

Optimasi Struktur Rangka Batang Menggunakan Metode Algoritma Genetika Dengan Kendala Tegangan Dan Probabilitas Kegagalan

Truss Structure Optimization Using Genetic Algorithms Method with Stress and Probabilities of Failure Constraints

Mahadi Kurniawan¹

¹ Dosen Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Jl. Kaharuddin Nasution No. 113, Pekanbaru, Riau

* Corresponding author : mahadi.kurniawan@eng.uir.ac.id

Tel.: +62-82320201313; fax.: -

Received: Feb 11, 2019; Accepted: Apr 28, 2019.

DOI: 10.25299/saintis.2019.vol19(1).3043

Abstrak

Setiap struktur rekayasa harus memenuhi suatu kriteria tertentu agar dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Makalah ini menyajikan hasil kajian dari struktur rangka batang (*truss*) yang harus memenuhi kriteria optimal, yaitu berbiaya terendah namun berfungsi maksimal. Rangka batang yang ditinjau dalam penelitian ini merupakan struktur rangka baja statis tak tentu secara internal maupun eksternal yang mengalami sistem pembebanan jamak (*multi load-systems*). Biaya atau harga struktur direpresentasikan oleh volume bahan struktur sedang fungsi maksimal ditampilkan dalam tegangan yang tinggi dalam batas-batas tegangan yang diijinkan. Kekuatan bahan baja ditinjau sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi *Log Normal*. Selain tegangan, struktur juga harus memenuhi kriteria probabilitas kegagalan $P_f \leq 10^{-3}$. Nilai tersebut harus dipenuhi secara lokal oleh setiap elemen struktur maupun oleh keseluruhan struktur secara global. Kompleksitas masalah optimasi sangat bergantung pada banyaknya variabel desain yang ditinjau. Oleh karena itu, selain elemen dengan variabel desain tunggal, juga ditinjau elemen dengan desain variabel ganda. Penyelesaian masalah optimasi struktur pada umumnya diselesaikan secara iteratif dengan menerapkan pemrograman matematik (*mathematical programming*). Cara demikian adalah tidak mudah dan biasanya memberikan hasil yang tidak terpercaya (*unreliable*), bahkan sering kali tidak memberikan hasil sama sekali akibat terjebaknya proses iterasi yang diterapkan. Untuk mengatasi hal tersebut, disini diterapkan Algoritma Genetika yang melakukan iterasi secara stokastik. Dalam penelitian ini Algoritma Genetika selalu konvergen ke struktur optimum yang sama. Dengan demikian maka struktur optimum yang dihasilkan merupakan solusi yang terpercaya (*reliable*).

Kata Kunci : optimasi struktur, Algoritma Genetika, variabel desain, distribusi *Log Normal*, probabilitas kegagalan.

Abstract

Engineering structures need to satisfy certain criteria such that it may function properly. This paper presents the results of a study on trusses which need to satisfy optimal conditions, .i.e. lowest cost possible with maximal performance. The trusses considered were statically indeterminate steel structures with multi-system of loading. The cost is here represented by the material volume of the structure and the maximal performance is reflected by the high working stresses within allowable stress limits. The material strength was modeled as a random variable with a Log Normal distribution. Beside stresses, the structures are also required to meet a failure probability of $P_f = 10^{-3}$, which may occur locally within the elements as well as globally on the structure as a whole. The complexity of optimization problems depends in general on the number of the considered variables. The larger the number of variables considered, the more complicated becomes the solution process. Therefore, cases of single variable elements as well as multi variables ones were considered in this study. Optimization problems are usually solved applying iterative procedures, frequently resorting to mathematical programming. In these procedures the process usually converges to unreliable solutions; it even may completely bogged down with no solution at all. To circumvent this problem, iteration was carried out applying Genetic Algorithms where the process proceeds in a stochastic manner. Genetic Algorithms usually deliver reliable solutions.

Keyword: optimization of structures, Genetic Algorithm, design variables, Log Normal distribution, probability of failure.

PENDAHULUAN

Solusi Rekayasa merupakan solusi optimum, yaitu solusi yang 'terbaik' dari semua solusi yang ada, tanpa melanggar batasan atau kendala yang berlaku. Solusi yang terbaik biasanya direfleksikan oleh biaya atau harga struktur yang termurah. Dalam penelitian ini harga struktur direpresentasikan oleh volume bahan dari struktur, sedangkan tegangan ijin elemen serta risiko kegagalan (probabilitas keruntuhan) menjadi batasan atau kendala yang harus dipenuhi struktur.

Struktur yang demikian biasanya secara singkat dikenal sebagai struktur optimum.

Struktur optimum biasanya dapat diperoleh secara iteratif dengan menerapkan *mathematical programming*, terutama pada masalah optimalisasi *nonlinear*. Prosedur iteratif dalam pemrograman matematik sering kali konvergen pada solusi optimum yang keliru. Hal ini disebabkan oleh proses iterasi yang terjebak pada suatu titik tertentu, malah juga sering tidak memberikan solusi sama sekali. Oleh karena itu, solusi optimum yang

diperlukan dicari melalui cara iterasi dengan menerapkan Algoritma Genetika (GA).

