar Rp 24,621,932.96/m<sup>1</sup> dan selanjutnya mendekati konstan sampai mampu menghasilkan biaya paling optimal sebesar Rp 23,956,617.73/m<sup>1</sup>. Algoritma PSO masih mengalami penurunan sampai iterasi ke-701 yaitu sebesar Rp 27,004,718.60/m<sup>1</sup> dan selanjutnya hasil mulai memberikan hasil yang konstan mendekati hasil optimal. Algoritma PSO belum mampu menemukan hasil yang paling optimal pada iterasi tersebut, yaitu sebesar Rp 24,525,850.19/m<sup>1</sup> sehingga mengindikasikan terjadinya fenomena konvergensi prematur, di mana populasi dari algoritma PSO menyatu di satu titik sehingga tidak dapat diperoleh titik lain yang memberikan hasil lebih baik (M. Y. Cheng et al., 2014).

Dari grafik konvergensi dapat dilihat bahwa algoritma SOS lebih cepat memberikan hasil yang konvergen. Algoritma SOS ini mampu memberikan hasil desain yang paling optimal pada akhir iterasi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.5. sebelumnya. Algoritma PSO belum mampu memberikan hasil optimal di akhir iterasinya. Sehingga, performa algoritma SOS dapat dikatakan lebih baik dalam penelitian ini untuk menemukan hasil desain struktur *counterfort retaining wall* dengan *shear key* yang optimal.

#### 4.3.3. Analisis Kebutuhan Tulangan secara Manual

Algoritma SOS telah berhasil memberikan biaya yang lebih optimal dibandingkan algoritma PSO. Dalam studi kasus ini, hasil optimasi kebutuhan tulangan dari algoritma SOS akan

dibandingkan dengan perhitungan kebutuhan tulangan secara manual berdasarkan dimensi geometris dinding hasil optimasi algoritma SOS dengan bantuan Ms. Excel. Perhitungan secara manual ini mengacu pada rumus 2.2.2.1 Tulangan Minimum dan rumus 2.2.2.2 Tulangan Maksimum pada Bab 2. Analisis kebutuhan luasan tulangan secara manual ini berbeda dengan metode metaheuristik yang bekerja dengan melakukan iterasi berulang kali sampai didapatkan hasil yang tidak melanggar *constraint* dan seoptimal mungkin. Proses perhitungan analisis manual dapat dilihat pada Lampiran 2.

Tabel 4.6

Perbandingan Hasil Luasan Tulangan Algoritma SOS dan Kebutuhan Luasan Tulangan berdasarkan Analisis Manual

| Variabel              | Keterangan                                                                      | SOS                       | Analisis Manual           | Error (%) |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|
| R1 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan horizontal <i>toe</i> per unit panjang dinding               | 2593.98<br>(D16 – 77.51)  | 2593.09<br>(D16 – 77.51)  | 0.03%     |
| R2 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan horizontal lapangan <i>stem</i> per unit panjang dinding     | 1274.41<br>(D16 – 157.77) | 1274.40<br>(D16 – 157.77) | 0.00%     |
| R3 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan horizontal tumpuan <i>stem</i> per unit panjang dinding      | 1327.63<br>(D16 – 151.44) | 1327.63<br>(D16 – 151.44) | 0.00%     |
| R4 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan vertikal lapangan <i>stem</i> per unit panjang dinding       | 1226.81<br>(D16 – 163.89) | 1226.20<br>(D16 – 163.89) | 0.05%     |
| R5 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan vertikal tumpuan <i>stem</i> per unit panjang dinding        | 1226.21<br>(D16 – 163.97) | 1226.20<br>(D16 – 163.97) | 0.00%     |
| R6 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan horizontal lapangan <i>heel</i> per unit panjang dinding     | 2593.09<br>(D16 – 77.54)  | 2593.09<br>(D16 – 77.54)  | 0.00%     |
| R7 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan horizontal tumpuan <i>heel slab</i> per unit panjang dinding | 2594.46<br>(D16 – 77.50)  | 2593.09<br>(D16 – 77.50)  | 0.05%     |

|                        |                                                                                |                          |                          |       |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| R8 (mm <sup>2</sup> )  | luas dari tulangan vertikal lapangan <i>heel slab</i> per unit panjang dinding | 2593.09<br>(D16 – 77.54) | 2593.09<br>(D16 – 77.54) | 0.00% |
| R9 (mm <sup>2</sup> )  | luas dari tulangan vertikal tumpuan <i>heel slab</i> per unit panjang dinding  | 2594.00<br>(D16 – 77.51) | 2593.09<br>(D16 – 77.51) | 0.04% |
| R10 (mm <sup>2</sup> ) | luas dari tulangan <i>shear key</i> per unit panjang dinding                   | 2593.09<br>(D16 – 77.54) | 2593.09<br>(D16 – 77.54) | 0.00% |

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa nilai kebutuhan luasan tulangan dari analisis manual bernilai sama dengan variabel hasil optimasi algoritma SOS dengan *error* 0.00%. Hasil analisis manual ini memverifikasi kebenaran hasil program optimasi algoritma SOS yang terbukti sudah memberikan nilai luasan tulangan seekonomis mungkin. Analisis secara manual ini masih belum dapat memberikan hasil yang paling optimal secara langsung dan perlu menggunakan metode *Trial and Error* sehingga waktu yang diperlukan juga tidak pasti.