

OPTIMASI UKURAN PENAMPANG, TOPOLOGI, DAN BENTUK STRUKTUR PADA STRUKTUR RANGKA BATANG RUANG DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA *HYBRID*

Richard Frans¹ dan Yoyong Arfiadi²

¹Magister Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 43 Yogyakarta
Email: richardfrans.rf@gmail.com

²Departemen Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44 Yogyakarta
Email: yoyong@mail.uajy.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan algoritma genetika dalam pengoptimasian struktur di bidang teknik sipil telah banyak dikembangkan oleh peneliti-peneliti. Algoritma genetika sendiri merupakan suatu teori optimasi berdasarkan teori Darwin. Aplikasi algoritma telah banyak dikembangkan dalam berbagai macam bidang ilmu khususnya yang menyangkut tentang optimasi. Kelebihan algoritma genetika adalah dapat menemukan suatu solusi (nilai-nilai optimum) dari persoalan yang kompleks. Secara umum, terdapat dua jenis algoritma genetika yaitu algoritma genetika biner (*binary genetic algorithm/discrete genetic algorithm*) dan algoritma genetika riil (*real genetic algorithm*). Algoritma genetika *hybrid (hybrid genetic algorithm)* merupakan gabungan dari keduanya, dimana algoritma genetika biner digunakan untuk mengoptimasi ukuran penampang dan topologi sedangkan algoritma genetika riil digunakan untuk mengoptimasi bentuk struktur pada struktur rangka batang ruang (*space truss*). Sebagai *benchmark problem* diambil suatu struktur rangka batang ruang dengan 10 batang, berat struktur yang didapatkan dengan menggunakan algoritma genetika *hybrid* ini adalah 2122,62 kg, hasil ini paling baik jika dibandingkan dengan peneliti-peneliti terdahulu. Untuk kasus struktur rangka batang ruang diambil satu model yang biasanya digunakan oleh peneliti dalam mengoptimasi struktur rangka batang ruang dengan 25 batang. Struktur ini akan dioptimasi masing-masing dengan menggunakan algoritma genetika biner (sebagai perbandingan dengan hasil yang telah didapatkan peneliti terdahulu) dan algoritma genetika *hybrid*. Hasil optimasi dengan menggunakan algoritma genetika *hybrid* terbagi atas dua yaitu: (1) optimasi pada ukuran penampang dan bentuk struktur saja, (2) optimasi pada ukuran penampang, topologi, dan bentuk struktur. Ukuran penampang yang tersedia bervariasi antara 0,1-0,36 inch². Berat struktur yang didapatkan dengan menggunakan algoritma genetika biner adalah 232,827 kg, dimana hasil ini paling ringan diantara hasil-hasil lainnya. Hasil algoritma genetika *hybrid* untuk kasus yang pertama dan kedua masing-masing sebesar 154,1467 kg dan 115,2282 kg. Berdasarkan hasil di atas, dapat disimpulkan bahwa algoritma genetika dapat melakukan 3 jenis optimasi secara bersamaan (ukuran penampang, topologi, dan bentuk struktur) serta dapat menemukan variabel desain yang optimum.

Kata Kunci: optimasi ukuran penampang, optimasi topologi, optimasi bentuk struktur, algoritma genetika biner, algoritma genetika riil, algoritma genetika *hybrid*, struktur rangka batang ruang.

1. PENDAHULUAN

Algoritma genetika adalah prosedur pencarian dan optimasi berdasarkan teori seleksi alami Charles Darwin. Sejak pertama kali dirintis oleh John Holland pada tahun 1960-an, algoritma genetika telah dipelajari, diteliti dan diaplikasikan secara luas pada berbagai bidang. Algoritma genetika banyak digunakan pada masalah praktis yang berfokus pada pencarian parameter-parameter optimal. Mekanisme dari penggunaan algoritma genetika berasal dari teori seleksi alam Charles Darwin dimana hanya populasi yang mempunyai nilai *fitness* yang tinggi yang mampu bertahan (Goldberg, 1989). Algoritma genetika telah digunakan untuk memperoleh solusi nilai optimum dan menunjukkan kelebihan untuk menemukan solusi nilai optimum untuk persoalan-persoalan yang kompleks. Ada tiga variabel yang dapat dioptimasi dengan menggunakan algoritma genetika untuk struktur rangka batang ruang yaitu optimasi ukuran penampang (*sizing optimization*), optimasi topologi (*topology optimization*), dan optimasi bentuk struktur (*shaping optimization*).

Banyak penelitian tentang optimasi struktur yang telah dilakukan, beberapa di antaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Goldberg dan Samtani (1996) di mana struktur yang dioptimasi untuk ukuran penampang adalah struktur rangka kuda-kuda atap dengan 10 batang. Lin dan Hajela (1993)-melakukan penelitian untuk meminimalkan berat struktur dengan struktur yang ditinjau adalah struktur rangka batang dengan menggunakan perpindahan dan tegangan sebagai *constraints*. Penelitian lain dilakukan oleh oleh Sakamoto dan Oda (1993) yaitu mengoptimalkan berat struktur dengan ukuran penampang dan topologi sebagai variabel rencana.