AG tidak dibangun atas dasar konsep matematika. Algoritma tersebut mengalir sesuai Teori Evolusi Darwin (Holland, 1992) yang berdasar pada azas 'survival of the fittest' dimana individual yang 'kuat' akan berkembang biak melalui perkawinan silang dengan anggota cakup yang lainnya. Keturunan hasil perkawinan silang tersebut kemudian akan mendominasi populasi dari generasi-generasi berikutnya. Individual yang lemah akan sirna dan tidak lagi mempengaruhi kondisi populasi asalnya. Oleh karena itu dalam Algoritma Genetika tidak diperlukan derivatif berbagai fungsi sebagaimana dijumpai dalam cara pemrograman matematika konvensional. Pendekatan AG adalah stokastik, yaitu membangkitkan nilai acak (*random*) bagi variabel yang mengendalikan nilai fungsi yang mendefinisikan masalahnya. Selain itu Algoritma Genetika juga mengakomodasi proses kawin silang dan mutasi yang terjadi secara acak, masing-masing berdasarkan probabilitas yang berlaku. Kelebihan GA adalah biasa berhasil memberikan solusi yang andal terutama dalam kasus kompleks (rumit) dan sukar diselesaikan dengan metode konvensional lainnya [1].

Pengkajian awal dalam penelitian ini menunjukkan bahwa AG adalah sangat serbaguna (*versatile*) dalam penerapannya. Hal tersebut tampak dalam beberapa kasus berikut:

Nurwadi, F.X.N., (1996), menerapkan GA dalam optimasi bentuk cangkang optimum [2]. Penulis yang sama (2006) juga melakukan pengkajian kasus deterministik rangka batang optimum [3]. Suharjanto (2008) melakukan penelitian optimasi balok berlubang (*castellated beams*) yang menghasilkan balok optimum dengan lubang eliptik yang berdiri [4].

Berdasarkan pada hasil pengkajian awal diatas, dimana masalah struktur adalah deterministik, maka penelitian ini meninjau kasus optimasi struktur rangka batang sebagai masalah probabilistik.

RUMUSAN MASALAH

Dalam penelitian ini ditinjau suatu struktur rangka batang baja statis tak tentu yang ditumpu pada titik A, C, dan D, seperti tampak pada Gambar 1. Struktur tersebut dibebani dengan gaya $P_B = 15$ KN di B dan $P_F = 15$ KN di F. Sebagai variabel desain disini diambil $x_i =$ luas potongan elemen batang; $i =$ nomor elemen. Masalah optimasi struktur tersebut dapat dipresentasikan dalam bentuk matematika sebagai berikut:

$$\underset{x \in X}{\text{MIN}} F(x); \quad (1)$$

Yang memenuhi kendala,

$$0 \leq \sigma_i \leq \bar{\sigma}_i; \quad i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$P_{fi} \leq 10^{-3}; \quad i = 1, \dots, n; \quad (3)$$

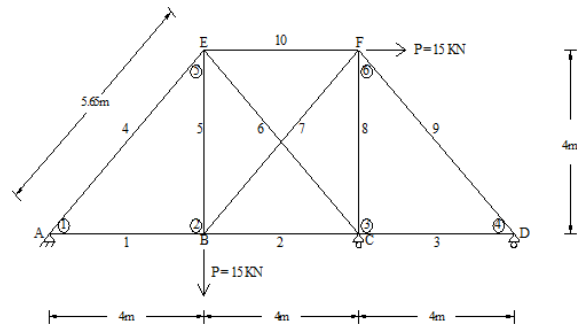
$$\max \{P_{fi} \mid i = 1, 2, \dots, n\} \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{fi}); \quad (4)$$

dimana,

$$F(x) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot L_i; \quad (5)$$

Keterangan :

- $F(x)$ = fungsi tujuan;
- x_i = luas penampang batang i ;
- L_i = panjang batang i ;
- σ_i = tegangan yang bekerja dalam elemen i ;
- $\bar{\sigma}_i$ = tegangan ijin elemen i ;
- i = nomor elemen batang;
- n = jumlah elemen;
- P_{fi} = probabilitas gagal elemen i ;
- P_f = probabilitas gagal struktur global.



Gambar 1. Struktur Rangka Batang (Truss)

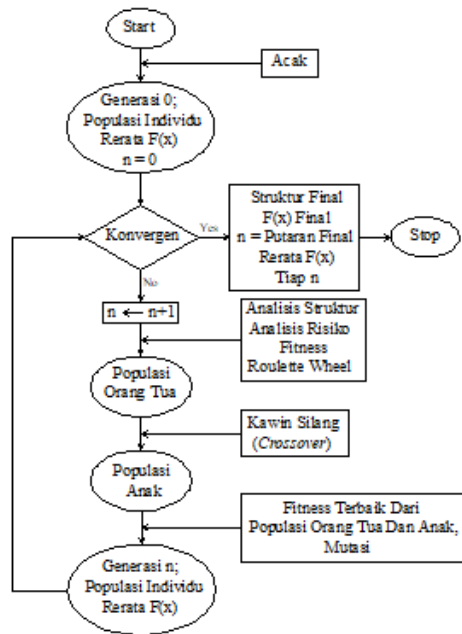
Dalam penelitian ini, struktur terbuat dari baja BJ 37 dengan nilai tegangan leleh $\sigma_y = 240$ MPa, tegangan ijin $\bar{\sigma} = 160$ MPa, dan faktor keamanan (SF) = 1,5 (SNI 03-1729-2002).

