

KAJI KEEFEKTIFAN PENERAPAN TEKNIK Pencarian Bentuk DALAM PERACANGAN STRUKTUR LATTICE SHELL

Eka Satria¹⁾, Jafril Tanjung²⁾, Shiro Kato³⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas Padang, Indonesia, Kampus Limau Manis
Padang Sumatera Barat Indonesia

Phone:+62-751-72586 Fax: +62-751-72566, Email:ekasatria@ft.unand.ac.id

²⁾Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas Padang, Indonesia

³⁾Professor, Dept. Civil and Architecture Engineering, Toyohashi University of Technology,
Toyohashi Japan

ABSTRAK

Makalah ini membahas suatu konsep alternatif dalam perancangan struktur lattice shell dengan menerapkan konsep pencarian bentuk untuk mendapatkan bentuk akhir geometri yang diinginkan dalam perancangan. Dengan menggunakan konsep ini, bentuk geometri awal struktur disetir menuju suatu bentuk yang memiliki tegangan bending terkecil. Perubahan bentuk ini dipengaruhi oleh modus-modus perpindahan yang mungkin terjadi akibat berbagai jenis pembebanan yang diberikan kepada struktur. Perubahan tegangan yang terjadi akibat pembebanan tadi akan menghasilkan suatu faktor koreksi yang nantinya digunakan untuk merubah bentuk awal geometri struktur. Proses seperti ini akan terus berlangsung dalam beberapa kali pengulangan sampai harga penurunan tegangan bending maksimum menjadi konvergen. Untuk menguji keefektifan bentuk akhir struktur ini, suatu analisa kekuatan buckling berdasarkan FEM akan diterapkan kepada bentuk awal dan akhir dari struktur. Harga kekuatan buckling yang diberikan akan menjadi acuan apakah konsep pencarian bentuk ini dapat meningkatkan harga kekuatan struktur.

Keywords: Pencarian Bentuk, Lattice Shell, Tegangan Bending Minimum, Kekuatan Buckling

1. Latar Belakang

Dewasa ini, penggunaan struktur *lattice shell* sebagai rangka atap dari bangunan dengan rentangan yang besar (*long span structures*) ditengah masyarakat telah berkembang dengan sangat cepat. Tidak hanya karena struktur ini dapat mengubah bentuk bangunan menjadi sangat atraktif dari sisi arsitektur, tetapi juga karena mereka menawarkan kekuatan yang baik dengan biaya konstruksi yang ekonomis. Contoh-contoh penerapan struktur *lattice shell* ini dapat dilihat pada stadion olahraga, *hanger* pesawat, gimnasium, museum, terminal, hall, bahkan tempat ibadah sekalipun seperti mesjid, dll. Mengingat fungsinya yang sangat universal, maka struktur-struktur ini dapat dibangun di mana saja, tak peduli apakah daerah tersebut rawan terhadap bencana alam seperti gempa bumi atau tidak. Bahkan di beberapa negara yang memiliki tingkat intensitas gempa yang besar, seperti Jepang, struktur seperti ini kemudian dapat dialihfungsikan sebagai tempat pengungsian penduduk setelah gempa besar terjadi.

Berdasarkan situasi di atas, tentu saja banyak sekali penelitian yang telah dilakukan untuk melihat karakteristik struktur ini dibawah pengaruh

beban berat sendiri dan beban eksternal, khususnya beban dari alam, seperti angin, gempa, salju, dll. Hasilnya bermacam-macam bentuk struktur *lattice shell* untuk rangka atap telah dibuat dan telah diaplikasikan pada banyak bangunan. Dari penelitian-penelitian tersebut juga diketahui bahwa bentuk yang paling ideal dari struktur tersebut adalah suatu bentuk yang memungkinkan hanya gaya aksial dalam arah tekan yang bekerja. Akan tetapi dalam kondisi perancangan sesungguhnya, bentuk ini akan sangat sulit dicapai dikarenakan banyak faktor seperti variasi beban, bentuk tumpuan, ketidakkontinuan geometri, dan sebagainya. Konsekuensinya, harga momen bending dapat menjadi dominan pada beberapa tempat dan kemudian menjadi faktor yang berpengaruh pada kegagalan struktur. Sebagai langkah antisipasi, kebanyakan usaha yang dilakukan adalah dengan memperbesar penampang batang atau dengan menambahkan batang-batang pengaku untuk menurunkan tegangan *bending* yang ada. Cara ini dipandang sebagai alternatif paling praktis dalam mereduksi tegangan bending, sehingga banyak diterapkan oleh para desainer di lapangan. Meskipun solusi ini cukup efektif dari sisi kekuatan struktur akan tetapi tidak terlalu ekonomis dari sisi pembiayaannya.