2. ALGORITMA GENETIKA BINER DAN ALGORITMA GENETIKA RIIL

Secara umum algoritma genetika terbagi atas dua yaitu algoritma genetika biner (*binary genetic algorithm*) dan algoritma genetika riil (*real genetic algorithm*). Penelitian ini menggunakan algoritma genetika biner untuk melakukan optimasi pada ukuran penampang dan topologi struktur rangka kuda-kuda atap baja. Secara umum tahapan algoritma genetika biner dimulai dengan memanggil populasi secara acak yang direpresentasikan menjadi bilangan 0 dan 1 sebagai *discrete variable*. Untuk optimasi ukuran penampang dibutuhkan suatu “*converter tools*” yang berfungsi untuk menerjemahkan *binary string* menjadi suatu bilangan *real* agar struktur tersebut dapat dianalisis secara struktural, tetapi untuk optimasi topologi, tidak penting mengubah suatu *binary string* menjadi *real number* karena nilai *binary string* hanya merupakan perwakilan dari *existing member*. Jika nilai *string*-nya sama dengan 0 berarti tidak ada *member* yang menghubungkan 2 titik *joint* sebaliknya jika nilai *string*-nya sama dengan 1 berarti ada *member* yang menghubungkan 2 titik *joint*. Untuk lebih mudah dipahami, diberikan contoh di bawah ini:



Gambar 1. Kemungkinan batang yang terjadi untuk 4 titik *joint*

Sebagai contoh pada Gambar 1, diberikan suatu struktur rangka batang yang mempunyai 4 titik *joint* dan 6 kemungkinan batang (6 batang). Jika *binary string* menunjukkan nilai 1 1 1 0 1 1, hal ini berarti bahwa batang 4 tidak ada sedangkan batang lainnya ada (batang 1,2,3,5, dan 6).

Cara untuk mengubah suatu *binary string* menjadi bilangan *real* adalah (Michalewicz, 2006, Arfiadi dan Hadi, 2011):

$$t_j = \sum_{j=0}^r h_j \cdot 2^j \quad (1)$$

dengan:

h_j = *string*-j dari kanan (0 atau 1)

r = panjang *string*

t_i = *real number* dari suatu *column* dalam *array* yang berisi ukuran penampang sebagai *input variabel*

Tahapan selanjutnya dalam algoritma genetika adalah dengan menyeleksi masing-masing populasi dengan menggunakan metode *roulette wheel*. Setelah proses penyeleksian berakhir akan menghasilkan suatu populasi baru yang akan mengalami *crossover* (pindah silang). Metode *crossover* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *one cut point* yaitu memilih secara acak satu posisi dalam kromosom induk kemudian saling menukar gen. *Chromosome* yang dijadikan induk dipilih secara acak dan jumlah kromosom yang mengalami pindah silang dipengaruhi oleh parameter *crossover rate*. Langkah selanjutnya adalah mutasi gen yaitu proses penggantian gen dengan nilai inversinya, gen 0 menjadi 1 dan gen 1 menjadi 0. Proses ini dilakukan secara acak pada posisi gen tertentu pada individu-individu yang terpilih untuk dimutasikan. Banyaknya individu yang mengalami mutasi ditentukan oleh besarnya probabilitas mutasi. Setelah proses mutasi selesai, generasi baru (populasi baru) akan tercipta sekaligus menjadi tanda bahwa telah diselesaikannya satu iterasi dalam algoritma genetika atau disebut dengan satu generasi. Proses tersebut terus berulang sampai didapatkan populasi yang mempunyai nilai *fitness* paling tinggi. Proses pindah silang dan mutasi dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3.

Sebelum Crossover

0 0 1 1 1 0 0 1
 1 0 0 1 1 0 1 0



Setelah Crossover

0 0 1 1 1 0 1 1
 1 0 0 1 1 0 0 0

Sebelum Mutasi

0 0 1 1 1 0 0 1
 0 0 1 1 1 1 0 1

Setelah Mutasi

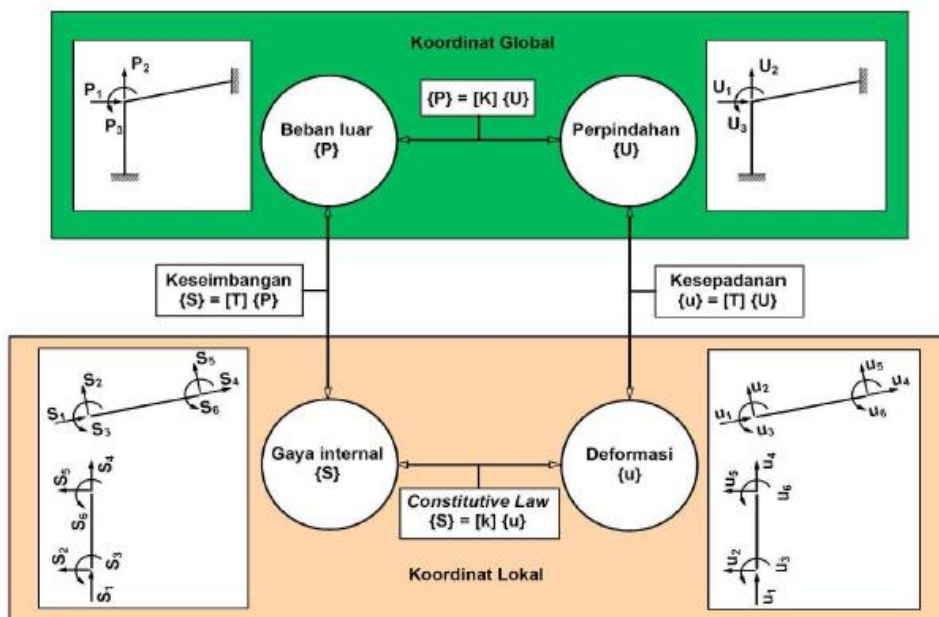
Gambar 2. Metode *crossover one cut point*

