

4. HASIL DAN DISKUSI

4.1. Proses Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua studi kasus, berupa bangunan 5 bentang dengan 4 lantai sebagai kasus pertama dan 4 bentang dengan 12 lantai sebagai kasus kedua. Optimasi dilakukan dengan tujuan mendapatkan biaya total struktur beton yang paling ekonomis untuk kedua studi kasus. Struktur pada kasus pertama merupakan portal sederhana yang bertujuan menunjukkan hasil optimasi secara umum. Berbeda dengan struktur kasus kedua yang bersifat lebih *slender*, dengan harapan hasil optimasi struktur beton akibat gempa dapat diperlihatkan pada kasus kedua tersebut. Semua jenis beton yang dioptimasi memiliki berat jenis 24 kN/m^3 . Mutu tulangan beton menggunakan baja dengan tegangan leleh (f_y) 420 Mpa, dan berat jenis 7850 kg/m^3 . Untuk mendapatkan hasil optimasi yang dapat diterapkan pada pelaksanaan (*applicable*), penelitian ini mengembangkan beberapa pertimbangan atau asumsi yang dilakukan pada penelitian sebelumnya. Selain menerima beban dari beban hidup dan beban mati, struktur juga menerima beban berat sendiri setiap elemen yang didapatkan dari algoritma secara random. Hal ini menyebabkan perubahan pada elemen akibat proses optimasi juga berdampak pada pembebanan secara keseluruhan. Selain penambahan berat sendiri, struktur pada penelitian ini juga menerima dampak akibat beban gempa dan menganalisa kestabilan struktur terhadap gempa. Metode analisis struktur menggunakan *Direct Stiffness Method* (DSM). Kapasitas *joint* pada struktur penelitian ini juga diperhitungkan sebagai *constraint* tambahan. Harga satuan beton menggunakan harga satuan *ready mix* beton di Indonesia. Harga besi beton juga menggunakan harga satuan di Indonesia. Kedua studi kasus pada penelitian ini akan menggunakan harga satuan yang sama.

Objective function pada penelitian ini adalah untuk menghasilkan biaya total struktur beton yang memenuhi kebutuhan kapasitas struktur serta tahan terhadap gempa yang paling ekonomis. *Constraint* diberikan pada *objective function* untuk mencegah elemen struktur yang tidak memenuhi syarat menjadi kandidat solusi optimal. *Constraint* yang digunakan pada penelitian ini diambil berdasarkan SNI 2847-2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung. Pada penelitian ini kedua kasus yang dioptimasi terhadap 6 variabel mutu beton yaitu K-300, K-350, K-400, K-450, K-500, K-

600. 6 macam optimasi ini dilakukan karena ada kemungkinan terjadi *trade off* antara mutu beton dengan jumlah tulangan pada kasus tertentu dimana harga beton dan harga baja tulangan berbeda dengan penelitian ini. Harga beton ready mix per m^3 didapatkan dari *website supplier ready mix* di Indonesia pada bulan Oktober 2023. Harga satuan tulangan beton dengan mutu 420 MPa didapatkan dari *website supplier* tulangan besi beton di Indonesia. Perbandingan harga tiap mutu beton *ready mix* dapat dilihat pada Tabel 4.1. Harga tulangan baja per kilogram dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Pada setiap kasus, diasumsi bahwa portal yang diambil adalah portal tengah sehingga *beam-column joint* terdapat 3 hingga 4 balok induk yang merangka pada kolom bersangkutan. Dengan demikian kapasitas geser pada *beam-column joint* akan meningkat sebesar 20% - 70% karena banyaknya balok yang merangka. Untuk setiap kolom eksterior, diasumsi akan ada 3 balok yang merangka sehingga kapasitas geser akan meningkat sebesar 20%. Sedangkan pada setiap kolom interior, diasumsi akan ada 4 balok yang merangka sehingga kapasitas geser akan meningkat sebesar 70%.

Tabel 4.1. Harga beton *ready mix* per m^3

Mutu Beton	Harga beton per m^3
K - 300	Rp 940,000
K - 350	Rp 980,000
K - 400	Rp 1,050,000
K - 450	Rp 1,150,000
K - 500	Rp 1,300,000
K -600	Rp 1,600,000

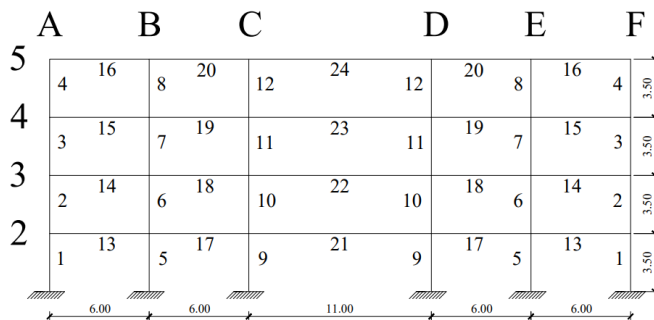
Tabel 4.2. Harga tulangan beton per kg

Mutu Baja (F_y)	Harga Tulangan Beton per kg
420 MPa	Rp 9,500

4.2. Studi Kasus 1: Desain Portal 5 Bentang dan 4 Lantai

Pada optimasi studi kasus 1 berupa portal 5 bentang dan 4 lantai, optimasi dilakukan dengan algoritma *Symbiotic Organisms Search* (SOS) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Optimasi dilakukan masing-masing sebanyak 10 percobaan, kemudian diambil hasil dengan

biaya yang paling minimum dari seluruh sampel setiap algoritma. Percobaan dilakukan berulang kali untuk memastikan hasil yang diberikan oleh algoritma cukup konsisten. Untuk menghindari jumlah variabel yang terlalu banyak, dilakukan *grouping* terhadap elemen yang memiliki bentang dan posisi elemen yang sama pada struktur bangunan. Khusus pada *case 1*, setiap beban yang terjadi dikalikan dengan koefisien 2x. hal ini dilakukan untuk benar-benar membandingkan hasil antara struktur 12 lantai dengan beban normal dan struktur 4 lantai dengan beban 2x lipat beban normal.



Gambar 4.1. Pengelompokan elemen untuk studi kasus 1

Studi kasus 1 memiliki 128 variabel dengan 24 elemen kolom dan 20 elemen balok. Penamaan tiap variabel dapat dilihat pada Tabel 4.3. Dalam menentukan *lower bound* dan *upper bound* algoritma, dibutuhkan *engineering judgement* dari perencana untuk mendapatkan hasil optimasi yang lebih cepat. Sebagai contoh, *engineering judgement* dilakukan terhadap *range* dimensi elemen yang di *random* oleh algoritma. Kedua algoritma dijalankan dengan spesifikasi *CPU* komputer *Ryzen 5 5600h* dengan *clock speed* sampai 3.30 GHz dan *RAM* 16 GB.

Tabel 4.3. Penamaan variabel yang di optimasi pada studi kasus 1

Variabel	Keterangan
X ₁ - X ₄	f_c' Kolom
X ₅ - X ₈	f_c' Balok
X ₉ - X ₂₀	Dimensi Kolom (h kolom = b Kolom)
X ₂₁ - X ₃₂	B balok
X ₃₃ - X ₄₄	H balok
X ₄₅ - X ₅₆	Diameter Tulangan Kolom
X ₅₇ - X ₆₈	Diameter Tulangan Balok
X ₆₉ - X ₈₀	Diameter Sengkang Kolom

Tabel 4.3. Penamaan variabel yang di optimasi pada studi kasus 1 (lanjutan)

Variabel	Keterangan
$X_{81} - X_{92}$	Diameter Senggang Balok
$X_{93} - X_{104}$	Jumlah Senggang Kolom
$X_{105} - X_{116}$	Jumlah Senggang Balok
$X_{117} - X_{128}$	Jumlah Tulangan Longitudinal Kolom

Berdasarkan Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 dapat disimpulkan bahwa kedua algoritma mampu mendapatkan biaya optimal yang tidak melanggar constraint, dimana algoritma SOS mendapatkan hasil yang lebih jauh optimal dibandingkan algoritma PSO. Namun, algoritma PSO tidak mampu mendapatkan biaya yang konsisten, dimana hanya 3 dari 10 sampel yang viable atau tidak melanggar constraint. Didapatkan hanya 30% data PSO yang tidak melanggar constraint. Terbukti dari rentang biaya tiap sampel algoritma PSO yang memiliki perbedaan yang sangat jauh, menunjukan bahwa masing-masing sampel melanggar lebih dari satu constraint.

