

OPTIMASI PENAMPANG BAMBU PADA STRUKTUR RANGKA BATANG BIDANG DENGAN MENGGUNAKAN *BINARY BAT ALGORITHM*

Richard Frans^{1*} dan Stevy Thioritz²

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar
*E-mail: richardfrans.rf@gmail.com

Abstrak

Bambu merupakan salah satu material bangunan yang ramah lingkungan dan termasuk dalam kategori material yang berkelanjutan (*sustainable material*) dan banyak digunakan dalam konstruksi sipil khususnya bangunan, akan tetapi kegunaan bambu pada konstruksi bangunan biasanya hanya sebatas sebagai perancah saja. Pada penelitian ini, bambu akan diaplikasikan sebagai material pada struktur rangka atap dari bangunan yang direpresentasikan oleh struktur rangka batang bidang. Terdapat dua jenis rangka batang bidang yang akan digunakan, yaitu struktur rangka batang bidang dengan 10 batang (*benchmark problem*) dan tipe *howe* dengan 13 batang. Ukuran penampang dari masing-masing batang dioptimalkan guna mendapatkan hasil yang optimum dari segi berat keseluruhan struktur. *Binary bat algorithm* digunakan sebagai *tools* untuk mengoptimasi ukuran penampang dari elemen struktur rangka batang bidang tersebut. Berdasarkan hasil yang didapatkan, *binary bat algorithm* mampu mendapatkan ukuran penampang yang optimum untuk masing-masing batang baik untuk struktur rangka batang bidang dengan 10 batang dan struktur rangka batang bidang tipe *howe*.

Kata kunci: optimasi ukuran penampang, struktur rangka batang bidang, *binary bat algorithm*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Bambu merupakan salah satu bahan bangunan tertua yang digunakan baik di daerah tropis maupun subtropis (Chaowana, 2013). Bambu telah banyak digunakan dalam konstruksi bangunan, seperti lantai, langit-langit, dinding, jendela, pintu, pagar, atap rumah, rangka dan kasau, selain itu juga digunakan dalam konstruksi sebagai bahan struktural untuk jembatan, fasilitas transportasi air dan perancah gedung pencakar langit. Bambu juga telah diolah menjadi beragam produk mulai dari produk rumah tangga dalam negeri seperti wadah makanan, tusuk sate, sumpit, kerajinan tangan, mainan, furnitur, lantai, perahu, arang, alat musik dan senjata. Di daerah pedesaan, bambu disebut kayu orang miskin karena seluruh aspek pemanfaatan bambu dalam kehidupan manusia. Sejak abad ke-20, bambu semakin mendapat perhatian untuk aplikasi industri, terutama sebagai bahan baku komposit berbasis kayu seperti papan partikel (PB), papan serat kepadatan menengah (MDF), papan serat keras (HB), kayu lapis, papan untai berorientasi (OSB), papan zephyr, kayu bambu laminasi, kayu untai paralel (PSL) dan kayu untai berorientasi (OSL). Bambu menjadi populer karena sifatnya yang cepat tumbuh, produktivitas tinggi,

kematangan cepat dan kekuatan tinggi dengan kemajuan teknologi pemrosesan dan permintaan pasar yang meningkat.

Gupta dan Kumar (2008) mengatakan bahwa bambu merupakan material komposit alami yang tumbuh melimpah di sebagian besar belahan dunia. Bambu disebut sebagai bahan komposit karena memiliki serat selulosa yang tertanam dalam matriks lignin. Sebagai sumber daya yang murah dan cepat tumbuh, dengan sifat fisik dan mekanik yang unggul, bambu menawarkan potensi besar sebagai alternatif pengganti kayu. Bambu dapat secara luas menggantikan tidak hanya kayu, tetapi juga plastik dan bahan lainnya dalam aplikasi struktural dan produk melalui peningkatan teknologi pemrosesan, inovasi produk dengan penerapan keterampilan ilmiah dan teknik. Industri berbasis bambu memiliki potensi besar untuk menghasilkan pendapatan dan lapangan kerja, terutama di daerah pedesaan. Sejumlah lembaga telah bekerja untuk mempromosikan penggunaan bambu menjadi produk bernilai tambah dan beberapa pemerintahan di negara tertentu telah memberikan kontribusi dalam promosi bambu dan karenanya dapat mendukung pembangunan berkelanjutan.

Berdasarkan hal tersebut, bambu dapat menjadi salah satu material yang dapat menjadi pilihan untuk konstruksi bangunan sederhana. Pada penelitian ini, bambu digunakan sebagai

rangka atap konstruksi yang direpresentasikan dengan struktur rangka batang bidang. Terdapat dua model struktur rangka batang bidang yang akan dianalisis dalam penelitian ini dengan menggunakan teknik optimasi untuk mendapatkan ukuran penampang yang optimum.