Gambar 3. Mutasi untuk algoritma genetika biner

Algoritma genetika *real* mempunyai prosedur yang kurang lebih sama dengan algoritma genetika *biner*, perbedaannya pada algoritma genetika *real*, nilai dari kromosom tidak perlu dikonversi lagi karena nilai tersebut sudah merupakan bilangan *real*. Untuk proses pindah silang (*crossover*) dan mutasi, prosedur pengerjaannya sama, tetapi untuk pergantian gen dalam kromosom merupakan bilangan *real*. Detail mutasi dan pindah silang mengikuti metode yang dibahas dalam Arfiadi dan Hadi (2001, 2011). Selanjutnya metode yang dibahas dalam Arfiadi dan Hadi (2011) untuk algoritma genetika *hybrid* digunakan dalam proses optimasi yang sesuai.

3. ANALISIS STRUKTUR DENGAN METODE KEKAKUAN

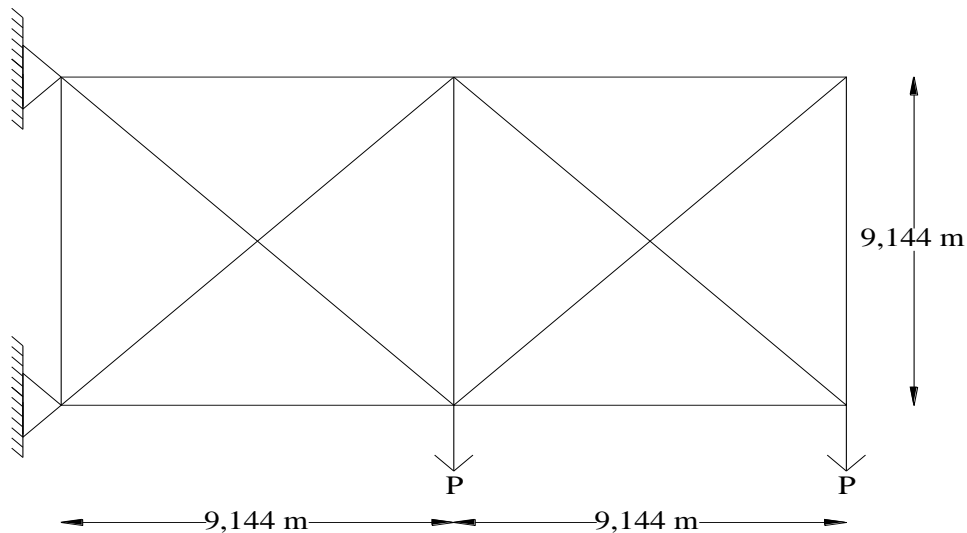
Dalam analisis struktur dikenal dua metode yaitu metode klasik dan metode matriks. Metode klasik seperti metode *slope deflection*, metode Cross diperuntukkan struktur tertentu dan ditujukan untuk penyelesaian secara manual dengan kalkulator. Metode matriks merupakan metode yang lebih terstruktur dan modular, sehingga dapat digunakan untuk penyelesaian yang lebih umum dan mudah diprogram dengan menggunakan komputer. Setelah perkembangan komputer pribadi akhir-akhir ini, analisis struktur dengan metode matriks kekakuan sangat berkembang, yang diikuti tersedianya perangkat lunak analisis struktur (Arfiadi, 2013). Analisis struktur yang digunakan dalam tulisan ini mengikuti metode yang dibahas dalam Arfadi (2013) dengan hubungan antar variabel seperti dinyatakan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara variabel dalam analisis struktur

4. BENCHMARK PROBLEM SEBAGAI VALIDASI

Struktur rangka batang yang banyak digunakan oleh peneliti lain dalam mengoptimasi suatu struktur rangka batang bidang untuk dijadikan acuan terhadap penelitian selanjutnya adalah struktur rangka batang bidang dengan 10 batang dan 6 titik *joint* (titik kumpul), seperti yang terlihat pada gambar di bawah. Dimana jarak antara tumpuan adalah 9144 mm dan dua beban terpusat (*P*) sebesar 445.374 kN pada sumbu-*x* dengan jarak 9144 mm dan 18288 mm dari tumpuan. Material yang digunakan adalah aluminium dengan $E=68,95$ GPa, $\rho=2768$ kg/m³, dan dibatasi nilai tegangan maksimum adalah sebesar 172,37 MPa untuk batang tarik dan tekan, serta tekuk pada batang tekan diabaikan. Perpindahan maksimum vertikal dan horisontal adalah 50,8 mm untuk tiap titik kumpul.