Tabel 4.4. Perbandingan volume tulangan dan beton elemen kolom dan volume tulangan dan beton elemen balok pada studi kasus 1

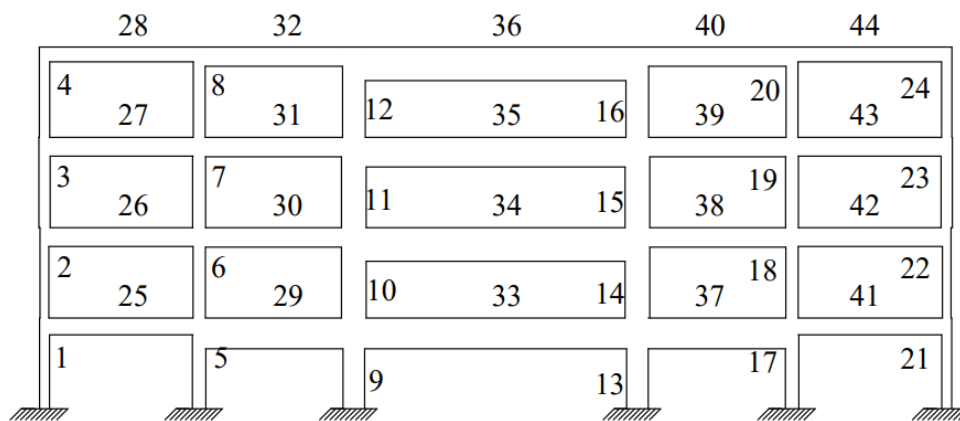
	SOS Optimal	PSO Optimal
Elemen Kolom		
Volume Tulangan Kolom (m^3)	0.8335	0.9250
Volume Beton Kolom $f_c' = 24.43$ MPa (m^3)	-	38.08
Volume Beton Kolom $f_c' = 28.5$ MPa (m^3)	-	12.04
Volume Beton Kolom $f_c' = 32.57$ MPa (m^3)	15.865	-
Volume Beton Kolom $f_c' = 36.64$ MPa (m^3)	18.43	-
Volume Beton Kolom $f_c' = 40.71$ MPa (m^3)	-	-
Volume Beton Kolom $f_c' = 48.85$ MPa (m^3)	-	-
Elemen Balok		
Volume Tulangan Balok (m^3)	0.99721	1.1718
Volume Beton Balok $f_c' = 24.43$ MPa (m^3)	-	14.66
Volume Beton Balok $f_c' = 28.5$ MPa (m^3)	28.973	-
Volume Beton Balok $f_c' = 32.57$ MPa (m^3)	13.367	41.988
Volume Beton Balok $f_c' = 36.64$ MPa (m^3)	-	-
Volume Beton Balok $f_c' = 40.71$ MPa (m^3)	12.423	-

Tabel 4.4. Perbandingan volume tulangan dan beton elemen kolom dan volume tulangan dan beton elemen balok pada studi kasus 1 (lanjutan)

	SOS Optimal	PSO Optimal
Volume Beton Balok $f_c' = 48.85 \text{ MPa}$ (m^3)	-	-
Harga Total (dalam jutaan rupiah)	Rp 232,953,064	Rp 254,977,154

Tabel 4.5. Hasil percobaan optimasi pada studi kasus 1

Variabel	SOS	PSO
Mean (Rp)	Rp 240,097,213	Rp 259,656,766
Standar Deviasi (Rp)	Rp 8,417,165	-
Max (Rp)	Rp 261,613,339	Rp 265,920,083
Min (Rp)	Rp 232,953,064	Rp 254,977,154
Success Rate	10/10	3/10



Gambar 4.2. Pemetaan dan penamaan elemen struktur studi kasus 1 menggunakan SOS

Tabel 4.6. Hasil optimasi SOS elemen struktur kolom studi kasus 1

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
1	380	3.5	32.57	8D22	3D13-80	3D13-120
2	340	3.5	36.64	16D22	3D13-80	3D13-120
3	440	3.5	36.64	12D25	4D13-80	4D13-140

Tabel 4.6. Hasil optimasi SOS elemen struktur kolom studi kasus 1 (lanjutan)

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
4	400	3.5	32.57	16D22	3D13-100	3D13-120
5	520	3.5	32.57	20D22	4D10-80	4D10-120
6	480	3.5	36.64	8D22	3D13-80	3D13-120
7	500	3.5	36.64	8D22	3D13-80	3D13-120
8	460	3.5	32.57	8D22	3D16-100	3D16-120
9	840	3.5	32.57	16D25	5D16-100	5D16-140
10	960	3.5	36.64	12D32	4D16-120	4D16-180
11	960	3.5	36.64	28D22	5D16-120	5D16-120
12	880	3.5	32.57	16D25	5D16-100	5D16-140
13	840	3.5	32.57	16D25	5D16-100	5D16-140
14	960	3.5	36.64	12D32	4D16-120	4D16-180
15	960	3.5	36.64	28D22	5D16-120	5D16-120
16	880	3.5	32.57	16D25	5D16-100	5D16-140
17	520	3.5	32.57	20D22	4D10-80	4D10-120
18	480	3.5	36.64	8D22	3D13-80	3D13-120
19	500	3.5	36.64	8D22	3D13-80	3D13-120
20	460	3.5	32.57	8D22	3D16-100	3D16-120
21	380	3.5	32.57	8D22	3D13-80	3D13-120
22	340	3.5	36.64	16D22	3D13-80	3D13-120
23	440	3.5	36.64	12D25	3D13-80	3D13-140
24	400	3.5	32.57	16D22	3D13-100	3D13-120

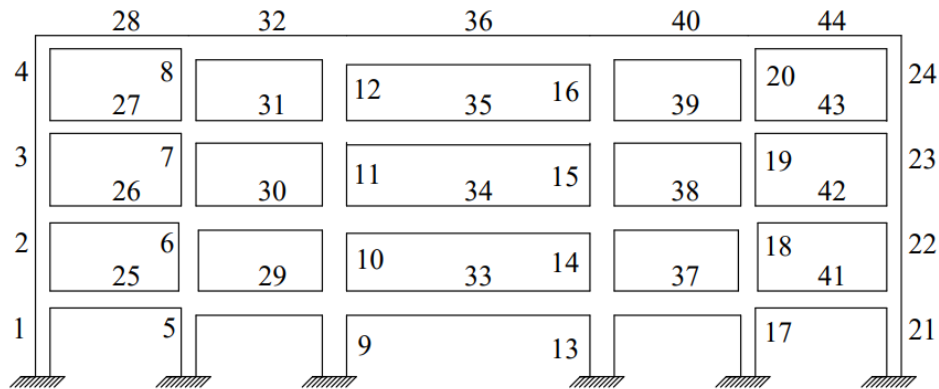
Tabel 4.7. Hasil optimasi SOS elemen struktur balok studi kasus 1

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Senggang Lapangan	Senggang Tumpuan
25	275	650	6	28.5	4D19	2D19	3D19	5D19	2D19	2D19	4D8-180	4D8-120
26	275	725	6	32.57	4D19	2D19	2D19	4D19	3D19	2D19	3D10-280	3D10-140
27	275	725	6	28.5	5D19	3D19	2D19	4D19	3D19	2D19	3D10-240	3D10-140
28	275	575	6	40.71	3D22	2D22	2D22	4D22	2D22	2D22	3D10-180	3D10-80
29	500	1175	6	28.5	4D25	2D25	3D25	4D25	9D25	5D25	4D10-420	4D10-200
30	425	750	6	32.57	5D22	3D22	5D22	10D22	20D22	10D22	3D13-180	3D13-140
31	475	750	6	28.5	5D22	3D22	5D22	10D22	20D22	10D22	2D19-260	2D19-140
32	375	750	6	40.71	5D22	3D22	5D22	10D22	18D22	9D22	3D13-180	3D13-100
33	525	1175	11	28.5	9D25	5D25	3D25	5D25	9D25	5D25	6D10-240	6D10-140
34	500	1300	11	32.57	16D19	8D19	4D19	8D19	16D19	8D19	6D8-220	6D8-80
35	500	1150	11	28.5	9D25	5D25	3D25	5D25	9D25	5D25	4D16-420	4D16-200
36	500	1300	11	40.71	6D25	3D25	3D25	5D25	6D25	3D25	2D13-340	2D13-80
37	500	1175	6	28.5	9D25	5D25	3D25	4D25	4D25	2D25	4D10-240	4D10-100
38	425	750	6	32.57	20D22	10D22	5D22	10D22	5D22	3D22	3D13-180	3D13-100
39	475	750	6	28.5	20D22	10D22	5D22	10D22	5D22	3D22	2D19-280	2D19-140
40	375	750	6	40.71	18D22	9D22	5D22	9D22	5D22	3D22	3D13-200	3D13-100
41	275	650	6	28.5	2D19	2D19	3D19	5D19	4D19	2D19	4D8-180	4D8-80

Tabel 4.7. Hasil optimasi SOS elemen struktur balok studi kasus 1 (lanjutan)

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
42	275	725	6	32.57	3D19	2D19	2D19	4D19	4D19	2D19	3D10-280	3D10-100
43	275	725	6	28.5	3D19	2D19	2D19	4D19	5D19	3D19	3D10-240	3D10-100
44	275	575	6	40.71	2D22	2D22	2D22	4D22	3D22	2D22	3D10-180	3D10-80

Pemetaan nama elemen struktur serta hasil optimasi studi kasus 1 dapat dilihat pada Gambar 4.2 serta Tabel 4.6 untuk elemen struktur kolom algoritma SOS, Tabel 4.7 untuk elemen struktur balok algoritma SOS. Elemen struktur hasil algoritma PSO pada Gambar 4.3 serta Tabel 4.8 untuk elemen struktur kolom dan Tabel 4.9 untuk elemen struktur balok, memiliki dimensi struktur balok dan kolom yang relatif lebih besar dibandingkan algoritma SOS.



ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
15	1000	3.5	28.5	28D22	7D16/120	7D16/120
16	1000	3.5	24.43	32D22	6D10/100	6D10/120
17	600	3.5	24.43	16D22	5D10/120	5D10/120
18	800	3.5	24.43	20D22	5D10/100	5D10/120
19	600	3.5	28.5	16D22	5D10/100	5D10/120
20	600	3.5	24.43	12D32	4D10/80	4D10/180
21	600	3.5	24.43	16D22	3D10/80	3D10/120
22	600	3.5	24.43	16D22	3D10/80	3D10/120
23	600	3.5	28.5	16D22	5D10/100	5D10/120
24	600	3.5	24.43	16D22	5D10/120	5D10/120

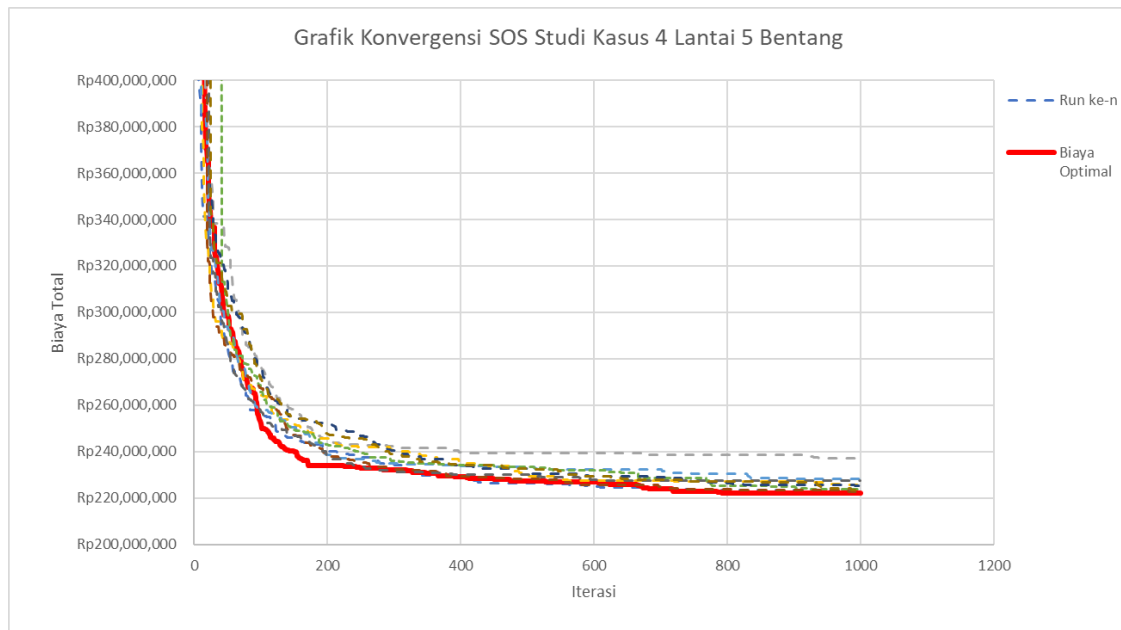
Tabel 4.9. Hasil optimasi PSO dengan *Initial Solution* elemen struktur balok studi kasus 1

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
25	325	700	6	32.57	5D22	3D22	2D22	3D22	2D22	2D22	5D8/240	5D8/160
26	325	700	6	32.57	5D22	3D22	2D22	3D22	2D22	2D22	5D8/240	5D8/160
27	400	525	6	24.43	7D22	4D22	3D22	5D22	2D22	2D22	4D10/160	4D10/100
28	400	550	6	32.57	5D22	3D22	2D22	4D22	2D22	2D22	3D13/240	3D13/120
29	500	1000	6	32.57	5D22	3D22	4D22	7D22	13D22	7D22	7D8/320	7D8/160
30	400	1000	6	32.57	4D22	2D22	4D22	7D22	14D22	7D22	6D8/220	6D8/100
31	400	925	6	24.43	3D25	2D25	3D25	6D25	12D25	6D25	5D13/400	5D13/200
32	400	1000	6	32.57	4D22	2D22	4D22	7D22	11D22	6D22	7D8/360	7D8/120
33	500	1000	11	32.57	13D22	7D22	4D22	7D22	13D22	7D22	5D13/220	5D13/140
34	500	1125	11	32.57	6D32	3D32	2D32	3D32	6D32	3D32	6D13/360	6D13/220
35	700	1000	11	24.43	7D32	4D32	2D32	4D32	7D32	4D32	7D8/120	7D8/80
36	500	1200	11	32.57	7D25	4D25	3D25	5D25	7D25	4D25	6D8/220	6D8/80
37	500	1000	6	32.57	13D22	7D22	4D22	7D22	5D22	3D22	7D8/160	7D8/80
38	400	1000	6	32.57	14D22	7D22	4D22	7D22	4D22	2D22	6D8/240	6D8/100
39	400	925	6	24.43	12D25	6D25	3D25	6D25	3D25	2D25	5D13/360	5D13/200
40	400	1000	6	32.57	11D22	6D22	4D22	7D22	4D22	2D22	7D8/360	7D8/120
41	325	700	6	32.57	2D22	2D22	2D22	3D22	5D22	3D22	5D8/240	5D8/80

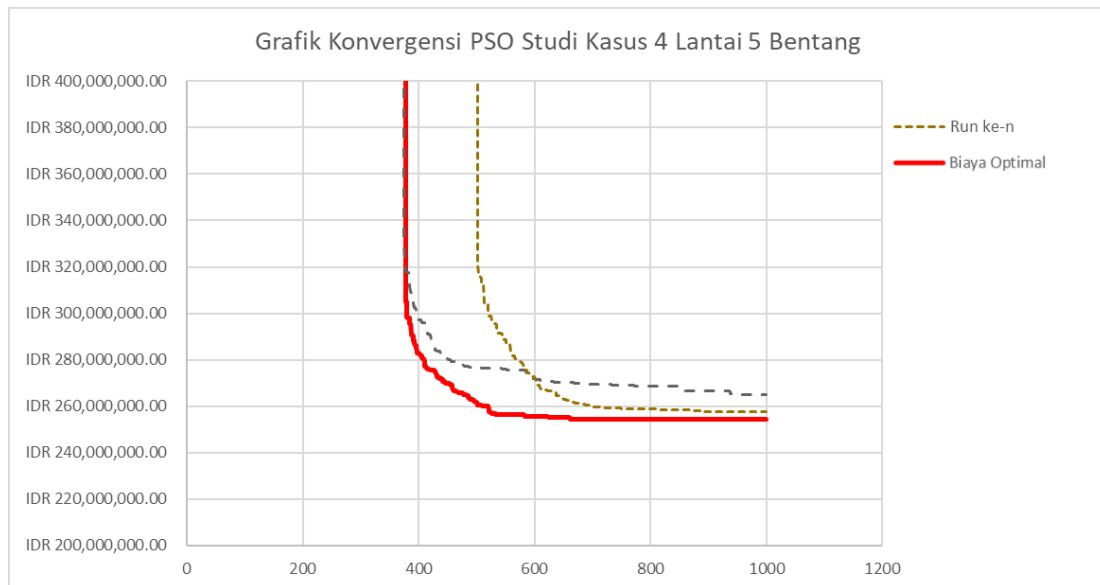
Tabel 4.9. Hasil optimasi PSO elemen struktur balok studi kasus 1 (lanjutan)

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
42	325	700	6	32.57	2D22	2D22	2D22	3D22	5D22	3D22	5D8/240	5D8/80
43	400	525	6	24.43	2D22	2D22	3D22	5D22	7D22	4D22	4D10/160	4D10/80
44	400	550	6	32.57	2D22	2D22	2D22	4D22	5D22	3D22	3D13/240	3D13/120

Gambar detail hasil optimasi studi kasus 1 menggunakan algoritma PSO dapat dilihat di Lampiran 1 dan Lampiran 5 untuk elemen balok dan elemen kolom. Serta gambar detail hasil optimasi menggunakan algoritma SOS dapat dilihat pada Lampiran 2 dan Lampiran 6 untuk elemen balok dan elemen kolom. Untuk penggambaran grafik konvergensi, setiap biaya yang tergambar adalah biaya yang tidak melanggar *constraint*. Hal ini dikarenakan biaya yang melanggar *constraint* adalah biaya imajiner yang digunakan untuk mempermudah algoritma sehingga tidak menuju ke titik dimana biayanya tinggi.