Bambu sebagai material yang berkelanjutan

Dewasa ini, pertambahan jumlah penduduk di dunia menyebabkan kebutuhan akan tempat tinggal semakin meningkat. Namun kondisi pertumbuhan penduduk tidak diikuti dengan peningkatan penyediaan perumahan atau lahan untuk pembangunan perumahan, hal ini disebabkan oleh masalah keterbatasan lahan itu sendiri. Alasan lainnya adalah pemerintah menginginkan material yang berkelanjutan yang mengarah pada pemenuhan aspek ekonomi dan aspek lingkungan. Salah satu material yang dikategorikan berkelanjutan adalah bambu. Perspektif lain dari penggunaan bambu dipandang sebagai material berkelanjutan adalah bambu memenuhi kriteria sebagai alternatif penerapan bahan ekologis. Apa yang dimaksud dengan bahan ekologis? Ekologi merupakan pemenuhan aspek-aspek pada konsep *green building* yang menjadi topik yang terus dikaji oleh para peneliti atau praktisi. Potensi lain dari material bambu adalah mempunyai kekuatan yang cukup, pertumbuhan yang cepat, energi yang rendah, dan bahan yang melindungi ekosistem bumi termasuk peningkatan ekonomi, akan tetapi penggunaan material bambu semakin tergerus oleh perkembangan teknologi modern. Bambu sebagai penunjang kehidupan sehari-hari mulai kehilangan jati dirinya yang mengakibatkan ketersediaan material bambu atau keberlangsungan material bambu, lambat laun di masyarakat mulai langka/sulit ditemukan. (Suriani, 2017). Oleh karena itu, untuk mengatasi hal tersebut, material bambu dapat digunakan sebagai material ekologis dengan terobosan modernisasi pemanfaatan bambu dalam konteks industri. Aspek lain yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaan material bambu adalah bambu merupakan bahan alam yang relatif murah dibandingkan dengan bahan lain seperti baja, atau beton (Supriyadi dan Sukawi, 2013). Bambu adalah tanaman yang dapat tumbuh hampir di semua kondisi iklim dan menjadi bahan bangunan tradisional yang paling disukai di daerah pedesaan dan desa selama berabad-abad, di seluruh dunia.

Ada beberapa aspek untuk menentukan suatu material dapat dikatakan sebagai material yang berkelanjutan. Material harus memenuhi

aspek-aspek berikut (Mustakim et al, 2009):

1. Dapatkah sumber daya material dipertahankan?
2. Dapatkah bahan tersebut didaur ulang?
3. Dapatkah bahan tersebut digunakan kembali?
4. Berapa banyak energi untuk menghasilkannya?
5. Apakah ada dampak lingkungan saat diproduksi?
6. Berapa banyak air yang digunakan untuk memproduksinya?
7. Apakah bahan tersebut dapat terurai secara hayati?
8. Apakah bahannya dapat diproduksi secara lokal?
9. Apakah ada dampak yang telah dibuat dari waktu ke waktu?
10. Berapa tingkat toksisitas bagi manusia dan ekosistem?
11. Bagaimana metode pemasangan/konstruksi dan daur hidup material?
12. Bagaimana tingkat keawetan dan perawatan material?

Berdasarkan kriteria bahan berkelanjutan di atas, hampir semua aspek dapat dipenuhi oleh material bambu, sehingga dapat dikatakan bambu merupakan material konstruksi satu-satunya yang masuk dalam kategori berkelanjutan dan ramah lingkungan.

State of the Art

Yu (2007) membuat perbandingan antara bambu dan kayu. Dibandingkan dengan kayu, bambu memiliki tingkat pertumbuhan yang jauh lebih cepat, bukan karena bambu menghasilkan lebih banyak zat daripada pohon, tetapi terutama karena pertumbuhannya lebih efisien. Bambu hanya membutuhkan 3-4 tahun untuk cukup matang dengan tingkat pemanfaatan normal, sedangkan kayu membutuhkan 50 tahun untuk dapat dipanen. Pertumbuhan bambu yang cepat tidak hanya karena memiliki sistem rimpang bawah tanah, tetapi juga karena struktur khusus dari batang, yang merupakan bagian utama dari bambu untuk sebagian besar pemanfaatan: bambu memiliki batang berongga, yang bagian luarnya jauh lebih keras dan lebih padat daripada bagian dalam. Zat-zat yang diperoleh dan dihasilkan bambu selama pertumbuhan sebagian besar berkontribusi pada bagian luar batang yang keras, yang memikul sebagian besar beban dalam keseluruhan konstruksi; bagian dalam batang, yang lunak dan dilindungi oleh bagian luar, memiliki sistem saluran besar untuk mengangkut nutrisi ke mana-mana dari

rimpang dan bagian tengah batangnya berlubang, yang di satu sisi tidak mempengaruhi kekuatan keseluruhan struktur, namun di sisi lain membantu mengurangi konsumsi zat bambu. Ini berarti bambu memiliki pertumbuhan yang diatur secara efisien yaitu membuang semua hal yang tidak penting dan berkonsentrasi pada yang paling penting.