METODOLOGI

Algoritma Genetika

Garis besar AG dapat ditampilkan sebagai bagan alir seperti tampak pada Gambar 2. Dalam gambar tersebut tampak berlakunya proses iterasi. Evolusi struktur terjadi sebagai akibat dari berlakunya iterasi dalam algoritma tersebut. Perubahan kualitas solusi optimum yang makin meningkat tercermin dari makin meningkatnya nilai rerata *fitness* dari setiap generasi secara berturut-turut. Generasi awal (*Generasi 0*), yang berpopulasi 50 individu, dibangkitkan sepenuhnya secara acak, sedangkan setiap generasi berikutnya terdiri dari 30 individu yang dibangkitkan menggunakan roda roulette yang mengacu pada struktur *fitness* generasi sebelumnya. Individu yang memenuhi syarat probabilitas melakukan kawin silang dengan individu lainnya. Perkawinan tersebut menghasilkan dua keturunan. Kemudian individu keturunan dengan nilai *fitness* yang terbaik akan bertahan hidup menggantikan individu dari kelompok orang tua yang bernilai *fitness* buruk. Individu dengan karakteristik baru dapat diperoleh

dari mutasi individu-individu tertentu sesuai probabilitas mutasi yang berlaku.



Gambar 2. Diagram Alir Metode Algoritma Genetika *Populasi dan Individu*

Dalam alam, individu merupakan suatu organisme yang memiliki karakteristik tertentu. Karakteristik tersebut dikandung oleh gen dalam kromosom organisme tersebut. Dalam Algoritma Genetika (AG), individu adalah suatu model yang mewakili suatu masalah tertentu. Berbagai karakteristik dari masalah tersebut juga direpresentasikan oleh berbagai gen dalam suatu kromosom, yang juga dikenal sebagai *Genetic String*. Individu tersebut juga dapat mewakili model dari hampir semua masalah optimasi yang dihadapi manusia, misalnya masalah manajemen, kontrol, perjalanan (*travelling salesman*), struktur, energi dan lain sebagainya [3]. Pada penelitian ini akan ditinjau masalah optimasi struktur pada rangka baja (*Truss*) 2 dimensi dengan kondisi statis tertentu.

Karakteristik suatu struktur dapat tampil sebagai geometri struktur secara global ataupun bentuk elemen lokal, kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffness*), stabilitas, volume atau berbagai sifat (*property*) dari struktur.

Misalkan luasan (*area*) pada Gambar 1 dari elemen struktur tersebut menjadi variabel desain bebas A_i , $i = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$ maka masing-masing parameter merupakan gen dari individu struktur. Nilai A_i bagi setiap individu pada umumnya berbeda-beda.

Misalkan tinjau struktur rangka batang tersebut yang memiliki luas elemen sebagai berikut:

$$(A_i) = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10})$$

$$(A_i) = (2,1,4,9,7,5,6,10,8,3)$$

Dimana subskrip i merujuk pada nomor elemen (batang) struktur.

Maka individu ke-1 memiliki suatu kromosom dengan tujuh gen. Masing-masing gen direpresentasikan oleh nilai-nilai tersebut. Maka kromosom atau *genetic string* struktur tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

Individu 1, memiliki kromosom :

2	1	4	9	7	5	6	10	8	3
---	---	---	---	---	---	---	----	---	---

Gen dapat direpresentasikan dengan bilangan decimal, biner, huruf besar, huruf kecil, koma, tanda baca, atau berbagai simbol-simbol lainnya. Bilangan biner sangat populer untuk dipergunakan sebagai representasi karakteristik suatu masalah.

Dalam Algoritma Genetika (AG) ditinjau suatu populasi yang terdiri dari sejumlah individu. Berapa besar populasi yang memadai untuk keperluan proses Algoritma Genetika (AG) sangat tergantung pada masalah yang ditinjau. Pada masalah optimisasi struktur sering ditinjau populasi yang terdiri dari 30 individu. Namun berapa besar populasi yang terbaik biasanya diperoleh dari beberapa percobaan. Jadi setiap individu mewakili sebuah struktur dengan karakteristik yang khas individu tersebut. Karakteristik khas suatu individu dinyatakan dalam kromosom individu tersebut.

Kualifikasi Individu

Setiap individu mewakili satu struktur dengan variabel desain yang dibangkitkan secara acak. Dengan demikian ada kemungkinan bahwa struktur tersebut tidak layak (*not feasible*). Artinya struktur tersebut tidak memenuhi persyaratan yang diberikan sehingga kemungkinan besar akan runtuh atau gagal (*failed*). Individu yang mewakili struktur yang runtuh akan memiliki nilai fitness yang buruk (kecil). Nilai fitness diberikan oleh persamaan sebagai berikut [3]:

$$Fit = \frac{C}{\phi} ; \quad (6)$$

Keterangan :
 Fit = fitness individu;
 C = konstan = 10^8

$$\phi = F(x) + \left\langle r_1 \sum_{i=1}^j (g_i(x))^2 + r_2 \sum_{i=1}^k (h_i(x))^2 \right\rangle ; \quad (7)$$

ϕ = fungsi penalti;

g_i = fungsi kendala yang berlaku dalam elemen
 h_i = fungsi kendala yang berlaku pada struktur secara global;

r_1, r_2 = konstanta signifikansi

Persamaan (7), yaitu fungsi penalti, dipergunakan secara penuh bagi struktur yang tidak layak. Suku dalam tanda kurung, yaitu suku terakhir, dalam persamaan tersebut merupakan penalti bagi struktur yang melanggar kendala. Bagi struktur yang layak, suku yang ada didalam tanda kurung diabaikan. Konstanta $r_1 = 10^4$ dan $r_2 = 10^5$ sengaja diambil bilangan besar agar suku penalti menjadi signifikan serta mendominasi nilai fungsi ϕ bila terjadi pelanggaran. Nilai r_1 dan r_2 ditentukan dengan coba-coba. Nilai konstanta C juga ditentukan dengan cara coba-coba. Nilai C digunakan dengan maksud agar Fit tidak merupakan angka yang terlalu kecil atau besar, sehingga lebih mudah dalam penanganannya.