Gambar 4.4. Grafik konvergensi algoritma SOS pada studi kasus portal 5 bentang dan 4 lantai

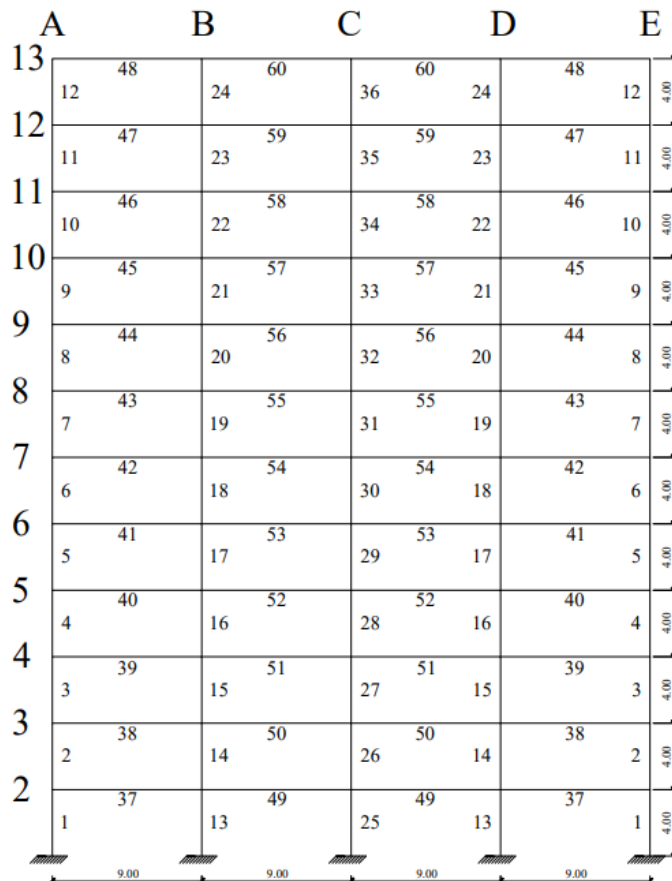


Gambar 4.5. Grafik konvergensi algoritma pada studi kasus portal 5 bentang dan 4 lantai

Setiap percobaan studi kasus 1, dilakukan dengan 1,200,000 *function evaluation* untuk metode SOS dan 300,000 *function evaluation* untuk metode PSO. Algoritma mampu mendapatkan hasil yang cukup optimal terbukti dari grafik konvergensi pada Gambar 4.4 dan 4.5. Berdasarkan grafik konvergensi, dapat dilihat bahwa algoritma SOS mampu mencapai hasil yang tidak melanggar constraint rata-rata pada iterasi ke-200 dengan biaya total struktur Rp 200,000,000 hingga Rp 260,000,000.

4.3. Studi Kasus 2: Desain Portal 4 Bentang dan 12 Lantai

Pada studi kasus 2, optimasi dilakukan terhadap portal 4 bentang dan 12 lantai. Algoritma yang digunakan sama seperti kasus 1 yaitu, SOS dan PSO. Hasil optimasi yang diambil adalah sampel dengan biaya paling murah masing-masing SOS dan PSO dalam 10 percobaan. Studi kasus 2 juga menerapkan sistem *grouping* untuk menghindari variabel yang terlalu banyak. Dalam studi kasus 2, proses inisialisasi kedua algoritma tidak dilakukan secara murni acak, namun diberikan satu *initial solution*. *Initial solution* pada kasus ini dilakukan dengan meletakkan 1 *agent* pada tempat yang tidak melanggar *constraint* sama sekali sehingga diharapkan *agent* lain akan bergerak menuju ke tempat yang tidak melanggar *constraint* pada 1 *agent* itu.



Gambar 4.6. Pengelompokan elemen untuk studi kasus 2

Studi kasus kedua memiliki 324 variabel dengan 60 elemen kolom dan 48 elemen balok. Penamaan tiap variabel dapat dilihat pada Tabel 4.10. Sama seperti studi kasus 1, dibutuhkan *engineering judgement* untuk menentukan *range lower bound* dan *upper bound* algoritma untuk mendapatkan hasil optimasi yang lebih cepat. Namun karena studi kasus 2 memiliki variabel yang banyak, kedua algoritma perlu dimodifikasi. Sebelum dilakukan optimasi, perencana terlebih dahulu memberikan variabel-variabel yang tidak melanggar seluruh *constraint*, sehingga algoritma dapat dengan cepat menemukan hasil yang terbaik. Kedua algoritma dijalankan dengan spesifikasi CPU komputer *Ryzen 5 5600h* dengan *clock speed* 3.30 GHz dan *RAM* 16 GB.

Tabel 4.10. Penamaan variabel yang di optimasi pada studi kasus 2

Variabel	Keterangan
$X_1 - X_{12}$	fc' Kolom
$X_{13} - X_{24}$	fc' Balok
$X_{25} - X_{60}$	Dimensi Kolom (h kolom = b Kolom)

Tabel 4.10. Penamaan variabel yang di optimasi pada studi kasus 2 (lanjutan)

Variabel	Keterangan
$X_{61} - X_{84}$	B balok
$X_{85} - X_{108}$	H balok
$X_{109} - X_{144}$	Diameter Tulangan Kolom
$X_{145} - X_{168}$	Diameter Tulangan Balok
$X_{169} - X_{204}$	Diameter Sengkang Kolom
$X_{205} - X_{228}$	Diameter Sengkang Balok
$X_{229} - X_{264}$	Jumlah Sengkang Kolom
$X_{265} - X_{288}$	Jumlah Sengkang Balok
$X_{289} - X_{324}$	Jumlah Tulangan Longitudinal Kolom

Berdasarkan Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 dapat disimpulkan bahwa algoritma SOS unggul dibandingkan algoritma PSO dalam mendapatkan hasil yang lebih optimal pada studi kasus optimasi portal beton bertulang. Karena *initial solution* tiap variabel sudah ditentukan saat iterasi pertama, maka seluruh sampel kedua algoritma tidak ada yang melanggar *constraint*. Namun karena variabel yang banyak, algoritma PSO tidak mampu mengembangkan biaya total struktur menjadi lebih optimal seperti pada algoritma SOS. Hal ini menyebabkan algoritma SOS jauh lebih unggul dibandingkan algoritma PSO. Selain mampu mendapatkan biaya yang lebih murah, algoritma SOS juga mampu mengembangkan secara signifikan biaya total struktur.

Tabel 4.11. Perbandingan volume tulangan dan beton elemen kolom dan volume tulangan dan beton elemen balok pada studi kasus 2

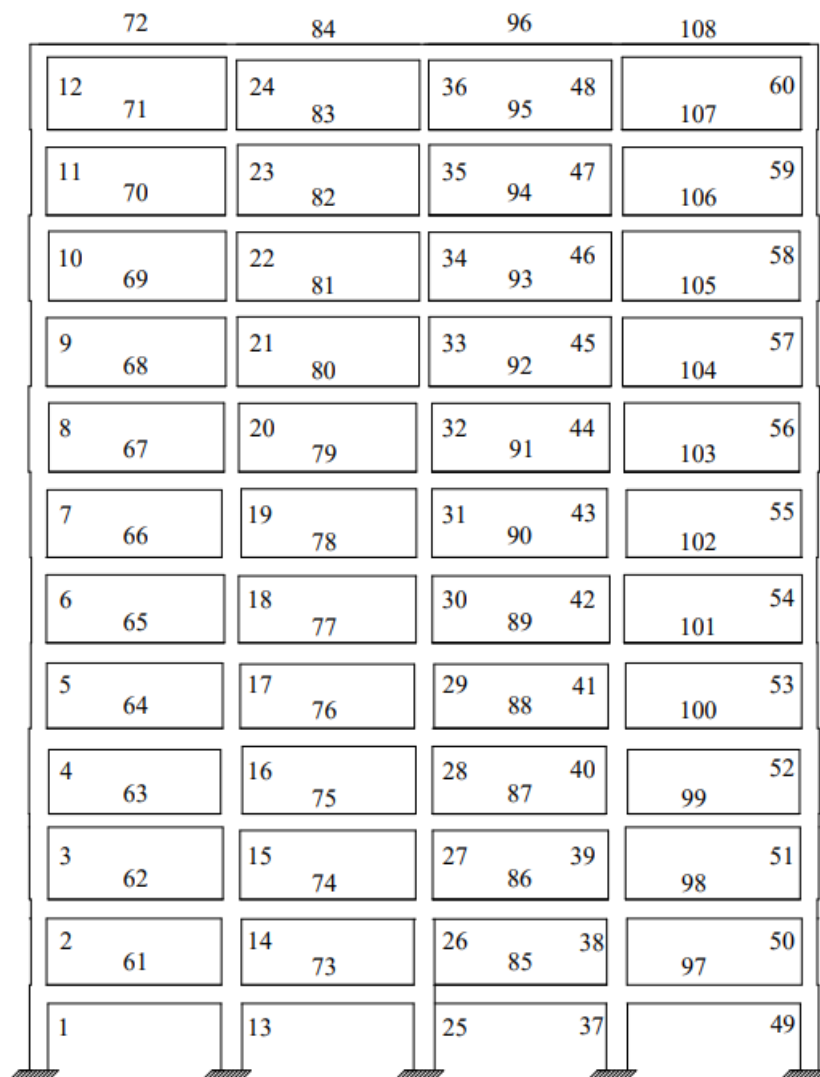
	SOS Optimal	PSO Optimal
Elemen Kolom		
Volume Tulangan Kolom (m^3)	2.7105	4.2456
Volume Beton Kolom $f_c' = 24.43$ MPa (m^3)	68.432	140
Volume Beton Kolom $f_c' = 28.5$ MPa (m^3)	30.35	100
Volume Beton Kolom $f_c' = 32.57$ MPa (m^3)	45.894	-
Volume Beton Kolom $f_c' = 36.64$ MPa (m^3)	-	-
Volume Beton Kolom $f_c' = 40.71$ MPa (m^3)	-	-
Volume Beton Kolom $f_c' = 48.85$ MPa (m^3)	-	-

Tabel 4.11. Perbandingan volume tulangan dan beton elemen kolom dan volume tulangan dan beton elemen balok pada studi kasus 2 (lanjutan)