Gambar 5. Benchmark problem (Ten-Bar Truss)
*Sumber: Hultman (2010)

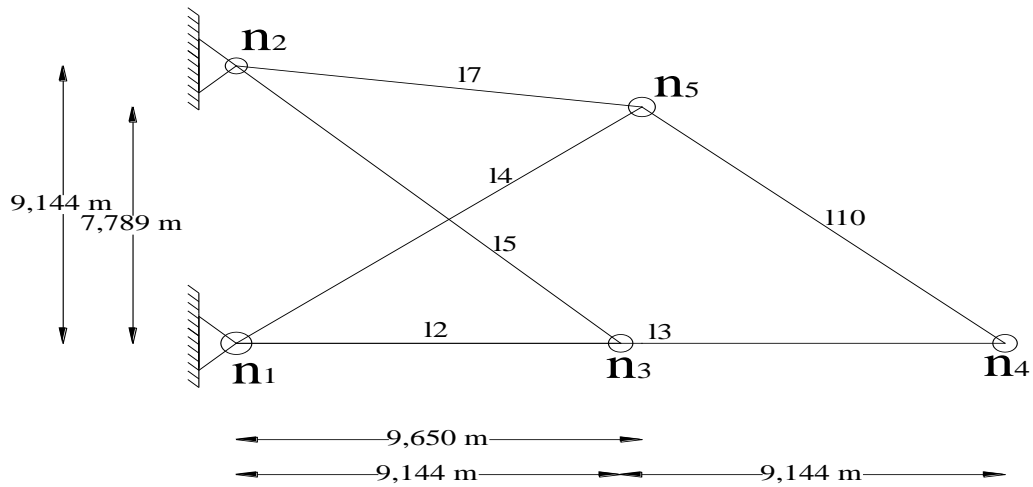
Adapun hasil-hasil yang didapatkan dari peneliti terdahulu yang dalam mengoptimasi struktur rangka batang bidang di atas adalah:

1. 2222,22 kg (4899,15 lbs) oleh Deb dan Gulati (2001).
2. 2241,97 kg (4942,7 lbs) oleh Hajela dan Lee (1995).
3. 2295,59 kg (5060,9 lbs) oleh Li, Huang, dan Liu (2006).
4. 2301,09 kg (5119,3 lbs) oleh Galante (1996).

Sebagaimana yang telah diketahui sebelumnya bahwa kegagalan struktur secara umum terbagi atas dua yaitu: kegagalan yang disebabkan material penampang (kekuatan, kekakuan, dan lain-lain) dan kegagalan yang disebabkan ketidakstabilan, salah satunya yaitu tekuk. Pada contoh di atas, stabilitas tekuk diabaikan, hal ini sebenarnya menjadi tidak realistis dimana pada batang tekan pada struktur rangka batang, *constraint* tekuk lah yang menjadi kendala dalam mendesain suatu struktur rangka batang sehingga struktur di atas hanya dijadikan suatu acuan untuk menjadi *benchmark* atau validasi program.

Berdasarkan Tabel 1, berat struktur yang didapatkan lebih ringan jika dibandingkan dengan hasil peneliti-peneliti terdahulu, dimana menghasilkan berat struktur sebesar 2122,622 kg. Nilai perpindahan dan tegangan masing-masing batang dapat dilihat pada Tabel 1.

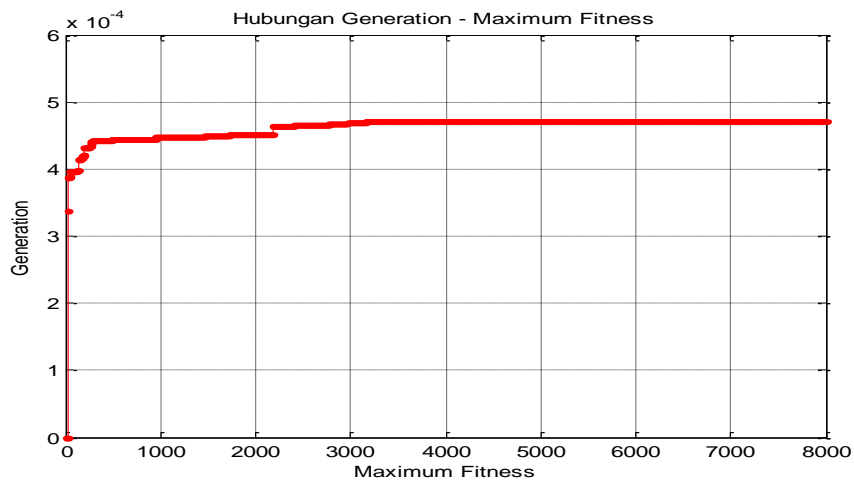
Nilai-nilai optimasi yang digunakan antara lain: jumlah populasi dalam satu generasi=25 maksimum generasi=8000, *crossover rate* = 0,8, *mutation rate* = 0,1, jumlah *node* = 5. *Node* yang dioptimasi adalah node 5, dengan batas perpindahan koordinat *x* adalah sebesar -20 mm dan +20 mm setiap generasi, serta batas perpindahan koordinat *y* adalah dari *y* = 0 sampai *y* = 9144 mm. Ukuran profil aluminium yang digunakan sebanyak 16 buah profil dengan ukuran penampang yang lebih kecil dibandingkan ukuran penampang yang diambil pada percobaan pertama, perpindahan maksimum yang dihasilkan yaitu sebesar 50,7995 mm. Kondisi tumpuan adalah sendi pada *node* 1 dan 2 sesuai dengan *benchmark problem* yang dikemukakan di atas. Validasi hasil optimasi ini menggunakan sub-sub program untuk perhitungan rangka batang ruang yang dikembangkan dalam Arfiadi (2013), sehingga dari nilai letak-letak *node*, ukuran penampang, dan topologi struktur dimasukkan ke dalam sub-sub program tersebut untuk dicocokkan dengan program optimasi yang telah dibuat.