Tahmasebinia, dkk (2021) membuat penelitian tentang analisis bambu dengan elemen melengkung menggunakan metode elemen hingga. Pada penelitian ini, terdapat tiga model struktur melengkung yang dimodelkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Tujuan dari penelitian ini adalah desain penampang bambu dari tiga model struktur tersebut. Ketiga model tersebut mempertimbangkan perilaku lokal dan global. Perilaku lokal mencakup perilaku tekuk dari elemen bambu sedangkan untuk perilaku global mencakup gaya-gaya dalam dari elemen bambu, perpindahan serta tegangan dari masing-masing elemen. Ketiga model ini dibebani sesuai dengan peraturan *Australian Standards*. Berdasarkan analisis, didapatkan beberapa kesimpulan, antara lain dengan meningkatkan luas penampang dari bambu dapat mengurangi defleksi maksimum yang terjadi, tegangan lentur dan tegangan fiber masing-masing elemen secara spesifik. Selanjutnya dengan penambahan tebal dari bambu, dapat meningkatkan kapasitas beban dari elemen bambu khususnya untuk beban aksial. Selain itu, pemodelan pertama memberikan hasil memberikan stabilitas lateral yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan model kedua dan model ketiga.

Frans dan Arfiadi (2014) melakukan optimasi topologi, luas penampang dan geometri dari struktur rangka batang bidang akan tetapi material dari rangka batang bidang tersebut merupakan material baja. Algoritma yang digunakan untuk melakukan optimasi adalah algoritma genetika *hybrid* yaitu algoritma yang menggabungkan algoritma genetika biner dan algoritma genetika riil. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan struktur yang ringan akan tetapi tetap memperhatikan kriteria dalam perencanaan. Berdasarkan hasil yang didapatkan, struktur portal bidang berhasil dioptimasi dan nilai yang didapatkan lebih kecil jika dibandingkan penelitian terdahulu.

Sassu, dkk (2012) melakukan penelitian eksperimental untuk mendapatkan konfigurasi yang optimum bagi sambungan struktur rangka batang bidang yang terbuat dari bambu. Pada

penelitian ini terdapat tiga konfigurasi sambungan yang diuji coba secara eksperimental. Konfigurasi pertama adalah menggunakan baut dan pelat baja, konfigurasi kedua menggunakan baut dan pelat *plywood* dan konfigurasi ketiga adalah pin kayu dan pelat *plywood*. Berdasarkan hasil yang didapatkan, ketiga konfigurasi tersebut memberikan perilaku keruntuhan yang berbeda-beda dan terjadi peningkatan daktilitas antara konfigurasi satu sampai konfigurasi ketiga, hal ini diikuti dengan "kesederhanaan" sambungan dan dengan penurunan tingkat teknologi yang dibutuhkan. Pada konfigurasi ketiga memungkinkan perbaikan pada *joint* akibat kerusakan dan menghindari terjadi keruntuhan pada elemen bambu maupun pelat *plywood* yang digunakan.

Sassu, dkk (2016) melakukan penelitian lanjutan terkait konfigurasi yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Pada penelitian kali ini, model *full scale* dibuat untuk melihat perilaku dari masing-masing konfigurasi sambungan yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Terdapat dua model *full scale* yang dibuat. Model 1 merupakan struktur rangka batang dengan bentang 3,75m dimana atap dari struktur rangka batang tersebut merupakan wooden plate dengan ketebalan 30 mm di atas 4 gording. Untuk model 2, merupakan struktur rangka batang dengan bentang 7,5m. Beban yang digunakan merupakan beban monotonik dengan peningkatan beban secara bertahap (*sequence load*). Berdasarkan hasil yang didapatkan, konfigurasi dengan menggunakan sambungan pin kayu dan *plywood* memberikan hasil yang baik dan sama dengan penelitian sebelumnya. Untuk kedua model tersebut, penggunaan konfigurasi sambungan dengan pin kayu dan *plywood* menunjukkan efisiensi dalam segi struktural dan sangat mudah untuk diperbaiki jika terjadi kerusakan pada *joint*.