	SOS Optimal	PSO Optimal
Elemen Balok		
Volume Tulangan Balok (m ³)	2.7112	3.3624
Volume Beton Balok $f_c' = 24.43$ MPa (m ³)	36.248	38.498
Volume Beton Balok $f_c' = 28.5$ MPa (m ³)	98.37	22.410
Volume Beton Balok $f_c' = 32.57$ MPa (m ³)	-	20.306
Volume Beton Balok $f_c' = 36.64$ (m ³)	-	49.388
Volume Beton Balok $f_c' = 40.71$ MPa (m ³)	-	-
Volume Beton Balok $f_c' = 48.85$ MPa (m ³)	-	-
Biaya Total	Rp 677,055,286	Rp 933,241,551

Tabel 4.12. Hasil percobaan optimasi pada studi kasus 2

Variabel	SOS	PSO
Mean (Rp)	Rp 695,493,722	Rp 957,685,927
Standar Deviasi (Rp)	Rp 16,028,937	Rp 12,172,672
Max (Rp)	Rp 720,909,831	Rp 971,925,295
Min (Rp)	Rp 677,055,286	Rp 933,241,551
Success Rate	10/10	10/10



Gambar 4.7. Pemetaan dan penamaan elemen struktur studi kasus 2 menggunakan SOS

Tabel 4.13. Hasil optimasi SOS elemen struktur kolom studi kasus 2

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
1	860	4	24.43	16D25	5D13-80	5D13-140
2	720	4	32.57	24D19	6D10-80	6D10-100
3	880	4	32.57	20D25	6D13-80	6D13-140
4	920	4	28.5	20D25	6D10-80	6D10-140
5	740	4	28.5	24D19	5D10-100	5D10-100

Tabel 4.13. Hasil optimasi SOS elemen struktur kolom studi kasus 2 (lanjutan)

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
6	700	4	32.57	16D22	4D13-120	4D13-120
7	780	4	24.43	16D22	5D13-100	5D13-120
8	940	4	24.43	24D22	4D13-120	4D13-120
9	720	4	32.57	16D22	4D13-120	4D13-120
10	920	4	24.43	28D22	5D13-120	5D13-120
11	700	4	24.43	32D19	2D13-80	2D13-100
12	800	4	24.43	32D19	5D10-80	5D10-100
13	980	4	24.43	20D25	6D13-80	6D13-140
14	940	4	32.57	20D25	6D13-100	6D13-140
15	800	4	32.57	20D22	5D13-80	5D13-120
16	1000	4	28.5	28D22	6D10-80	6D10-120
17	820	4	28.5	24D25	4D13-100	4D13-140
18	660	4	32.57	32D19	5D13-100	5D13-100
19	900	4	24.43	24D22	6D10-100	6D10-120
20	680	4	24.43	16D22	3D13-80	3D13-120
21	540	4	32.57	16D19	5D10-80	5D10-100
22	520	4	24.43	16D19	5D13-100	5D13-100
23	560	4	24.43	40D19	7D8-100	7D8-100
24	480	4	24.43	16D19	5D8-80	5D8-100
25	980	4	24.43	20D25	6D13-100	6D13-140
26	960	4	32.57	28D22	6D13-120	6D13-120
27	800	4	32.57	24D19	6D13-100	6D13-100
28	780	4	28.5	16D22	5D13-80	5D13-120
29	920	4	28.5	20D25	6D13-80	6D13-140
30	760	4	32.57	28D19	5D13-100	5D13-100
31	720	4	24.43	28D19	3D13-80	4D13-100
32	720	4	24.43	12D25	4D13-120	4D13-140

Tabel 4.13. Hasil optimasi SOS elemen struktur kolom studi kasus 2 (lanjutan)

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
33	480	4	32.57	12D19	4D13-100	4D13-100
34	440	4	24.43	24D19	4D10-80	4D10-100
35	480	4	24.43	12D19	3D10-80	3D10-100
36	420	4	24.43	16D19	4D10-100	4D10-100
37	980	4	24.43	20D25	6D13-80	6D13-140
38	940	4	32.57	20D25	6D13-100	6D13-140
39	800	4	32.57	20D22	5D13-80	5D13-120
40	1000	4	28.5	28D22	6D10-80	6D10-120
41	820	4	28.5	24D25	4D13-100	4D13-140
42	660	4	32.57	32D19	5D13-100	5D13-100
43	900	4	24.43	24D22	6D10-100	6D10-120
44	680	4	24.43	16D22	3D13-80	3D13-120
45	540	4	32.57	16D19	5D10-80	5D10-100
46	520	4	24.43	16D19	5D13-100	5D13-100
47	560	4	24.43	40D19	7D8-100	7D8-100
48	480	4	24.43	16D19	5D8-80	5D8-100
49	860	4	24.43	16D25	5D13-80	5D13-140
50	720	4	32.57	24D19	6D10-80	6D10-100
51	880	4	32.57	20D25	6D13-80	6D13-140
52	920	4	28.5	20D25	6D10-80	6D10-140
53	740	4	28.5	24D19	5D10-100	5D10-100
54	700	4	32.57	16D22	4D13-120	4D13-120
55	780	4	24.43	16D22	5D13-100	5D13-120
56	940	4	24.43	24D22	4D13-120	4D13-120
57	720	4	32.57	16D22	4D13-120	4D13-120
58	920	4	24.43	28D22	5D13-120	5D13-120
59	700	4	24.43	32D19	2D13-80	2D13-100

Tabel 4.13. Hasil optimasi SOS elemen struktur kolom studi kasus 2 (lanjutan)

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
60	800	4	24.43	32D19	5D10-80	5D10-100

Tabel 4.14. Hasil optimasi SOS elemen struktur balok studi kasus 2

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
61	450	875	9	24.43	8D25	4D25	2D25	4D25	4D25	2D25	4D10-260	4D10-200
62	375	900	9	24.43	17D19	9D19	5D19	6D19	8D19	4D19	4D10-220	4D10-140
63	450	625	9	28.5	12D25	6D25	3D25	5D25	4D25	2D25	4D10-140	4D10-120
64	475	1000	9	28.5	15D22	8D22	4D22	4D22	9D22	5D22	4D13-400	4D13-160
65	375	950	9	28.5	11D22	6D22	3D22	4D22	5D22	3D22	4D10-260	4D10-120
66	450	825	9	28.5	12D22	6D22	3D22	5D22	5D22	3D22	4D10-220	4D10-100
67	500	850	9	28.5	13D22	7D22	4D22	5D22	6D22	3D22	4D13-380	4D13-160
68	375	775	9	28.5	12D22	6D22	3D22	5D22	4D22	2D22	4D10-200	4D10-100
69	275	800	9	28.5	12D22	6D22	3D22	5D22	4D22	2D22	4D10-180	4D10-100
70	375	750	9	24.43	10D25	5D25	3D25	4D25	3D25	2D25	4D13-300	4D13-160
71	275	825	9	28.5	8D25	4D25	2D25	4D25	2D25	2D25	4D10-200	4D10-100
72	375	600	9	28.5	9D25	5D25	3D25	5D25	3D25	2D25	3D13-180	3D13-100
73	500	875	9	24.43	7D19	4D19	5D19	9D19	7D19	4D19	4D13-220	4D13-140
74	350	925	9	24.43	6D22	3D22	3D22	6D22	6D22	3D22	4D8-200	4D8-80
75	300	775	9	28.5	6D19	3D19	5D19	10D19	6D19	3D19	4D10-260	4D10-120
76	275	850	9	28.5	4D22	2D22	4D22	7D22	4D22	2D22	4D10-300	4D10-140
77	300	1000	9	28.5	7D19	4D19	4D19	8D19	7D19	4D19	4D10-380	4D10-140

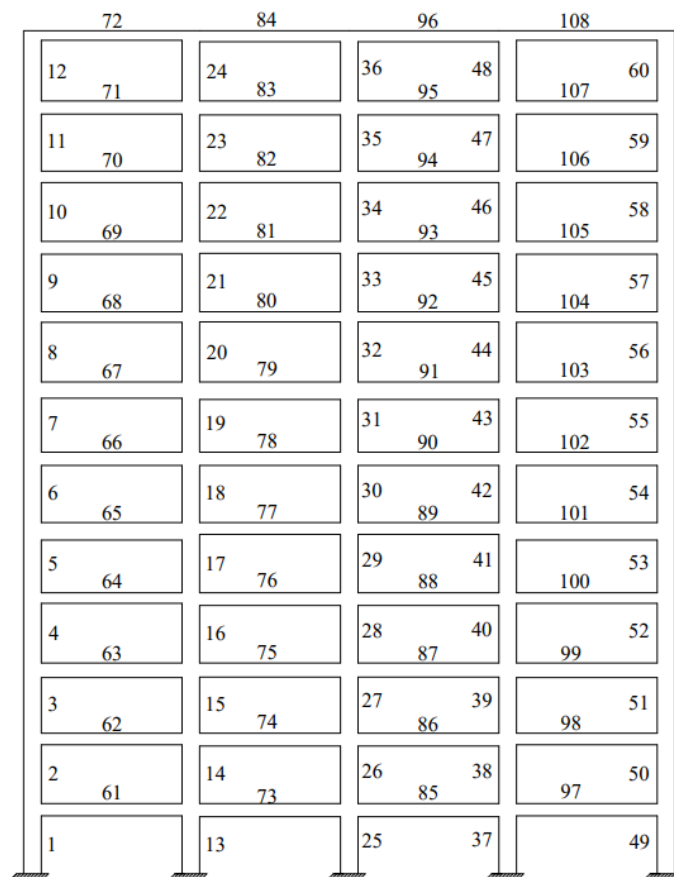
Tabel 4.14. Hasil optimasi SOS elemen struktur balok studi kasus 2 (lanjutan)