Seleksi Alamiah (Natural Selection)

Teori Darwin “Survival of the Fittest” merupakan dasar dalam seleksi alamiah. Individu-individu dalam suatu populasi saling bersaing. Makin fit suatu individu, maka akan semakin besar pula peluangnya untuk tetap hidup. Individu yang paling lemah kemungkinan besar akan musnah dari populasi, karena kalah berkompetisi dengan individu-individu lain yang lebih fit.

Roda Rollet (Roulette Wheel) merupakan metode yang paling sering dipakai pada Algoritma Genetika (AG) untuk menentukan individu-individu yang tetap tinggal di populasi [4].

Cara kerja metode tersebut dalam penelitian ini adalah :

- Menghitung nilai fitness dari setiap individu $f_{fitness}(i)$. Pada metode Algoritma Genetika (AG) fungsi $fitness$ merupakan gabungan dari fungsi tujuan (pada penelitian ini fungsi tujuan adalah volume minimum struktur) dan $constraint$ (pada penelitian ini yang menjadi kendala adalah risiko),
- Menghitung nilai $total fitness$ ($Tot_{fitness}(i)$) dari semua individu,
- Menghitung $running sum of fitness$ ($run_f(i)$) yang merupakan akumulasi dari nilai $f_{fitness}$ yang berurutan,
- Membangkitkan ($generate$) bilangan $random$ antara 1 sampai dengan $total fitness$ untuk masing-masing $running sum of fitness$ tersebut,
- Dari bilangan $random$ yang dihasilkan, selanjutnya ditentukan individu mana yang terpilih dalam proses seleksi.

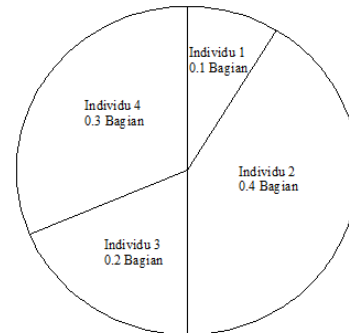
Peluang suatu individu untuk dipilih pada putaran roda rollet diwakili oleh luas bagiannya di roda rollet. Luas ini bergantung pada nilai fitness dan total nilai fitness seluruh populasi. Tabel 1 memperlihatkan contoh empat elemen individu dalam sebuah populasi dengan kode string, nilai fitness dan luas bagian masing-masing individu. Roda rollet dengan luas bagian masing-masing individu sesuai Tabel 1 diperlihatkan pada Gambar 3. Roda rollet diputar sebanyak jumlah individu

dalam populasi untuk memilih individu yang tetap tinggal di populasi.

Tabel 1. Contoh Seleksi Alamiah

Individu	String	Fitness	Luas Bagian = Fitness / Total Fitness
1	0000110	10	0.1
2	0111100	40	0.4
3	1001001	20	0.2
4	1110011	30	0.3

Total Fitness = 100



Gambar 3. Roda Roulette (Roulette Wheel) Pada Seleksi Alamiah

Pada Gambar 3 tampak Individu 2 mempunyai luas bagian terbesar karena nilai fitnessnya terbesar, sehingga mempunyai peluang terbesar untuk dipilih. Meskipun demikian individu 2 masih mempunyai peluang, walaupun kecil, untuk tidak terpilih, dan ini merupakan salah satu kelemahan memakai roda rollet pada seleksi alamiah. Putaran roda rollet kadang-kadang memilih individu tertentu paling sering, ini mengganggu proses optimasi, karena menyebabkan ragam karakter individu dalam populasi menjadi hampir seragam dan mengakibatkan konvergen prematur. Hilangnya individu-individu yang cukup fit karena tidak terpilih oleh putaran roda rollet juga merupakan kelemahan proses seleksi alamiah memakai putaran roda rollet.

Kawin Silang

Setiap individu mewakili suatu struktur dengan karakteristik khas yang direpresentasikan oleh variable design yang dibangkitkan secara acak. Dalam kasus yang ditinjau di sini, karakteristik tersebut dinyatakan oleh 10 variabel desain x_i yang dibangkitkan secara acak. Sebagai karakter individu, ke-10 variabel desain tersebut diatur dalam satu baris. Baris tersebut merupakan satu kromosom yang terdiri dari 10 gen. Agar individu dapat melakukan kawin silang, maka angka numerik gen, perlu ditransformasikan kedalam bentuk deret biner. Selain menyatakan nilai variabel desain, deret biner tersebut juga harus mengakomodasi kebutuhan akan presisi dari variabel desain. Untuk itu panjang angka biner atau jumlah bit yang

ditinjau ditentukan dengan rumus (Gen, Cheng, 1997) [5]:

$$L_{bit} = 2 \log \{ (U_b - L_b) \cdot 10^\alpha + 1 \}; \quad (8)$$

Keterangan :

- L_{bit} = panjang deret biner;
- U_b = batas atas domain variabel desain;
- L_b = batas bawah domain variabel desain;
- α = nilai presisi.

$$L_{kromosom} = L_{bit} \cdot N_{elemen}; \quad (9)$$

Keterangan :

- $L_{kromosom}$ = panjang kromosom;
- $N_{kromosom}$ = jumlah elemen dalam struktur.