Binary Bat Algorithm

Bat algorithm pertama kali dikembangkan oleh Yang (2010). Algoritma ini terinspirasi dari perilaku "*echolocation*" dari kelelawar. *Bat algorithm* ini dinyatakan lebih unggul dibandingkan algoritma lainnya seperti algoritma genetika ataupun *particle swarm optimization* (Mirjalili, Mirjalili, dan Yang, 2013). Persamaan umum yang digunakan dalam *bat algorithm* berdasarkan Yang (2010) adalah

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (1)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - x_*)f_i \quad (2)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (3)$$

dimana f adalah frekuensi, β adalah bilangan acak dari 0 sampai 1, v adalah vector kecepatan, x adalah vector posisi serta x_* adalah lokasi global terbaik pada iterasi tersebut. Selain menggunakan persamaan (1), (2), dan (3), terdapat persamaan tambahan untuk memperbarui lokasi lokal dari kelelawar tersebut yaitu

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon A^t \quad (4)$$

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (5)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (6)$$

dimana: A_i adalah *loudness*, r_i adalah *rate of pulse emission*, γ dan α adalah konstanta (untuk menyederhanakan, biasanya diambil $\gamma = \alpha$)

Persamaan (1) sampai persamaan (6) digunakan untuk menyelesaikan persoalan-persoalan yang bersifat kontinu dengan variabel riil, sedangkan pada kasus ini, variabel yang digunakan adalah variabel biner. Untuk itu, persamaan (1) sampai (6) dimodifikasi untuk dapat digunakan pada optimasi dengan kasus variabel biner. Mirjalili, Mirjalili, dan Yang (2013) membuat modifikasi *bat algorithm* yang berfungsi sebagai alat optimasi untuk variabel riil menjadi alat optimasi untuk variabel biner yang lebih dikenal dengan nama *binary bat algorithm*. Teori ini menggunakan fungsi transfer berbentuk v (*v-shaped transfer function*). Persamaan yang digunakan untuk memperbarui posisi dan kecepatan mengikuti persamaan (7) dan persamaan (8)

$$V(v_i^k(t)) = \left\lfloor \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2}\right) v_i^k(t) \right\rfloor \quad (7)$$

$$x_i^k(t) = \begin{cases} (x_i^k(t))^{-1}, & \text{if } rand < V(v_i^k(t)) \\ x_i^k(t), & \text{if } rand \geq V(v_i^k(t)) \end{cases} \quad (8)$$

dimana: $x_i^k(t)$ dan $v_i^k(t)$ berturut turut adalah posisi dan kecepatan kelelawar ke- i pada iterasi t pada dimensi ke- k , dan $(x_i^k(t))^{-1}$ adalah komplemen dari $x_i^k(t)$.

Kriteria Perencanaan

Struktur yang ditinjau dalam penelitian

ini merupakan struktur rangka batang bidang sehingga kriteria perencanaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tegangan aksial dari masing-masing batang baik tegangan aksial tarik maupun tekan tidak boleh melampaui tegangan ijin yang diijinkan. Untuk nilai tegangan ijin tekan diambil sebesar 40 MPa sedangkan tegangan tarik ijin adalah sebesar 280 MPa dengan nilai modulus elastisitas sebesar 15000 MPa.

Untuk perhitungan tegangan tekan dan tegangan tarik adalah sebagai berikut:

a. Tegangan tekan

Untuk batang tekan, nilai tegangan tekan desain bergantung pada angka kelangsingan dari masing-masing batang untuk memperhitungkan kemungkinan tekuk yang terjadi. Terdapat tiga persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai tegangan tekan desain yang bergantung dari angka kelangsingan batang (Ubolsook dan Thepa, 2011), yaitu

$$\text{Jika } \frac{le}{d} \leq 11 \text{ maka } Fa = Fc \quad (9)$$

$$\text{Jika } 11 \leq \frac{le}{d} \leq K \text{ maka } Fa = Fc \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{le/d}{K}\right)^4\right] \quad (10)$$

$$\text{Jika } K \leq \frac{le}{d} \leq 50 \text{ maka } Fa = \frac{0,3E}{(le/d)^2} \quad (11)$$

dimana:

K adalah konstanta dengan nilai $0,671\sqrt{E/Fc}$
 le adalah panjang batang yang tidak terkekang (cm)

d adalah diameter bambu (cm)

Fa adalah tegangan tekan yang desain (kg/cm^2)

Fc adalah tegangan tekan ijin (kg/cm^2)

E adalah modulus elastisitas bambu (kg/cm^2)

Untuk tegangan tekan yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan sederhana, yaitu

$$F_{comp} = \frac{P_{comp}}{A}, F_{comp} \leq 0,22Fa \quad (12)$$

dimana:

F_{comp} adalah tegangan tekan yang terjadi (kg/cm^2)

P_{comp} adalah gaya aksial tekan yang bekerja pada batang (kg)

A adalah ukuran penampang bambu (cm^2)