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
78	350	875	9	28.5	4D25	2D25	3D25	5D25	4D25	2D25	4D8-220	4D8-80
79	550	800	9	28.5	4D25	2D25	3D25	6D25	4D25	2D25	4D10-360	4D10-120
80	525	800	9	28.5	4D25	2D25	3D25	6D25	3D25	2D25	2D13-360	2D13-100
81	350	750	9	28.5	2D25	2D25	3D25	6D25	2D25	2D25	4D10-300	4D10-120
82	300	800	9	24.43	3D19	3D19	5D19	10D19	3D19	3D19	4D10-320	4D10-140
83	275	700	9	28.5	2D22	3D22	5D22	9D22	2D22	3D22	4D10-240	4D10-120
84	275	750	9	28.5	2D22	2D22	4D22	8D22	2D22	2D22	3D13-340	3D13-160
85	500	875	9	24.43	7D19	4D19	5D19	9D19	7D19	4D19	4D13-200	4D13-140
86	350	925	9	24.43	6D22	3D22	3D22	6D22	6D22	3D22	4D8-200	4D8-80
87	300	775	9	28.5	6D19	3D19	5D19	10D19	6D19	3D19	4D10-260	4D10-120
88	275	850	9	28.5	4D22	2D22	4D22	7D22	4D22	2D22	4D10-300	4D10-140
89	300	1000	9	28.5	7D19	4D19	4D19	8D19	7D19	4D19	4D10-380	4D10-140
90	350	875	9	28.5	4D25	2D25	3D25	5D25	4D25	2D25	4D8-220	4D8-80
91	550	800	9	28.5	4D25	2D25	3D25	6D25	4D25	2D25	4D10-360	4D10-120
92	525	800	9	28.5	3D25	2D25	3D25	6D25	4D25	2D25	2D13-360	2D13-100
93	350	750	9	28.5	2D25	2D25	3D25	6D25	2D25	2D25	4D10-300	4D10-120
94	300	800	9	24.43	3D19	3D19	5D19	10D19	3D19	3D19	4D10-320	4D10-140
95	275	700	9	28.5	2D22	3D22	5D22	9D22	2D22	3D22	4D10-240	4D10-120

Tabel 4.14. Hasil optimasi SOS elemen struktur balok studi kasus 2 (lanjutan)

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
96	275	750	9	28.5	2D22	2D22	4D22	8D22	2D22	2D22	3D13-340	3D13-160
97	450	875	9	24.43	4D25	2D25	2D25	4D25	8D25	4D25	4D10-260	4D10-100
98	375	900	9	24.43	7D19	4D19	5D19	6D19	17D19	9D19	4D10-220	4D10-100
99	450	625	9	28.5	4D25	2D25	3D25	5D25	12D25	6D25	4D10-140	4D10-80
100	475	1000	9	28.5	9D22	5D22	4D22	4D22	15D22	8D22	4D13-200	4D13-160
101	375	950	9	28.5	5D22	3D22	3D22	4D22	11D22	6D22	4D10-260	4D10-100
102	450	825	9	28.5	5D22	3D22	3D22	5D22	12D22	6D22	4D10-220	4D10-100
103	500	850	9	28.5	6D22	3D22	4D22	5D22	13D22	7D22	4D13-380	4D13-160
104	375	775	9	28.5	4D22	2D22	3D22	5D22	12D22	6D22	4D10-200	4D10-100
105	275	800	9	28.5	4D22	2D22	3D22	5D22	12D22	6D22	4D10-180	4D10-100
106	375	750	9	24.43	3D25	2D25	3D25	4D25	10D25	5D25	4D13-300	4D13-160
107	275	825	9	28.5	2D25	2D25	2D25	4D25	8D25	4D25	4D10-200	4D10-100
108	375	600	9	28.5	3D25	2D25	3D25	6D25	9D25	5D25	3D13-180	3D13-100

Pemetaan nama elemen struktur serta hasil optimasi studi kasus 2 dapat dilihat pada Gambar 4.7 serta Tabel 4.13 untuk elemen struktur kolom algoritma SOS, Tabel 4.14 untuk elemen struktur balok algoritma SOS. Elemen struktur hasil algoritma PSO dapat dilihat pada Gambar 4.8 serta Tabel 4.15 untuk elemen struktur kolom dan Tabel 4.16 untuk elemen struktur balok, menunjukkan bahwa algoritma PSO tidak mampu menemukan dimensi kolom yang lebih optimal sehingga seluruh kolom struktur hanya terdiri dari 1 ukuran saja. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma SOS lebih unggul dibandingkan dengan algoritma PSO.



Gambar 4.8. Pemetaan dan penamaan elemen struktur studi kasus 2 menggunakan PSO

Tabel 4.15. Hasil optimasi PSO elemen struktur kolom studi kasus 2

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
1	1000	4	28.5	24D25	7D13-120	7D13-140
2	1000	4	28.5	24D25	7D13-140	7D13-140

Tabel 4.15. Hasil optimasi PSO elemen struktur kolom studi kasus 2 (lanjutan)

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
3	1000	4	24.43	32D22	4D13-80	4D13-120
4	1000	4	24.43	28D22	5D13-80	5D13-120
5	1000	4	28.5	28D22	5D13-80	5D13-120
6	1000	4	28.5	28D25	5D13-120	5D13-140
7	1000	4	24.43	28D25	6D13-140	6D13-140
8	1000	4	24.43	24D25	7D13-140	7D13-140
9	1000	4	24.43	28D22	5D13-120	5D13-120
10	1000	4	28.5	28D22	6D13-120	6D13-120
11	1000	4	24.43	24D25	7D13-140	7D13-140
12	1000	4	24.43	24D25	7D13-140	7D13-140
13	1000	4	28.5	24D25	6D13-100	6D13-140
14	1000	4	28.5	36D19	7D13-100	7D13-100
15	1000	4	24.43	28D22	5D13-120	5D13-120
16	1000	4	24.43	32D22	4D13-80	4D13-120
17	1000	4	28.5	24D25	7D13-120	7D13-140
18	1000	4	28.5	28D22	5D13-120	5D13-120
19	1000	4	24.43	28D25	5D13-140	5D13-140
20	1000	4	24.43	28D22	6D13-120	6D13-120
21	1000	4	24.43	28D25	5D13-140	5D13-140
22	1000	4	28.5	24D25	7D13-140	7D13-140
23	1000	4	24.43	28D22	5D13-80	5D13-120
24	1000	4	24.43	24D25	7D13-80	7D13-140
25	1000	4	28.5	28D22	6D13-100	6D13-120
26	1000	4	28.5	32D22	7D13-120	7D13-120
27	1000	4	24.43	32D22	6D13-120	6D13-120
28	1000	4	24.43	28D25	6D13-120	6D13-140
29	1000	4	28.5	24D25	5D13-120	5D13-140

Tabel 4.15. Hasil optimasi PSO elemen struktur kolom studi kasus 2 (lanjutan)

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
30	1000	4	28.5	24D25	5D13-120	5D13-140
31	1000	4	24.43	24D25	6D13-140	6D13-140
32	1000	4	24.43	32D22	6D13-120	6D13-120
33	1000	4	24.43	28D22	6D13-120	6D13-120
34	1000	4	28.5	28D25	5D13-120	5D13-140
35	1000	4	24.43	28D22	5D13-120	5D13-120
36	1000	4	24.43	32D25	6D13-80	6D13-140
37	1000	4	28.5	24D25	6D13-100	6D13-140
38	1000	4	28.5	36D19	7D13-100	7D13-100
39	1000	4	24.43	28D22	5D13-120	5D13-120
40	1000	4	24.43	32D22	4D13-80	4D13-120
41	1000	4	28.5	24D25	7D13-120	7D13-140
42	1000	4	28.5	28D22	5D13-120	5D13-120
43	1000	4	24.43	28D25	5D13-140	5D13-140
44	1000	4	24.43	28D22	6D13-120	6D13-120
45	1000	4	24.43	28D25	5D13-140	5D13-140
46	1000	4	28.5	24D25	7D13-140	7D13-140
47	1000	4	24.43	28D22	5D13-80	5D13-120
48	1000	4	24.43	24D25	7D13-80	7D13-140
49	1000	4	28.5	24D25	7D13-120	7D13-140
50	1000	4	28.5	24D25	7D13-140	7D13-140
51	1000	4	24.43	32D22	4D13-80	4D13-120
52	1000	4	24.43	28D22	5D13-80	5D13-120
53	1000	4	28.5	28D22	5D13-80	5D13-120
54	1000	4	28.5	28D25	5D13-120	5D13-140
55	1000	4	24.43	28D25	6D13-140	6D13-140
56	1000	4	24.43	24D25	7D13-140	7D13-140

Tabel 4.15. Hasil optimasi PSO elemen struktur kolom studi kasus 2 (lanjutan)