Dengan batas atas $U_b = 140 \text{ mm}^2$, batas bawah $L_b = 105 \text{ mm}^2$, dan $\alpha = 2$, Persamaan (8) memberikan panjang gen $L_{bit} = 12$. Dengan nilai-nilai tersebut maka pers (9) memberikan panjang kromosom $L_{kromosom} = 120 \text{ bit}$. Untuk keperluan proses penyilangan (*crossover*) maka angka numerik gen harus ditransformasikan kedalam bentuk biner dengan persamaan berikut (Gen,Cheng, 1997) [5]:

$$substring - desimal = (real_x - L_b) \cdot \frac{2^n - 1}{U_b - L_b}; \quad (10)$$

Keterangan :

- $substring-desimal$ = nilai variable desain yang harus ditransformasikan ke dalam bentuk bit;
- $real_x$ = nilai variable desain yang dibangkitkan secara acak;
- n = panjang deret biner = L_{bit} .

Nilai *substring-desimal* selanjutnya ditransformasikan kedalam bentuk bilangan biner. Secara skematik, maka kromosom dapat dimodelkan seperti tampak pada Tabel 2.

Tabel 2. Kromosom Individu Terdiri Dari 10 Gen

Kromosom				
Elemen 1	Elemen 2	Elemen 3	...	Elemen 10
K1	K2	K3	...	K10

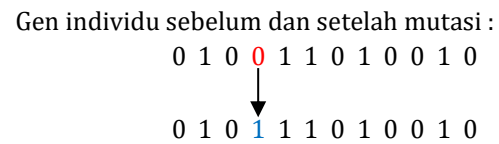
Individu yang memenuhi probabilitas yang ditentukan selanjutnya melakukan kawin silang dan mengalami mutasi. Dalam penelitian ini probabilitas kawin silang adalah $P_{co} = 0,95$, sedangkan probabilitas mutasi adalah $P_{mu} = 0,01$.

Sebagai ilustrasi dari proses penyilangan (*crossover*) pada satu gen adalah sebagai berikut:



Individu 1 dan Individu 2 berperan sebagai orang tua yang menurunkan dua keturunan, yaitu Anak 1 dan Anak 2. Lokasi titik silang ditentukan secara acak.

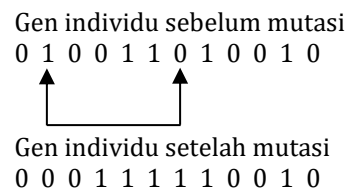
Ilustrasi proses mutasi adalah sebagai berikut :



Lokasi bit yang mengalami mutasi juga ditentukan secara acak sesuai probabilitas mutasi yang ditentukan.

Selain penyilangan dan mutasi, inversi juga merupakan cara untuk menjaga ragam karakter dalam populasi, sehingga mengurangi terjadinya konvergen prematur. Inversi pada Algoritma Genetika (AG) terjadi dengan menukar letak dua karakter pada sebuah string individu. Individu mana dan karakter mana yang mengalami inversi ditentukan secara random.

Adapun contoh proses mutasi dapat dilihat sebagai berikut :



Probabilitas Terjadi Penyilangan (Crossover), Mutasi Dan Inversi

Pada Penyilangan (*Crossover*), dalam satu generasi individu akan melakukan Penyilangan berdasarkan pada kriteria probabilitas kesempatan yang sama. Oleh karena itu maka ada kesempatan bagi tiap individu untuk dibangkitkan secara acak. Bagi individu yang tidak memiliki kesempatan untuk melakukan Penyilangan maka tidak akan pernah membangkitkan keturunannya. Kriteria probabilitas penyilangan yang dipertimbangkan adalah :

$$P_{co} = 0.95 = 95\% \quad (11)$$

Demikian juga halnya dengan mutasi. Mutasi dapat berlaku dalam setiap gen pada posisi digit tertentu. Oleh karena itu, setiap digit harus diperiksa probabilitas kesempatan mutasinya. Apabila probabilitas tersebut lebih kecil dari kriteria probabilitas tidak terjadinya mutasi, maka digit tersebut akan mengalami mutasi.

Kriteria probabilitas tidak terjadinya mutasi adalah sebagai berikut :

$$P_m = 0.01 = 1\% \quad (12)$$

Bila probabilitas tidak mutasi yang dimiliki suatu digit tertentu lebih kecil dari probabilitas kriteria, maka digit tersebut akan mengalami mutasi.

Begitu juga halnya dengan inversi. Inversi terjadi dalam suatu gen. Dalam proses inversi terjadi pertukaran tempat dari digit dalam satu gen. Oleh karena itu semua gen diperiksa. Seperti halnya mutasi, probabilitas untuk tidak terjadi inversi harus memenuhi kriteria probabilitas tertentu. Bila probabilitas yang dimiliki gen tersebut lebih kecil dari pada kriteria probabilitas yang menentukan, maka gen tersebut akan mengalami inversi.

Gen mana yang akan mengalami inversi ditentukan secara acak. Karena dalam inversi terjadi pertukaran tempat digit, maka juga harus diketahui digit mana yang akan mengalami pertukaran tersebut. Hal ini juga ditentukan secara acak.