Mengatasi permasalahan di atas, suatu konsep baru dalam perancangan ditawarkan dengan cara menggiring bentuk awal struktur ke suatu bentuk yang memiliki kondisi momen bending berharga minimal melalui penerapan suatu konsep pencarian bentuk (*form/shape finding*). Makalah ini ditujukan untuk memperkenalkan suatu alternatif konsep teoritik dari teknik pencarian bentuk yang nantinya akan dipergunakan dalam perancangan struktur *lattice shell* dan menguji keefektifan konsep tersebut melalui perbandingan kekuatan *buckling* yang diberikan oleh bentuk awal dan akhir geometri. Untuk memudahkan pemahaman tentang konsep ini, dua buah struktur *lattice shell* sederhana diperkenalkan untuk kemudian dengan menggunakan teknik pencarian bentuk kedua model tersebut disetir dari bentuk awalnya ke bentuk yang memiliki momen *bending* yang terkecil.

2. Konsep Dasar Pencarian Bentuk

Shell adalah suatu struktur alternatif yang paling efisien untuk diterapkan dalam sejumlah kondisi-kondisi yang ekstrem [1]. Di sisi lain, struktur ini mampu untuk memenuhi berbagai macam konsep estetika yang ditawarkan oleh para arsitektur dalam bentuk sealami dan selegan mungkin. Hal yang menjadi alasan utama dari kondisi ini adalah karena pengaruh bentuk *arch* pada *shell* struktur. Bentuk kurva dari struktur *arch* mampu menahan beban-beban desain melalui gaya-gaya membran yang bekerja. Pada struktur *arch*, boleh dikatakan momen bending akan berharga kecil, sehingga praktis hanya gaya membran yang bekerja. Ini berarti *shell* yang didesain untuk bekerja dengan gaya membran telah menunjukkan dirinya sebagai suatu struktur yang optimal. Kebalikan dari bentuk *arch* adalah bentuk rantai tergantung. Keduanya, baik *arch* maupun rantai tergantung berada dalam sebuah kesetimbangan, hanya saja gaya yang bekerja akan saling berlawanan. Jika pada *arch*, gaya yang bekerja adalah dalam arah tekan sebaliknya pada rantai tergantung dalam arah tension.

Bentuk *arch* dan rantai terbalik adalah salah satu dari metode tertua dalam menentukan bentuk geometri sistem yang bebas dari bending. Metode inilah yang dijadikan dasar bagi beberapa arsitek pada jaman dahulu (*Giovanni Poleni, Antonio Gaudi*) untuk mendesain struktur-struktur terkenal seperti *St. Paul Cathedral* di London, Inggris, *St. Peter* di Roma, Italy, *French Pantheon, Colonia Guell* and *Sagrada Familia* di Barcelona, Spanyol [1]. *H. Isler* [2] kemudian melanjutkan konsep model tergantung ini dalam berbagai eksperimennya untuk menentukan bentuk optimum

kurva *shell* dalam dua arah.

Akan tetapi, dalam dunia perancangan sekarang, akan sangat sulit memenuhi aturan desain dengan konsep struktur *arch* ataupun konsep model tergantung, dikarenakan berbagai kondisi *real* yang bekerja pada sistem; seperti beban terkonsentrasi, kondisi tumpuan, ketidakkontinuan struktur, dll, yang memungkinkan momen bending meningkat pada beberapa tempat tertentu. Kebanyakan alternatif solusi yang digunakan untuk menurunkan momen bending ini hanyalah dengan memperbesar penampang atau menambahkan elemen pengaku di daerah yang memiliki momen bending dengan harga dominan atau bahkan dengan merubah material pada daerah tersebut. Meskipun solusi ini cukup efektif dalam menyelesaikan permasalahan, akan tetapi secara ekonomis akan meningkatkan biaya perancangan dan konstruksi.