ID elemen	Lebar Kolom (mm)	Tinggi Kolom (m)	f_c' Kolom (MPa)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang Daerah Lo	Tulangan Sengkang di luar Daerah Lo
57	1000	4	24.43	28D22	5D13-120	5D13-120
58	1000	4	28.5	28D22	6D13-120	6D13-120
59	1000	4	24.43	24D25	7D13-140	7D13-140
60	1000	4	24.43	24D25	7D13-140	7D13-140

Tabel 4.16. Hasil optimasi PSO elemen struktur balok studi kasus 2

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
61	550	700	9	36.64	11D25	6D25	3D25	5D25	5D25	3D25	4D13-300	4D13-140
62	475	650	9	36.64	22D19	11D19	6D19	8D19	9D19	5D19	4D13-260	4D13-120
63	500	825	9	24.43	14D25	7D25	4D25	4D25	8D25	4D25	4D13-280	4D13-180
64	425	600	9	32.57	13D25	7D25	4D25	5D25	5D25	3D25	4D13-220	4D13-120
65	425	1000	9	24.43	24D19	12D19	6D19	5D19	14D19	7D19	4D13-320	4D13-140
66	300	750	9	36.64	10D25	5D25	3D25	4D25	4D25	2D25	4D13-300	4D13-160
67	350	925	9	28.5	10D25	5D25	3D25	4D25	5D25	3D25	4D13-360	4D13-180
68	400	600	9	36.64	12D25	6D25	3D25	5D25	4D25	2D25	4D13-220	4D13-120
69	400	725	9	32.57	11D25	6D25	3D25	4D25	5D25	3D25	4D13-280	4D13-140
70	425	650	9	28.5	20D19	10D19	5D19	8D19	6D19	3D19	4D13-260	4D13-140
71	450	750	9	24.43	9D25	5D25	3D25	4D25	3D25	2D25	4D13-340	4D13-160
72	325	550	9	36.64	11D25	6D25	3D25	6D25	3D25	2D25	4D13-200	4D13-120
73	350	750	9	36.64	4D25	2D25	3D25	6D25	4D25	2D25	4D13-160	4D13-120
74	425	725	9	36.64	5D25	3D25	3D25	6D25	5D25	3D25	4D13-320	4D13-160
75	525	800	9	24.43	6D25	3D25	3D25	6D25	6D25	3D25	4D13-160	4D13-120
76	525	725	9	32.57	7D25	4D25	4D25	7D25	6D25	3D25	4D13-320	4D13-160
77	450	675	9	24.43	4D25	2D25	4D25	7D25	4D25	2D25	4D13-300	4D13-140

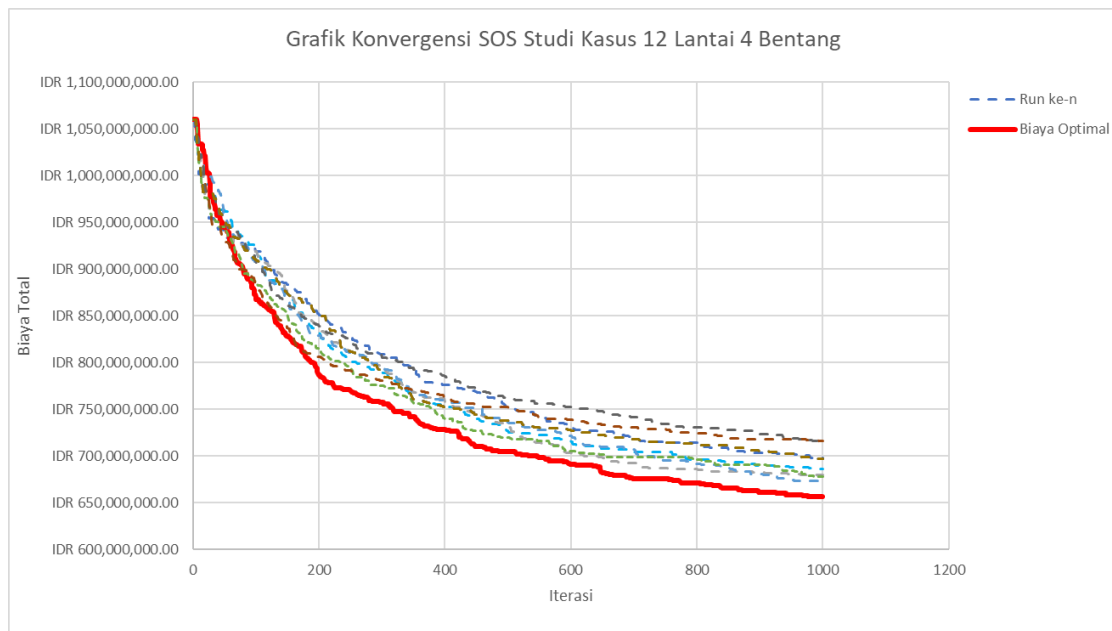
Tabel 4.16. Hasil optimasi PSO elemen struktur balok studi kasus 2 (lanjutan)

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
78	500	750	9	36.64	8D22	4D22	4D22	8D22	7D22	4D22	4D13-340	4D13-160
79	450	1000	9	28.5	6D25	3D25	3D25	5D25	6D25	3D25	4D13-240	4D13-160
80	475	575	9	36.64	3D25	2D25	4D25	8D25	3D25	2D25	4D13-240	4D13-120
81	300	675	9	32.57	3D25	2D25	4D25	7D25	3D25	2D25	4D13-300	4D13-140
82	300	650	9	28.5	2D25	2D25	4D25	8D25	2D25	2D25	4D13-280	4D13-140
83	300	800	9	24.43	2D25	2D25	3D25	6D25	2D25	2D25	4D13-360	4D13-180
84	300	625	9	36.64	2D22	3D22	5D22	10D22	2D22	3D22	4D13-280	4D13-140
85	350	750	9	36.64	4D25	2D25	3D25	6D25	4D25	2D25	4D13-340	4D13-160
86	425	725	9	36.64	5D25	3D25	3D25	6D25	5D25	3D25	4D13-320	4D13-160
87	525	800	9	24.43	6D25	3D25	3D25	6D25	6D25	3D25	4D13-360	4D13-180
88	525	725	9	32.57	6D25	3D25	4D25	7D25	7D25	4D25	4D13-320	4D13-160
89	450	675	9	24.43	4D25	2D25	4D25	7D25	4D25	2D25	4D13-300	4D13-140
90	500	750	9	36.64	7D22	4D22	4D22	8D22	8D22	4D22	4D13-340	4D13-160
91	450	1000	9	28.5	6D25	3D25	3D25	5D25	6D25	3D25	4D13-240	4D13-160
92	475	575	9	36.64	3D25	2D25	4D25	8D25	3D25	2D25	4D13-240	4D13-120
93	300	675	9	32.57	3D25	2D25	4D25	7D25	3D25	2D25	4D13-300	4D13-140
94	300	650	9	28.5	2D25	2D25	4D25	8D25	2D25	2D25	4D13-280	4D13-140
95	300	800	9	24.43	2D25	2D25	3D25	6D25	2D25	2D25	4D13-360	4D13-180

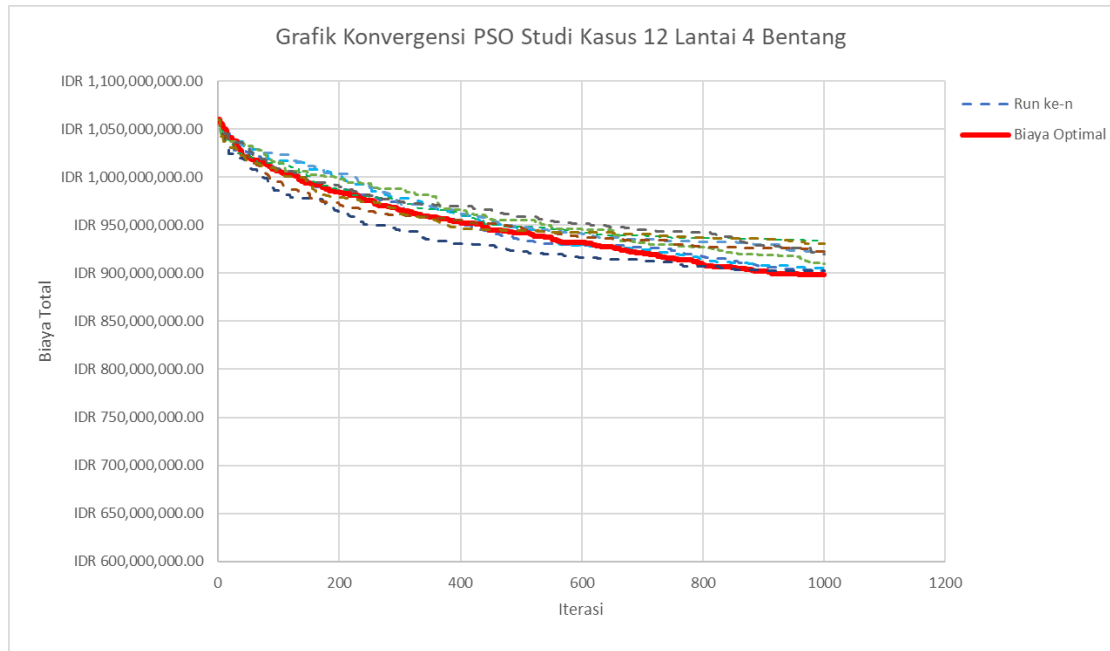
Tabel 4.16. Hasil optimasi PSO elemen struktur balok studi kasus 2 (lanjutan)