Kriteria probabilitas tidak terjadinya inversi adalah sebagai berikut :

$$P_{in} = 0.01 = 1\% \quad (13)$$

Kriteria Konvergensi

Proses iterasi dihentikan ketika kondisi konvergen telah tercapai. Parameter yang menentukan konvergensi adalah nilai rerata fitness dan nilai rerata volume dari populasi.

$$|Fit_{n+1} - Fit_n| \leq 0.001 ; \quad (14)$$

$$|V_{n+1} - V_n| \leq 0.001 ; \quad (15)$$

Keterangan :

Fit_n = nilai rerata fitness dari iterasi n;

V_n = nilai rerata volume dari iterasi n.

Analisis Tegangan

Secara umum tegangan dapat didefinisikan sebagai besarnya gaya (F) yang bekerja pada suatu elemen per satuan luas (A) elemen tersebut yang dirumuskan sebagai berikut :

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right)^2 \right] \quad (16)$$

Hubungan antara besar tegangan pembebanan (σ) dengan tegangan izin bahan ($\bar{\sigma}$),

dapat dinyatakan oleh faktor keamanan (SF) yang dirumuskan sebagai berikut [6]:

$$SF = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} \quad (17)$$

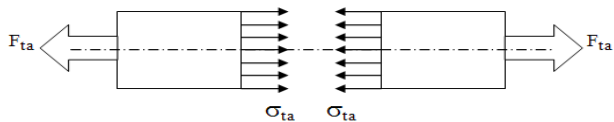
Faktor keamanan adalah sebagai faktor yang harus ditetapkan oleh perancang untuk menghadapi kemungkinan dari pembebanan maksimum diluar kondisi normal yang akan diterima elemen pada saat berfungsi. Sebagai efek dari kerja gaya dalam struktur material, maka jenis tegangan tergantung dari jenis gaya yang bekerja, yaitu :

a. Tegangan Tarik (Tensile Stress)

Tegangan tarik (σ_{ta}) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) sehingga elemen mengalami perpanjangan. Secara matematika dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_{ta} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (18)$$

Hal ini dapat diilustrasikan sebagai berikut :



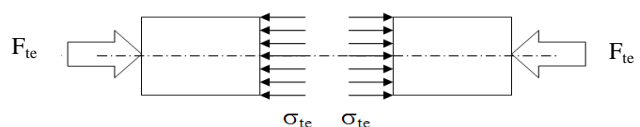
Gambar 4. Ilustrasi Tegangan Tarik

b. Tegangan Tekan (Compressive Stress)

Tegangan tekan (σ_{te}) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik (F_{te}) pada satuan luas penampang (A) sehingga elemen mengalami perpanjangan. Secara matematika dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_{te} = \frac{F_{te}}{A} \quad (19)$$

Hal ini dapat diilustrasikan sebagai berikut :



Gambar 5. Ilustrasi Tegangan Tekan

Model Distribusi Log Normal

Suatu variabel acak X dikatakan memiliki distribusi Log Normal apabila fungsi kerapatan probabilitasnya berbentuk persamaan berikut [7] :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (20)$$

Parameter ξ dan λ merupakan parameter Log Normal yang didapat dari data lapangan. Parameter ξ menyatakan ukuran nilai penyebaran, sedangkan parameter λ menyatakan ukuran rata-rata. Untuk mendapatkan nilai ukuran penyebaran (ξ) digunakan rumusan sebagai berikut :

$$\xi^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right] \quad (21)$$

Koefisien variasi dari variabel X diperoleh dari pembagian antara nilai deviasi dengan nilai rata-rata, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Omega_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (22)$$

Berdasarkan Persamaan (22), maka Persamaan (21) dapat ditulis menjadi persamaan berikut :

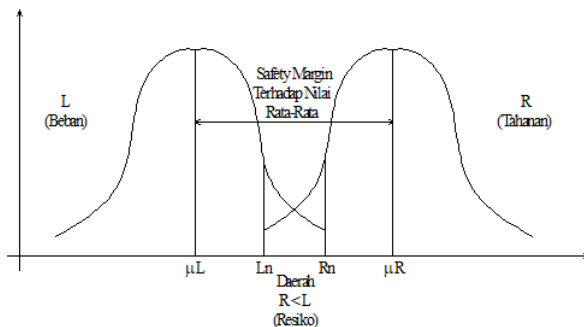
$$\xi^2 = [\ln(1 + \Omega_x^2)] \quad (23)$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai ukuran rata-rata (λ) digunakan rumusan sebagai berikut :

$$\lambda = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \xi^2 \quad (24)$$

Perhitungan Beban (Load) Dan Tahanan (Resistance)

Pada desain, para *Engineer* cenderung untuk memperbesar beban (*load*) dan memperkecil tahanan (*resistance*), sehingga apabila tahanan lebih kecil daripada beban yang bekerja akan menimbulkan risiko. Hal ini dapat diilustrasikan pada gambar berikut ini:



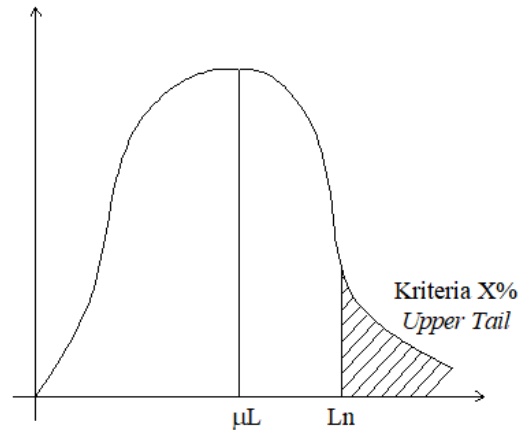
Gambar 6. Penentuan Daerah Risiko Akibat Beban Dan Tahanan