Gambar 6. Hasil optimasi dengan jumlah populasi=25 dan maksimum generasi=8000

Tabel 1. Hasil optimasi ukuran penampang, tegangan, berat batang dengan menggunakan *hybrid genetic algorithm*

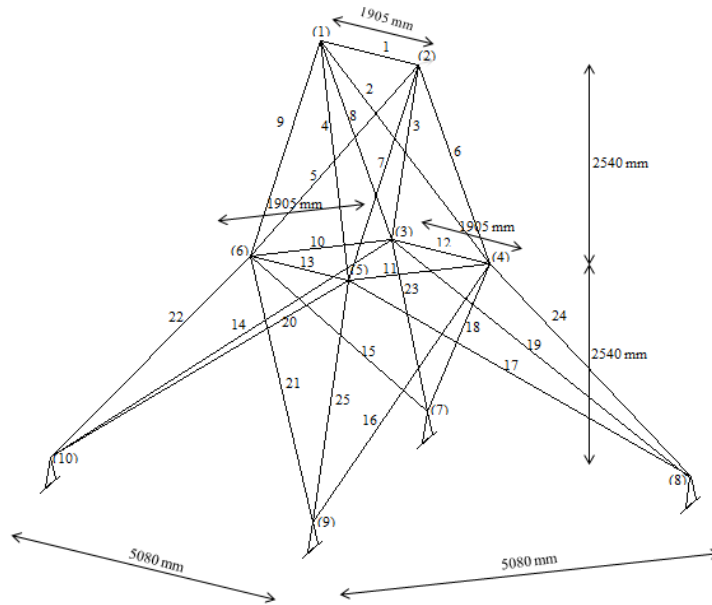
No Batang	Letak Node Awal (mm)	Letak Node Akhir (mm)	Ukuran (mm ²)	Panjang (m)	Massa (kg)	Tegangan (N/mm ²)	Perpindahan Maksimum (mm)
2	(0;0)	(9144;0)	4620	9144	116.9349	-96.4	48.9446
3	(0;0)	(18288;0)	10900	18288	551.7709	45.3	50.7995
4	(0;0)	(9650;7789)	12200	12401	418.7768	41.8	18.8784
5	(0;9144)	(9144;0)	4620	12931.6	165.371	-136.3	43.6491
7	(0;9144)	(9650;7789)	14700	9744.7	396.5079	61.2	18.3884
10	(9650;7789)	(18288;0)	14700	11631	473.2607	45.2	45.7754
Berat Total Struktur (kg)					2122.622	136.3	50.7995
Best Fitness					0.000471	Tegangan Maksimum	Perpindahan Maksimum



Gambar 7. Kurva peningkatan nilai *fitness* untuk *benchmark problem*

Optimasi rangka batang ruang 25 batang

Struktur rangka batang ruang yang digunakan seperti pada struktur rangka batang ruang dengan 25 batang yang digunakan oleh Rajeev dan Krisnamoorthy (1992) yang biasanya dijadikan acuan untuk mengoptimasi suatu struktur rangka batang ruang. Berat material yang digunakan adalah $2767,990 \text{ kg/m}^3$ dengan modulus elastisitas (E) adalah $68,95 \text{ MPa}$. Luas penampang (ukuran penampang) dari dua puluh lima batang tersebut dikategorikan dalam 8 bagian ukuran penampang: (1) A_1 , (2) A_2 - A_5 , (3) A_6 - A_9 , (4) A_{10} - A_{11} , (5) A_{12} - A_{13} , (6) A_{14} - A_{17} , (7) A_{18} - A_{21} , dan (8) A_{22} - A_{25} .



Gambar 8. Rangka batang ruang 25 batang

Beban yang bekerja pada struktur dapat dilihat pada tabel 2. Perpindahan maksimum dan tegangan maksimum yang diijinkan adalah masing-masing sebesar $8,89 \text{ mm}$ untuk setiap *node* dan $275,80 \text{ MPa}$ untuk setiap batang. Ukuran penampang yang digunakan adalah merupakan variabel diskrit dengan luas penampang bervariasi dari $0,1 \text{ inch}^2$ ($0,6452 \text{ cm}^2$) sampai $3,4 \text{ inch}^2$ ($21,94 \text{ cm}^2$). Fungsi objektif pada paper ini adalah meminimalkan berat struktur rangka batang ruang tersebut.

Tabel 2. Beban yang bekerja pada struktur

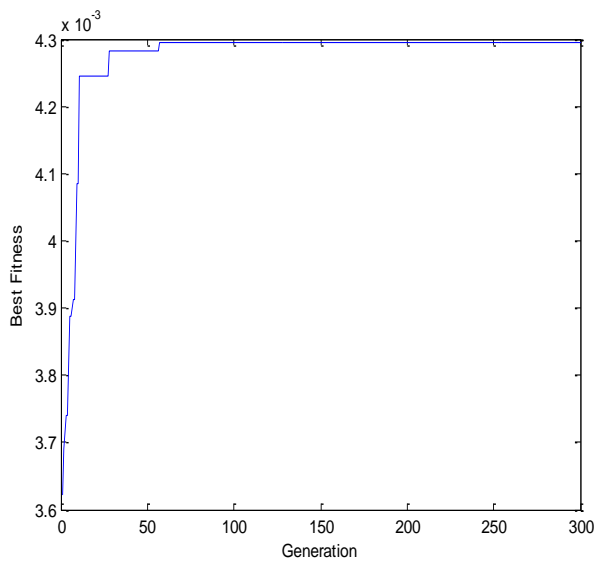
No Nodal	P_x (kN)	P_y (kN)	P_z (kN)
1	4,45	-44,5	-44,5
2	0	-44,5	-44,5
3	2,22	0	0
6	2,672	0	0