ID Elemen	B Balok (mm)	H Balok (mm)	Bentang Balok (m)	f_c' balok (MPa)	Tulangan Tumpuan Kiri Atas	Tulangan Tumpuan Kiri Bawah	Tulangan Lapangan Atas	Tulangan Lapangan Bawah	Tulangan Tumpuan Kanan Atas	Tulangan Tumpuan Kanan Bawah	Sengkang Lapangan	Sengkang Tumpuan
96	300	625	9	36.64	2D22	3D22	5D22	10D22	2D22	3D22	4D13-280	4D13-140
97	550	700	9	36.64	5D25	3D25	3D25	5D25	11D25	6D25	4D13-300	4D13-140
98	475	650	9	36.64	8D19	4D19	6D19	9D19	22D19	11D19	4D13-260	4D13-120
99	500	825	9	24.43	7D25	4D25	4D25	4D25	14D25	7D25	4D13-280	4D13-140
100	425	600	9	32.57	4D25	2D25	4D25	6D25	13D25	7D25	4D13-220	4D13-120
101	425	1000	9	24.43	14D19	7D19	6D19	6D19	24D19	12D19	4D13-300	4D13-140
102	300	750	9	36.64	4D25	2D25	3D25	4D25	10D25	5D25	4D13-280	4D13-160
103	350	925	9	28.5	5D25	3D25	3D25	4D25	10D25	5D25	4D13-360	4D13-180
104	400	600	9	36.64	4D25	2D25	3D25	6D25	12D25	6D25	4D13-220	4D13-120
105	400	725	9	32.57	4D25	2D25	3D25	4D25	11D25	6D25	4D13-300	4D13-140
106	425	650	9	28.5	5D19	3D19	5D19	9D19	20D19	10D19	4D13-260	4D13-140
107	450	750	9	24.43	3D25	2D25	3D25	4D25	9D25	5D25	4D13-340	4D13-160
108	325	550	9	36.64	3D25	2D25	3D25	6D25	11D25	6D25	4D13-200	4D13-120

Gambar detail hasil optimasi studi kasus 2 menggunakan algoritma PSO dapat dilihat di Lampiran 3 dan Lampiran 7 untuk elemen balok dan elemen kolom. Serta gambar detail hasil optimasi menggunakan algoritma SOS dapat dilihat pada Lampiran 4 dan Lampiran 8 untuk elemen balok dan elemen kolom. Melalui grafik konvergensi pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, dapat dilihat percobaan studi kasus 2 dengan menggunakan 1,600,000 *function evaluation* untuk metode SOS dan 400,000 *function evaluation* untuk metode PSO. Algoritma mampu menghasilkan biaya total struktur yang cukup konsisten. Biaya pada studi kasus 2 dapat konsisten karena dilakukan modifikasi pada pengambilan variabel pertama. Melalui grafik konvergensi, SOS mampu memberikan rentang total biaya struktur yang konsisten, berbeda dengan PSO yang tidak mampu mengembangkan total biaya struktur secara signifikan.



Gambar 4.9. Grafik konvergensi algoritma SOS pada studi kasus portal 4 bentang dan 12 lantai



Gambar 4.10. Grafik konvergensi algoritma PSO pada studi kasus portal 4 bentang dan 12 lantai

4.4. Diskusi

Tabel 4.17 menunjukkan rangkuman hasil penelitian struktur portal untuk studi kasus pertama dan studi kasus kedua. Dapat dilihat untuk studi kasus 4 bentang 12 lantai SOS memiliki standar deviasi yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan SOS studi kasus kedua memiliki variabel yang sangat banyak sehingga setiap kali *run* bisa mendapatkan hasil akhir yang berbeda-beda. Sedangkan untuk PSO studi kasus kedua memiliki standar deviasi yang lebih rendah karena algoritma PSO tidak mampu bergerak ke arah yang optimal dan cenderung *stuck* pada titik awal *agent* di-drop.

Tabel 4.17. Rangkuman Hasil Penelitian

Studi Kasus	Algoritma Optimasi	Hasil Optimasi		
		Terbaik (Rp)	Rata-Rata (Rp)	Standar Deviasi (Rp)
5 Bentang 4 Lantai	SOS	Rp 225,009,115	Rp 232,836,975	Rp 7,831,644
	PSO	Rp 254,977,154	Rp 259,656,766	Rp -
4 Bentang 12 Lantai	SOS	Rp 661,044,972	Rp 693,892,691	Rp 18,659,072
	PSO	Rp 916,924,530	Rp 925,814,481	Rp 7,070,533

Pada algoritma SOS, semua studi kasus mendapat biaya yang optimal dan cukup konsisten, dibuktikan dari standar deviasi yang tidak begitu jauh. Namun pada algoritma PSO, semua studi kasus mendapat biaya yang tidak optimal sama sekali, dibuktikan dari studi kasus pertama, *success rate* dari algoritma PSO hanya mencapai 30%, yaitu 3 keberhasilan dari 10 kali *run*. Hal ini dikarenakan algoritma SOS menggunakan *greedy system* dimana lokasi *agent* akan di-*update* hanya jika biaya yang dihasilkan lebih baik daripada biaya yang dihasilkan iterasi sebelumnya. Algoritma PSO tidak menggunakan *greedy system* sehingga tidak dapat menghasilkan biaya yang optimal, dan bahkan masih melanggar *constraint*.

4.5. Validasi

Untuk mengecek apakah hasil yang sudah didapatkan pada studi kasus 1 dan studi kasus 2 cukup optimal jika dibandingkan dengan *expert judgement* yang banyak digunakan, maka perlu dilakukan validasi. *Expert judgement* digunakan untuk mendapatkan kebutuhan dimensi elemen balok dan kolom dengan *rule of thumb* yang sering kali digunakan di lapangan yaitu pembulatan setiap 50 mm pada balok dan 100 mm pada kolom. Untuk pemilihan mutu beton juga dilakukan *grading* dimana akan dicoba mulai dari mutu beton terendah hingga mutu beton tertinggi sampai semua *constraint* tidak terlanggar. Semua dimensi dan mutu beton akan dimasukkan sebagai *input* pada Matlab yaitu pada *objective function* yang sama yang digunakan untuk proses optimasi. Matlab akan menghitung jumlah tulangan longitudinal dan jarak tulangan sengkang yang dibutuhkan untuk mencapai kapasitas yang dibutuhkan setiap elemen.

Untuk studi kasus 1, pembagian dimensi kolom dan balok dilakukan berdasarkan letak elemen pada struktur yaitu interior dan eksterior. Untuk kolom eksterior digunakan ukuran 700 mm x 700 mm dan untuk kolom interior yang menumpu balok dengan bentang 11 meter digunakan ukuran 1100 mm x 1100 mm. Untuk balok 11 meter digunakan ukuran 600 mm x 1100 mm, balok interior bentang 6 meter digunakan ukuran 500 mm x 900 mm, dan balok eksterior digunakan ukuran 300 mm x 600 mm.

Tabel 4.18. Validasi Studi Kasus 1

Elemen		Expert		Optimasi	
Beton	Kolom	IDR	60,093,600	IDR	37,852,080
	Balok	IDR	58,094,400	IDR	58,578,790
Tulangan	Kolom	IDR	77,453,870	IDR	62,155,134
	Balok	IDR	86,806,630	IDR	74,367,060
TOTAL		IDR	282,448,500	IDR	232,954,064
SELISIH		IDR	49,495,436		

Pada Tabel 4.18, dapat terlihat bahwa dengan *expert judgement*, didapat biaya total struktur sebesar Rp. 282,448,500. Sedangkan hasil paling optimal pada studi kasus 1 dengan algoritma metaheuristik SOS didapatkan biaya total struktur sebesar Rp. 232,954,064. Sehingga dapat disimpulkan, dengan algoritma optimasi SOS, dapat menghemat sebesar Rp. 49,495,436.

Untuk studi kasus 2, dilakukan *grouping* yang cukup ekstrim pada elemen balok dan kolom. Semua kolom eksterior dan interior digunakan ukuran 1000 mm x 1000 mm pada semua lantai. Semua balok eksterior dan interior digunakan ukuran 450 mm x 700 mm pada semua lantai.

Tabel 4.19. Validasi Studi Kasus 2

Elemen		Expert		Optimasi	
Beton	Kolom	IDR	252,000,000	IDR	142,258,592
	Balok	IDR	142,884,000	IDR	130,475,300
Tulangan	Kolom	IDR	266,413,700	IDR	202,132,604
	Balok	IDR	276,940,000	IDR	202,188,800
TOTAL		IDR	938,237,700	IDR	677,055,285
SELISIH		IDR	261,182,414		

Pada Tabel 4.19, dapat terlihat bahwa dengan *expert judgement*, didapat biaya total struktur sebesar Rp. 938,237,700. Sedangkan hasil paling optimal pada studi kasus 2 dengan algoritma metaheuristik SOS didapatkan biaya total struktur sebesar Rp. 677,055,285. Sehingga dapat disimpulkan, dengan algoritma optimasi SOS, dapat menghemat sebesar Rp. 261,182,414.