Fa adalah tegangan tekan yang ijin desain (kg/cm^2), perlu dicatat bahwa untuk angka 0,22

adalah angka keamanan (*safety factor*) yang diambil dari ISO 22156:2004 baik untuk batang tekan maupun batang tarik.

b. Tegangan Tarik

Untuk batang tarik, nilai tegangan tarik tidak bergantung pada kelangsingan dari batang sehingga nilai tegangan ijin tarik tidak perlu dikoreksi dan dapat langsung dibandingkan dengan tegangan aksial tarik yang terjadi. Perhitungan tegangan tarik dapat dilihat pada persamaan (13).

$$F_{tens} = \frac{P_{tens}}{A}, F_{tens} \leq 0,22F_{ti} \tag{13}$$

dimana

F_{tens} adalah tegangan tarik yang terjadi (kg/cm²)

P_{tens} adalah gaya aksial tarik yang bekerja pada batang (kg)

A adalah ukuran penampang bambu (cm²)

F_{ti} adalah tegangan ijin tarik (kg/cm²)

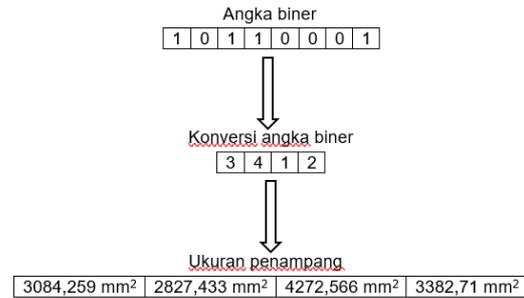
METODE PENELITIAN

Ada dua tipe struktur rangka batang bidang yang ditinjau pada penelitian ini. Struktur rangka batang bidang pertama adalah *benchmark problem* yang diambil dari penelitian terdahulu yaitu penelitian yang dilakukan oleh Rajeev dan Krishnamoorthy (1992) dan struktur rangka batang bidang kedua adalah struktur rangka batang bidang tipe *howe*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan ukuran penampang yang optimum di setiap batang sehingga dapat meminimumkan berat dari struktur rangka batang bidang tersebut.

Terdapat empat ukuran penampang yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu 4272,566 mm², 3382,71 mm², 3084,259 mm², 2827,433 mm² untuk *benchmark problem* dan 6258,541 mm², 4272,566 mm², 3084,259 mm², 2827,433 mm² untuk aplikasi pada struktur rangka batang bidang tipe *Howe*. Ukuran penampang ini berdasarkan pada penelitian laboratorium yang telah dilaksanakan terlebih dahulu dimana properti material dan penampang menjadi tujuan dari penelitian tersebut. Keempat ukuran penampang ini akan menjadi hasil konversi angka biner yang digunakan. Bilangan biner merupakan bilangan yang hanya bernilai 0 dan 1 saja. Bilangan biner yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bilangan basis 2 dengan 2 angka yang kemudian akan dikonversikan menjadi ukuran penampang riil sesuai dengan ukuran penampang yang telah ditetapkan. Agar lebih jelas dapat dilihat ilustrasi pada Gambar 1.

Jika ukuran-ukuran penampang yang tersedia dikonversi menjadi vektor maka dapat ditulis sebagai $\{A\}$

{4272,566;3382,71;3084,259;2827,433} mm². Angka 3 pada kolom pertama menunjukkan bahwa ukuran penampang yang optimum berada pada kolom ketiga dalam vektor ukuran penampang dimana dalam kolom ketiga vektor ukuran penampang adalah 3084,259 mm², begitu pula jika hasil yang didapatkan menunjukkan angka 4 seperti yang ditunjukkan pada kolom kedua yang berarti bahwa ukuran penampang yang optimum berada pada kolom keempat dari vektor ukuran penampang yaitu 2827,433 mm², dan seterusnya.



Gambar 1. Ilustrasi konversi angka biner

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa tujuan dari penelitian ini adalah untuk meminimumkan berat struktur rangka batang bidang sehingga fungsi objektif yang digunakan dapat dilihat pada persamaan (14).

$$W = \sum_{i=1}^n \rho A_i l_i \tag{14}$$

dimana:

- W = berat struktur rangka batang bidang (kg)
- ρ = massa jenis bambu (710 kg/m³)
- A_i = ukuran penampang profil ke-i (m²)
- l_i = panjang batang ke-i (m)