Terdapat 3 hasil yang akan didapatkan dalam mengoptimasi struktur di atas, hasil pertama yaitu dengan menggunakan algoritma genetika biner untuk mengoptimasi ukuran penampang, pada kasus ini hanya ukuran penampang saja yang akan dioptimasi. Hasil kedua yaitu dengan menggunakan algoritma genetika biner untuk mengoptimasi ukuran penampang dan bentuk struktur dan hasil ketiga yaitu dengan menggunakan algoritma genetika biner untuk mengoptimasi ukuran penampang, topologi, dan bentuk struktur. Optimasi bentuk struktur yang dimaksud tidak mengubah konfigurasi dari struktur tersebut hanya letak dari *nodes* tertentu yang diijinkan untuk berpindah.

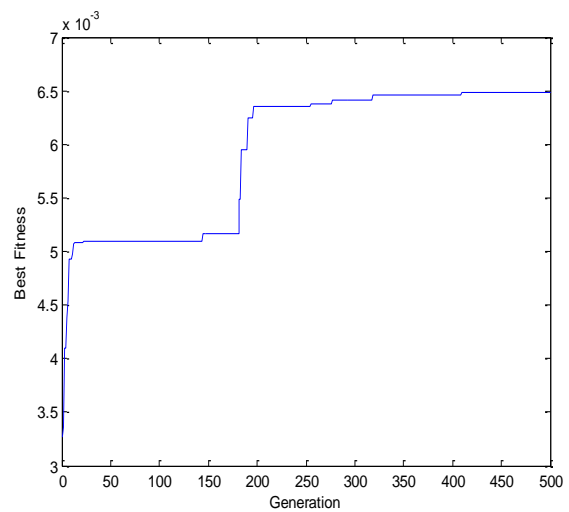
Pada hasil yang pertama dapat dilihat bahwa berat struktur yang didapatkan lebih ringan jika dibandingkan dengan Harun Alrasyid dkk. (2008) sedangkan dengan hasil yang lainnya hampir mendekati, hasil lain yang lebih ringan dibandingkan dengan hasil yang didapatkan karena nilai perpindahan maksimumnya melampaui perpindahan maksimum yang diijinkan.

Tabel 3. Hasil optimasi struktur rangka batang ruang dengan menggunakan algoritma genetika biner

Metode	Berat (kg)	A ₁ (cm ²)	A ₂ (cm ²)	A ₃ (cm ²)	A ₄ (cm ²)	A ₅ (cm ²)	A ₆ (cm ²)	A ₇ (cm ²)	A ₈ (cm ²)	Perpindahan Maksimum (cm)
Chai & Thierut (1993)	221,010	0,645	0,645	21,935	0,645	12,903	6,452	4,516	21,935	0,924
Rajeev & Krishnamoorthy (1992)	247,581	0,645	11,61	14,839	1,29	0,645	5,161	11,61	19,355	0,909
Duan (1986)	255,254	0,645	11,61	16,774	0,645	0,645	5,161	13,548	16,774	0,914
Der Shin Juang (2003)	220,053	0,645	1,935	21,935	0,645	15,696	6,452	1,935	21,935	0,962
Harun Alrasyid, dkk (2008)	238,870	0,645	3,870	20,64	0,645	5,805	6,450	9,030	19,350	0,888
Algoritma Genetika Biner	232,827	0,645	5,806	19,355	0,645	10,968	7,097	5,806	20,000	0,887



Gambar 9. Kurva peningkatan nilai *fitness* untuk kasus pertama



Gambar 10. Kurva peningkatan nilai *fitness* untuk kasus kedua

Kasus kedua, algoritma genetika *hybrid* digunakan untuk mendapatkan variabel yang optimum untuk ukuran penampang dan bentuk struktur, pada kasus kedua ini optimasi bentuk struktur tidak akan mengubah konfigurasi struktur seperti yang telah dijelaskan di atas. *Nodes* yang akan dioptimasi pada kasus ini adalah node-3 dan node-5 masing-masing untuk arah-y. Ukuran penampang dan penggolongan ukuran penampang yang digunakan masih sama dengan kasus pertama. Pada tabel 4 dapat dilihat hasil struktur rangka batang ruang yang telah dioptimasi dengan perpindahan maksimum sebesar 0,88 cm. Kurva peningkatan nilai *fitness* dapat dilihat pada Gambar 10. Parameter-parameter optimasi antara lain: maksimum generasi adalah 500 dengan 15 populasi, nilai *crossover* adalah 0,85 dan *mutation rate* adalah 0,1. Validasi hasil optimasi ini menggunakan sub-sub program untuk perhitungan rangka batang ruang yang dikembangkan dalam Arfiadi (2013), sehingga dari nilai letak-letak *node*,

ukuran penampang, dan topologi struktur dimasukkan ke dalam sub-sub program tersebut untuk dicocokkan (*match*) dengan program optimasi yang telah dibuat.