Perhitungan beban (*load*) rata-rata akibat beban nominal yang bekerja dapat digunakan Kriteria X% *Upper Tail*, yang secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\ln L_n = \lambda_L + [\Phi^{-1}(X\%) \cdot \xi_L] \quad (25)$$

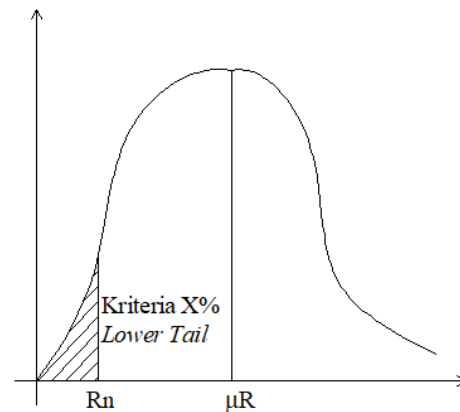
Perhitungan pembebanan dengan menggunakan Kriteria X% *Upper Tail* diilustrasikan seperti pada gambar 7. Sedangkan perhitungan tahanan (*resistance*) rata-rata akibat beban nominal yang bekerja dapat digunakan Kriteria X% *Lower Tail*, yang secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\ln R_n = \lambda_R + [\Phi^{-1}(X\%) \cdot \xi_R] \quad (26)$$



Gambar 7. Kriteria X% Upper Tail

Perhitungan tahanan (*resistance*) dengan menggunakan Kriteria X% *Lower Tail* diilustrasikan seperti pada gambar berikut ini :



Gambar 8. Kriteria X% Lower Tail

Nilai perbandingan antara nilai tahanan (R_n) dan nilai beban (L_n) merupakan nilai angka keamanan (FS) dan dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{R_n}{L_n} = FS \quad (27)$$

Analisis Keandalan (Reliability)

Analisis keandalan dilakukan untuk mengetahui nilai probabilitas kegagalan (*probability of failure*) atau risiko dari suatu struktur. Prinsip utama agar suatu struktur tidak mengalami kegagalan adalah tahanan (*resistance*) dari suatu struktur harus lebih besar daripada beban (*load*) yang bekerja pada struktur tersebut. Untuk perhitungan resiko ini digunakan metode distribusi variabel acak *Log Normal*. Perhitungan dilakukan pada masing-masing elemen rangka yang selanjutnya akan disatukan menjadi satu kesatuan struktur rangka batang.

Untuk perhitungan tahanan (*resistance*) rata-rata pada material baja akibat beban nominal yang bekerja digunakan Kriteria 5% *Lower Tail*, dengan nilai Koefisien Variansi (Ω_R) = 0.15 dan nilai

Ukuran Penyebaran (ξ_{fy}) = 0.15. Sedangkan untuk perhitungan beban (*load*) rata-rata akibat beban nominal yang bekerja digunakan Kriteria 40% *Upper Tail*, dengan nilai Koefisien Variansi (Ω_L) = 0.30 dan nilai Ukuran Penyebaran (ξ_L) = 0.30.

Nilai probabilitas keandalan struktur ini tidak bisa dilakukan secara langsung. Akan tetapi dapat dihitung dengan menggunakan batas-batas probabilitas (*probability bounds*) seperti yang telah dirumuskan pada Persamaan (4), yaitu:

$$\max_i p_{Fi} \leq p_F \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_{Fi}) \quad (28)$$

Keterangan :

- p_{Fi} = probabilitas kegagalan elemen i;
- p_F = probabilitas gagal struktur global.

Nilai probabilitas keandalan struktur ini harus lebih kecil dari nilai probabilitas keandalan struktur yang telah disyaratkan, dimana pada penelitian ini nilai probabilitas kegagalan elemen struktur tidak boleh melebihi 10^{-3} ($P_{fi} \leq 10^{-3}$).

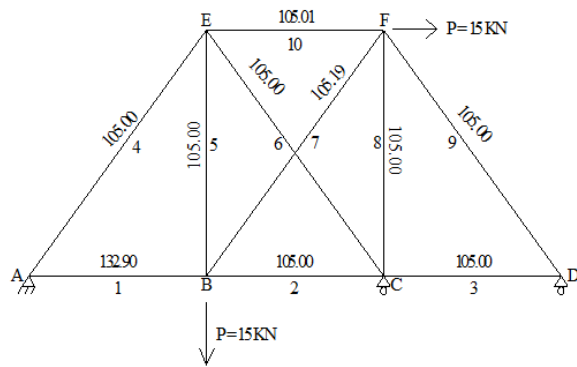
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian terlihat bahwa proses iterasi dapat dihentikan pada itersi ke-200. Hal ini dilakukan karena nilai fitness dan volume, serta nilai probabilitas kegagalan (*probability of failure*) elemen maupun struktur global telah konvergen.