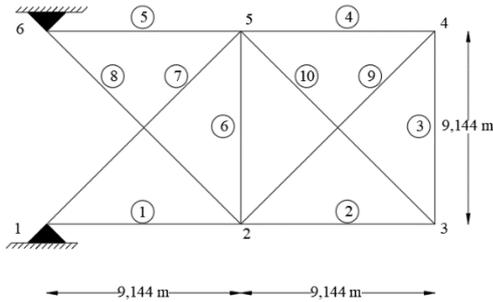
HASIL DAN PEMBAHASAN

Benchmark Problem

Gambar 2 menunjukkan struktur rangka batang bidang dengan 10 batang. Struktur ini diambil dari Rajeev dan Krishnamoorthy (1992) dimana pada penelitian tersebut ukuran penampang dari 10 batang dioptimasi dengan menggunakan algoritma genetika biner. Struktur rangka batang bidang ini dijadikan acuan sebelum melakukan optimasi pada struktur rangka batang bidang yang akan diaplikasikan untuk memastikan apakah hasil yang didapatkan dengan menggunakan program yang dibuat sudah sesuai atau tidak.

Untuk menguji apakah program yang

dibuat bekerja dengan baik maka struktur tidak diberikan beban terlebih dahulu. Jika seluruh ukuran penampang batang menggunakan ukuran penampang terkecil yaitu 2827,433 mm² pada saat beban belum diaplikasikan maka dapat dipastikan bahwa algoritma tersebut bekerja dengan baik. Hal ini dikarenakan tegangan tekan dan tarik masih bernilai 0 untuk semua batang (pada kasus ini tidak memperhitungkan berat sendiri dari



masing-masing batang) sehingga ukuran penampang yang digunakan seharusnya adalah penampang minimum dari keempat ukuran penampang.

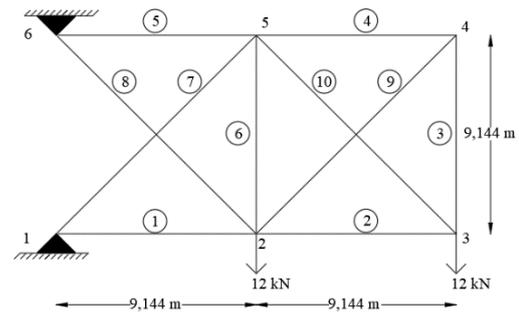
Gambar 2. *Benchmark problem*

Tabel 1 menunjukkan hasil dari optimasi penampang untuk *benchmark problem* yang digunakan. Berdasarkan Tabel 1 maka dapat disimpulkan bahwa program yang telah dibuat bekerja dengan baik. Hasil yang didapatkan menunjukkan seluruh batang menggunakan ukuran penampang minimum yaitu 2827,433 mm². Hasil biner merupakan hasil yang didapatkan dengan menggunakan *binary bat algorithm* sehingga keluarannya dalam bentuk angka biner sedangkan hasil riil adalah hasil biner yang dikonversikan menjadi ukuran penampang riil yang telah ditetapkan.

Tabel 1. Hasil optimasi *benchmark problem* tanpa mengaplikasikan beban

Batang	Hasil Biner	Hasil Riil
1	[1 1]	2827,433 mm ²
2	[1 1]	2827,433 mm ²
3	[1 1]	2827,433 mm ²
4	[1 1]	2827,433 mm ²
5	[1 1]	2827,433 mm ²
6	[1 1]	2827,433 mm ²
7	[1 1]	2827,433 mm ²
8	[1 1]	2827,433 mm ²
9	[1 1]	2827,433 mm ²
10	[1 1]	2827,433 mm ²

Setelah uji program selesai dilaksanakan dan berjalan dengan lancar maka selanjutnya memberikan beban terpusat kepada struktur



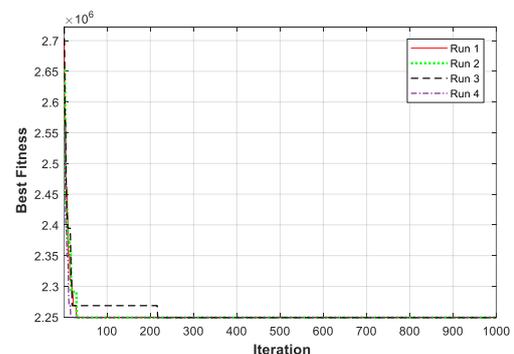
rangka batang bidang tersebut. Beban vertikal terpusat sebesar 12 kN diberikan pada masing-masing titik simpul 2 dan 3. Program dijalankan sebanyak empat kali untuk melihat kekonsistenan dari hasil yang didapatkan.

Gambar 3. Pembebanan untuk struktur rangka batang bidang *benchmark problem*

Tabel 2 menunjukkan hasil dari optimasi yang dijalankan, dapat dilihat bahwa hanya batang pertama yang memiliki ukuran penampang terbesar yaitu 4272,566 mm². Batang lainnya tetap menggunakan ukuran penampang terkecil yaitu 2827,433 mm². Gambar 4 menunjukkan kekonvergenan hasil yang didapatkan tiap program dijalankan. Berdasarkan Gambar 4, hasil yang didapatkan konvergen dengan nilai iterasi < 300.