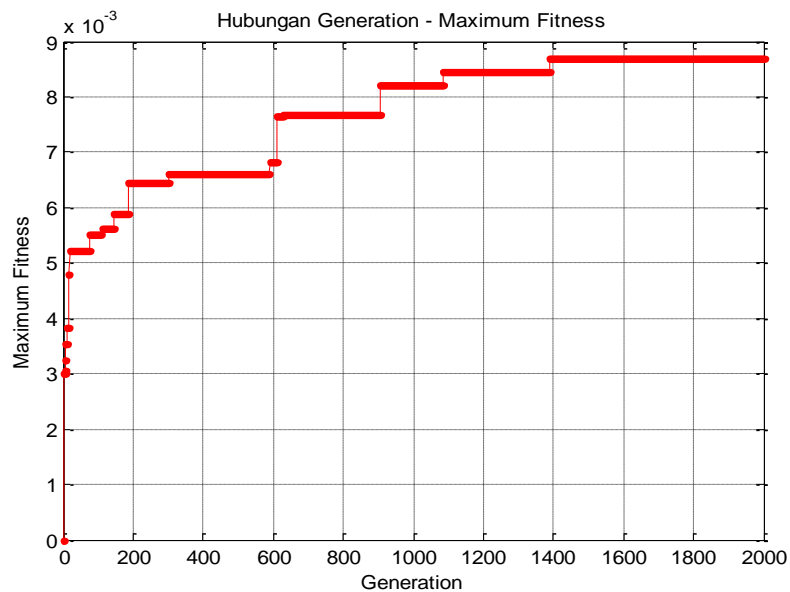
Tabel 4. Koordinat, ukuran penampang, panjang, dan massa masing-masing batang serta perpindahan maksimum struktur kasus kedua

Batang	Koordinat Awal (mm)	Koordinat Akhir (mm)	Ukuran (mm ²)	Panjang (mm)	Massa (kg)	Perpindahan Maksimum (mm)
1	(3493;2540;5080)	(1588;2540;5080)	64,5	1905	0,3401	
2	(3493;2540;5080)	(1588;3493;2540)	580,6	3314,8	5,3272	
3	(1588;2540;5080)	(3493;6142;2540)	580,6	4801,4	7,7163	
4	(3493;2540;5080)	(1588;960,1;2540)	580,6	3546,4	5,6994	
5	(1588;2540;5080)	(3493;1588;2540)	580,6	3314,8	5,3272	
6	(1588;2540;5080)	(1588;3493;2540)	1096,8	2712,7	8,2356	
7	(1588;2540;5080)	(1588;960,1;2540)	1096,8	2991,3	9,0814	
8	(3493;2540;5080)	(3493;6142;2540)	1096,8	4407,3	13,3803	
9	(3493;2540;5080)	(3493;1588;2540)	1096,8	2712,7	8,2356	
10	(3493;6142;2540)	(3493;1588;2540)	580,6	4554,2	7,3190	
11	(1588;3493;2540)	(1588;960,1;2540)	580,6	2532,4	4,0698	
12	(3493;6142;2540)	(1588;3493;2540)	193,5	3326,3	1,7816	
13	(1588;960,1;2540)	(3493;1588;2540)	193,5	2005,6	1,0742	8,8073
14	(3493;6142;2540)	(5080;0;0)	193,5	6833,2	3,6599	
15	(3493;1588;2540)	(5080;5080;0)	193,5	4601	2,4643	
16	(1588;3493;2540)	(0;0;0)	193,5	4601	2,4643	
17	(1588;960,1;2540)	(0;5080;0)	193,5	5093,6	2,7282	
18	(1588;3493;2540)	(5080;5080;0)	322,6	4601	4,1085	
19	(3493;6142;2540)	(0;5080;0)	322,6	4447,1	3,9711	
20	(1588;960,1;2540)	(5080;0;0)	322,6	4423,9	3,9503	
21	(3493;1588;2540)	(0;0;0)	322,6	4601	4,1085	
22	(3493;1588;2540)	(5080;0;0)	1354,8	3390	12,7127	
23	(3493;6142;2540)	(5080;5080;0)	1354,8	3177,9	11,9174	
24	(1588;3493;2540)	(0;5080;0)	1354,8	3390	12,7127	
25	(1588;960,1;2540)	(0;0;0)	1354,8	3145,4	11,7955	
Berat Struktur Rangka Batang Ruang					154,1467	

Untuk kasus ketiga, ketiga optimasi akan dilakukan secara bersamaan untuk menghasilkan struktur yang optimum. Penggolongan ukuran penampang tidak digunakan lagi, sehingga masing-masing batang mempunyai nilai ukuran penampang yang boleh berbeda-beda satu dengan yang lain tetapi ukuran penampang yang digunakan masih sama dengan kasus sebelumnya yaitu bervariasi antara 0,1 inch² (0,6452 cm²) sampai 3,4 inch² (21,94 cm²). Optimasi topologi sangat berguna dalam mengurangi berat struktur, karena batang yang “tidak perlu” akan dihilangkan sesuai dengan prosedur yang telah dijelaskan di atas. Letak koordinat, panjang batang, ukuran penampang batang, massa batang, dan perpindahan maksimum struktur setelah dioptimasi untuk kasus ketiga ini dapat dilihat pada Tabel 5 serta kurva peningkatan nilai *fitness* dapat dilihat pada Gambar 11. Parameter-parameter optimasi yang digunakan adalah maksimum generasi = 2000 dengan 15 populasi, nilai *crossover* adalah 0,85 dan *mutation rate* adalah 0,1.