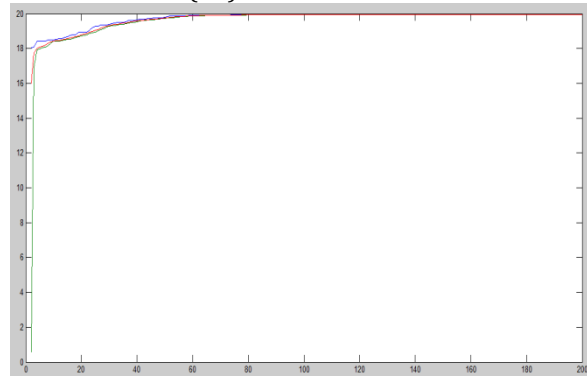
Tabel 3. Nilai Luas Elemen, Tegangan Elemen, P_f Elemen, dan Volume Elemen Optimum

No. Elemen	Panjang Elemen (mm)	Gaya-Gaya Dalam Elemen (N)	Luas Elemen (mm ²)	Tegangan Elemen (N/mm ²)	P_f Elemen	Volume
1	4000	15488.85	132.90	119.23	0.00096801	531589.74
2	4000	6951.52	105.00	66.20	5.14E-07	420000.00
3	4000	1689.71	105.00	16.09	0	420000.00
4	5656.85	-1194.80	105.00	-11.38	0	593969.70
5	4000	6106.66	105.00	58.16	6.46E-08	420000.00
6	5656.85	-7441.32	105.00	-70.87	1.44E-06	593969.70
7	5656.85	12577.08	105.19	119.57	0.00099677	595033.38
8	4000	-7203.63	105.00	-68.61	8.84E-07	420000.00
9	5656.85	-2389.61	105.00	-22.76	2.22E-16	593969.70
10	4000	4416.96	105.01	42.06	1.88E-10	420034.19
P _f Struktur					0.000997 ≤ P _f ≤ 0.001967	
Fitness Rata-Rata Struktur					19.966	
Volume Struktur Total					150256846.90	

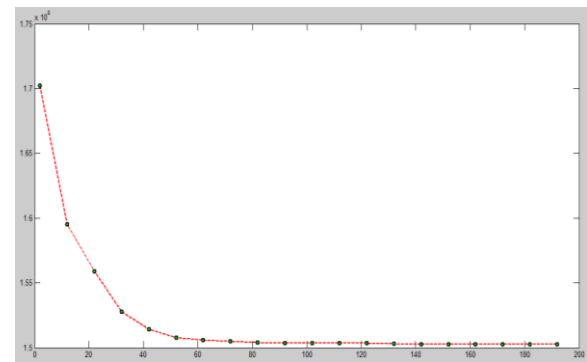
Tabel 3 menunjukkan karakteristik struktur optimum yang dihasilkan serta nilai Probabilitas Kegagalan $0,000997 \leq P_f \leq 0,001967$. Gambar 9 menunjukkan secara skematik luas potongan masing-masing elemen, sedangkan Gambar 10 menampilkan kurva progresi pertumbuhan nilai fitness struktur. Garis yang teratas menunjukkan nilai fitness maximum, yang tengah nilai rerata fitness, dan yang terbawah menunjukkan nilai fitness minimum dari populasi. Gambar 11 menampilkan progresi optimalisasi volume material struktur.



Gambar 9. Luas Potongan Elemen (13)



Gambar 10. Progresi Pertumbuhan Nilai Fitness Individu, Kurva Atas Menunjukkan Nilai Rerata Maximum, Kurva Bawah Nilai Rerata Minimum, Dan Kurva Tengah Menunjukkan Nilai Rerata Fitness.



Gambar 11. Progresi Nilai Volume Material Struktur

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan, dapat disimpulkan bahwa metode Algoritma Genetika dapat digunakan untuk melakukan optimasi pada struktur rangka batang dengan kendala tegangan dan probabilitas kegagalan yang merupakan analisis nonlinier (*nonlinier analysis*), yang mana hal ini cukup sulit dilakukan dengan menerapkan metode pemrograman matematik (*mathematical programming*). Proses iterasi yang dilakukan pada metode Algoritma Genetika ini tidak dibangun atas dasar konsep matematika, tetapi

dilakukan secara stokastik yang selalu konvergen ke struktur optimum yang sama, sehingga struktur optimum yang dihasilkan merupakan solusi yang terpercaya (*reliable*).

REFERENSI

- [1] M. S. Besari and W. F.X.N., "Genetic Algorithms In Plane Truss Shape Optimization," presented at the 3rd Regional Conference on Computer Applications In Civil Engineering, Kuala Lumpur, 1994.
- [2] M. S. Besari and F. X. N. Wibowo, "Optimasi Rangka Batang," ITB, Ed. Bandung, 2006.
- [3] F. X. N. Wibowo, "Optimasi Bentuk Oval Cangkang Simetri Sumbu," Doctoral, Civil Engineering Dept., Institut Teknologi Bandung, Bandung, 1996.
- [4] Suharjanto, "Optimasi Bentuk Dan Ukuran Lubang Cellular Pada Badan Balok Sederhana Baja Profil I Di Daerah Elastis," Doctoral, Civil Engineering Dept., Universitas Diponegoro, Semarang, 2009.
- [5] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*. Wiley, 1997.
- [6] (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Gedung : SK SNI 03 - 1729 - 2002*.



This is an open access article which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution.

Jurnal Saintis allows the author(s) to hold the copyright without restriction. The copyright in the text of individual articles (including research articles, opinion articles, and abstracts) is the property of their respective authors distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium. Users are allowed to read, download, copy, distribute, search, or link to full-text articles in this journal without asking by giving appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made.

This page is intentionally blank