Tabel 2. Hasil optimasi ukuran penampang *benchmark problem* dengan pembebanan

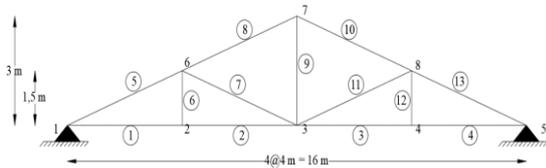
Batang	Hasil Biner	Hasil Riil
1	[0 0]	4272,566 mm ²
2	[1 1]	2827,433 mm ²
3	[1 1]	2827,433 mm ²
4	[1 1]	2827,433 mm ²
5	[1 1]	2827,433 mm ²
6	[1 1]	2827,433 mm ²
7	[1 1]	2827,433 mm ²
8	[1 1]	2827,433 mm ²
9	[1 1]	2827,433 mm ²
10	[1 1]	2827,433 mm ²



Gambar 4. Hubungan iterasi dan *fitness* untuk struktur rangka batang bidang *benchmark problem*

Struktur Rangka Batang Bidang Tipe Howe

Struktur rangka batang bidang berikutnya yang ditinjau adalah struktur rangka batang bidang tipe howe. Struktur yang ditinjau dapat dilihat pada Gambar 5. Struktur ini memiliki 13 batang dimana ujung-ujungnya mempunyai perletakan sendi. Panjang struktur rangka ini adalah 16 meter dengan masing-masing bentang adalah 4 meter. Tinggi struktur rangka batang bidang ini adalah 3 meter.



Gambar 5. Struktur rangka batang bidang tipe *howe*

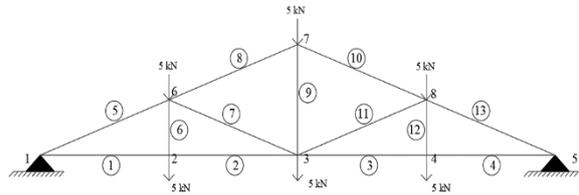
Seperti halnya dengan *benchmark problem*, struktur tersebut akan dimodelkan tanpa beban terlebih dahulu untuk mengecek apakah aplikasi yang dibuat bekerja dengan baik atau tidak. Tabel 3 menunjukkan hasil yang didapatkan dengan memodelkan struktur rangka batang tersebut tanpa beban.

Tabel 3. Hasil optimasi struktur rangka batang bidang tipe Howe tanpa mengaplikasikan beban

Batang	Hasil Biner	Hasil Riil
1	[1 1]	2827,433 mm ²
2	[1 1]	2827,433 mm ²
3	[1 1]	2827,433 mm ²
4	[1 1]	2827,433 mm ²
5	[1 1]	2827,433 mm ²
6	[1 1]	2827,433 mm ²
7	[1 1]	2827,433 mm ²
8	[1 1]	2827,433 mm ²
9	[1 1]	2827,433 mm ²
10	[1 1]	2827,433 mm ²
11	[1 1]	2827,433 mm ²
12	[1 1]	2827,433 mm ²
13	[1 1]	2827,433 mm ²

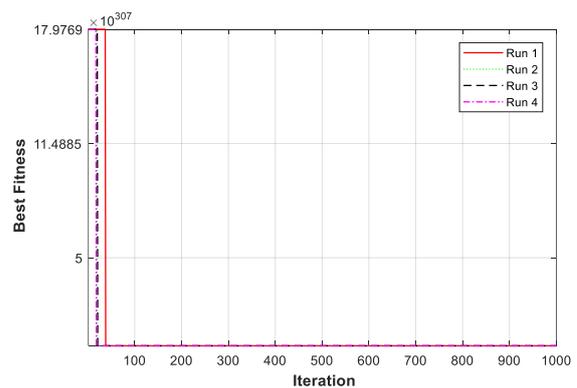
Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa seluruh batang mendapatkan ukuran penampang minimum, yaitu sebesar 2827,433 mm². Hal ini berarti bahwa program yang telah dibuat

bekerja baik. Untuk selanjutnya, struktur rangka batang bidang akan diberikan beban sesuai pada Gambar 6.