Tabel 5. Koordinat, ukuran penampang, panjang, dan massa masing-masing batang serta perpindahan maksimum struktur kasus ketiga

Batang	Koordinat Awal (mm)	Koordinat Akhir (mm)	Ukuran (mm ²)	Panjang (mm)	Massa (kg)	Perpindahan Maksimum (mm)
1	(3493;2540;5080)	(1588;2540;5080)	451,6	1905	2,3813	
6	(3493;2540;5080)	(5080;5080;0)	451,6	5897,3	7,3718	
7	(3493;2540;5080)	(0;5080;0)	580,6	6667,5	10,7153	
8	(3493;2540;5080)	(0;0;0)	580,6	6667,5	10,7153	
9	(3493;2540;5080)	(5080;0;0)	838,7	5897,3	13,6907	
13	(1588;2540;5080)	(3493;1588;2540)	193,5	3314,8	1,7754	
15	(1588;2540;5080)	(0;5080;0)	1096,8	5897,3	17,9038	
16	(1588;2540;5080)	(0;0;0)	1290,3	5897,3	21,0624	
19	(3493;3929;2540)	(1588;1245;2540)	64,5	3292	0,5877	
20	(3493;3929;2540)	(3493;1588;2540)	64,5	2341,9	0,4181	8,6160
21	(3493;3929;2540)	(5080;5080;0)	451,6	3208,7	4,0110	
22	(3493;3929;2540)	(0;5080;0)	193,5	4469,1	2,3937	
24	(3493;3929;2540)	(5080;0;0)	64,5	4940,8	0,8821	
29	(1588;3493;2540)	(0;0;0)	709,7	4601	9,0384	
35	(1588;1245;2540)	(5080;0;0)	64,5	4494,2	0,8024	
37	(3493;1588;2540)	(0;5080;0)	451,6	5540	6,9251	
43	(0;5080;0)	(0;0;0)	322,6	5080	4,5362	
Berat Struktur Rangka Batang Ruang					115,2282	



Gambar 11. Kurva peningkatan nilai *fitness* kasus ketiga

DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi, Y dan Hadi, MNS (2001). Optimal direct (static) output feedback controller using real coded genetic algorithms, *Computers and Structures* 79(17), 1625-1634.
- Arfiadi, Y dan Hadi, MNS (2011). Optimum placement and properties of tuned mass dampers using hybrid genetic algorithms, *Int. J. Optimization in Civil Engineering*, Vol. 1, 167-187.
- Arfiadi, Y. (2013). "Laporan Penelitian: Pengembangan Program Bantu Realin untuk Pembelajaran Metode Matriks Kekakuan dengan FREEMAT". Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Cai, J. B., and Thiereut, G. (1993). "Discrete Optimization of Structures Using an Improved Penalty Function Method", *Engineering Optimization*, Vol. 21, No. 4, pp.293-306.
- Deb, K. and Gulati, S. (2001). "Design of Truss-Structures for Minimum Weight Using Genetic Algorithms." *Finite Elements in Analysis and Design*, 37, 447-465.
- Der-Shin Juang, Yuan-Ta Wu, Wei-Tze Chang (2003), *Optimum Design of Truss Structure Using Discrete Lagrangian Method* ,Journal of The Chinese Institute Of Engineering.
- Duan, M. Z. (1986). "An Improved Templeman's Algorithm for the Optimum Design of Trusses with Discrete Member Sizes", *Engineering Optimization*, Vol. 9, No.4, pp. 303-312.
- Galante, M. (1996). "Genetic Algorithms ss an Approach To Optimize Real-World Trusses". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Volume 39, issue 3. Pages 361-382.
- Goldberg. D.E, Samtani, M.P. (1986). Engineering optimization via genetic algorithm, in Will KM. (Eds), *Proceeding of the 9th Conference on Electronic Computation*, ASCE, Feb 1986, 471-82.
- Goldberg, D.E. (1989). "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.", Addison-Wesley, Reading, MA.
- Hajela, P. Lee, E. (1995). "Genetic Algorithms in Truss Topological Optimization". *International Journal of Solids and Structures*. Volume 32, issue 22. Pages 3341-3357.
- Harun Alrasyid, Pujo Aji, Tawio (2008). "Optimasi Struktur Rangka Batang Dengan Algoritma Genetika". Seminar Nasional Teknik Sipil IV, Institut Teknologi Surabaya.
- Li, L., Huang, Z., Liu, F. (2006). "An Improved Particle Swarm Optimizer for Truss Structure Optimization". 2006 *International Conference on Computational Intelligence and Security*. Volume 1. Pages 924-928.
- Lin, C.-Y., and Hajela, P. (1993). "Genetic Search Strategies in Large Scale Optimization", *proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/AHS/ASC SDM Conference, La Jolla, California*, pp. 2437-2447, 1993.
- Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C.S. (1992) "Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms." *Journal of Structural Engineering*, ASCE 118(5), 1233-1250.
- Sakamoto, J., and Oda, J. (1993). "A Technique of Optimal Layout Design for Truss Structures Using Genetic Algorithm." *Proc., 35th AIAA/ASCE/ASME/AHS SDM Conf., ASCE, New York, N.Y.*, 2402-2408.