Gambar 6. Pembebanan struktur rangka batang bidang tipe *howe*

Tabel 4 menunjukkan hasil ukuran penampang untuk masing-masing batang dan dapat terlihat bahwa ukuran penampang minimum, yaitu 2827,433 mm² terpilih untuk semua batang, kecuali pada batang yang memiliki gaya tekan yang cukup besar, yaitu pada batang ke 5, 8, 10 dan 13. Untuk batang 5 dan 13 menggunakan ukuran penampang terbesar, yaitu 6258,541 mm². Hal ini dikarenakan gaya tekan terbesar terdapat pada kedua batang tersebut, dan dikarenakan pembebanan yang simetris, ukuran penampang untuk batang 5 dan 13 adalah sama sedangkan untuk batang 8 dan 10 merupakan batang yang memiliki gaya tekan terbesar kedua setelah batang 5 dan 13. Ukuran penampang yang terpilih untuk batang 8 dan 10 adalah 4272,566 mm². Gambar 7 menunjukkan kekonvergenan hasil yang didapatkan untuk masing-masing *run* yang telah dilakukan, dimana untuk seluruh run menunjukkan kekonvergenan < 100 iterasi.



Gambar 7. Hubungan iterasi dan *fitness* untuk struktur rangka batang bidang tipe *Howe*

Tabel 4. Hasil optimasi struktur rangka batang bidang tipe Howe dengan mengaplikasikan beban

Batang	Hasil Biner	Hasil Riil
--------	-------------	------------

1	[1 1]	2827,433 mm ²
2	[1 1]	2827,433 mm ²
3	[1 1]	2827,433 mm ²
4	[1 1]	2827,433 mm ²
5	[0 0]	6258,541 mm ²
6	[1 1]	2827,433 mm ²
7	[1 1]	2827,433 mm ²
8	[0 1]	4272,566 mm ²
9	[1 1]	2827,433 mm ²
10	[0 1]	4272,566 mm ²
11	[1 1]	2827,433 mm ²
12	[1 1]	2827,433 mm ²
13	[0 0]	6258,541 mm ²

PENUTUP

Penelitian ini menggunakan *binary bat algorithm* untuk memperoleh ukuran penampang yang optimum pada struktur rangka batang bidang dengan material bambu sebagai elemen struktur rangka batang bidang tersebut. Terdapat dua jenis struktur rangka batang bidang yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu struktur rangka batang bidang dengan 10 batang (*benchmark problem*) dan struktur rangka batang bidang tipe *howe* dengan 13 batang serta empat ukuran penampang yang berbeda. Berdasarkan hasil yang didapatkan, *binary bat algorithm* dapat dengan baik menentukan ukuran penampang yang optimum untuk masing-masing batang pada kedua struktur rangka batang bidang tersebut yang sesuai dengan kriteria perencanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chaowana. (2013). Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composites. *Journal of Material Science Research*, 2(2).
- Frans, R. dan Yoyong, A. (2014). Sizing, shape, and topology optimizations of roof trusses using hybrid genetic algorithms. *Procedia Engineering*, 95, 185-195.
- Gupta, A. dan Kumar, A. (2008). Potential of Bamboo in Sustainable Development. *Asia Pasific Journal of Management Research and Innovation*, 4(3), 100-107.
- ISO. (2014). Bamboo-Structural Design. ISO 22156:2014. Switzerland.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., dan Yang, X.S. (2014). Binary bat algorithm. *Neural Computing and Applications*, 25, 663-681.

- Mustakim, Tanuwidjaja, G., Widyowijatnoko, A. Dan Faisal, B. (2009). Bambu Sebagai Material yang Berkelanjutan dan *Affordable* untuk Perumahan. Seminar Nasional pada Universitas Kristen Maranatha, Bandung.
- Rajeev, S. dan Krishnamoorthy, C.S. (1992). Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms. *Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1233-1250.
- Sassu, M., Andreini, M., Falco, A. D. dan Giresini, L. (2012). Bamboo trusses with low cost and high ductility joints. *Open Journal of Civil Engineering*, 2, 229-234.
- Sassu, M., Falco, A.D., Giresini, L. dan Puppio, M.L. (2016). Structural solutions for low-cost bamboo frames: experimental tests and constructive assessments. *Materials (Basel)*, 9(5), 346.
- Supriyadi, B. dan Sukawi. (2013). Penggunaan Bambu Dalam Seni Instalasi Arsitektural. *MODUL*, 13(2).
- Suriani, E. (2017). Bambu Sebagai Alternatif Penerapan Material Ekologis: Potensi dan Tantangannya. *EMARA Indonesian Journal of Architecture*, 3(1), 33-42.
- Tahmasebinia, F., Ma, Y., Joshua, K., Sepasgozar S.M.E., Yu, Y., Li, J., Sepasgozar, S. dan Marroquin, F.A. (2021). Sustainable Architecture Creating Arches Using a Bamboo Grid Shell Structure: Numerical Analysis and Design. *Sustainability*, 13, 2598.
- Yang, X.S. (2010). *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier, London.
- Yu, X. (2007). *Bamboo: Structure and Culture*. Ph.D Thesis of Universitat Duisburg-Essen.