Suatu alternatif baru ditawarkan adalah bagaimana mereduksi momen *bending* yang bekerja tersebut dengan merubah atau memodifikasi bentuk awal struktur. Teknik ini dikenal dengan nama teknik pencarian bentuk (*form finding technique*). Perbedaan utama konsep ini dengan desain konvensional dapat dilihat pada Gbr.1. Pada konsep desain konvensional, referensi utama adalah beban eksternal dan bentuk geometri untuk mendapatkan harga tegangan sebagai hasil akhir. Sebaliknya, pada konsep pencarian bentuk, referensi awal adalah tegangan dan beban eksternal sedangkan hasil akhirnya adalah bentuk geometri.

Teknik pencarian bentuk ini sebenarnya adalah lanjutan dari konsep model terbalik yang telah diterangkan sebelumnya, akan tetapi dengan melibatkan metode komputasi dari prosedur optimasi suatu struktur yang memang telah berkembang dengan pesat. Dengan melibatkan fungsi optimasi untuk mereduksi tegangan bending yang bekerja menuju kondisi yang paling minimum, geometri awal struktur dapat dirubah sealami mungkin. Sebagai contoh, konsep energi regangan f_E adalah salah satu fungsi yang sesuai untuk menurunkan tegangan *bending* yang bekerja.

$$f_E = \frac{1}{2} \int_V \sigma \cdot \varepsilon dV \quad (1)$$

Pembatasan tegangan f_S dapat dilakukan dengan mereduksi tegangan *bending* yang bekerja sebagaimana fungsi sebagai berikut:

$$f_S = \frac{1}{2E} \int_V (\sigma_0 - \Delta\sigma)^2 dV \quad (2)$$

dimana σ_0 adalah tegangan *bending* awal struktur untuk setiap tahap iterasi dan $\Delta\sigma$ adalah besarnya perubahan tegangan akibat perubahan geometri.

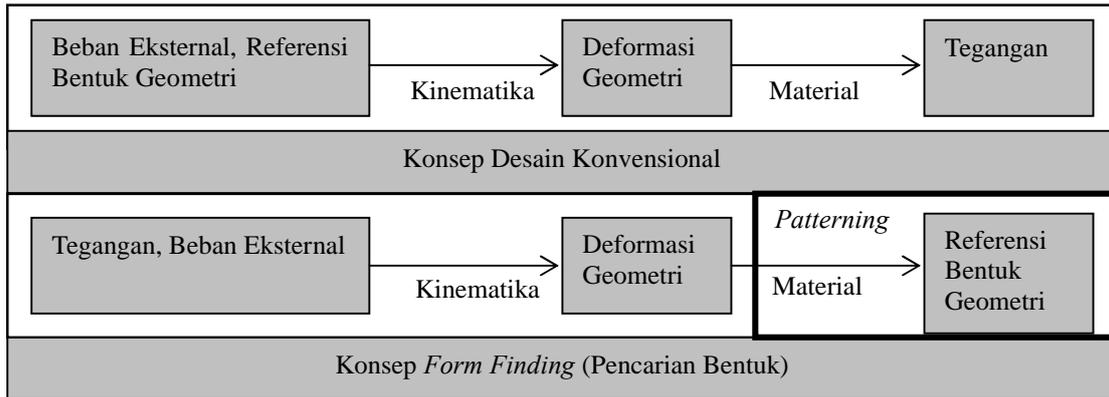
Sebenarnya ada banyak fungsi optimasi yang biasa



digunakan dalam optimasi struktur diluar minimalisasi energi regangan, seperti minimalisasi berat struktur dan biaya konstruksi, dll [1,4,5,6], akan tetapi penelitian ini memfokuskan penggunaan mimimalisasi energi regangan untuk mereduksi tegangan *bending* seperti yang telah diuraikan sebelumnya.

Secara garis besar, ada 3 metode utama yang biasa digunakan dalam proses merubah atau mengontrol bentuk geometri struktur dengan

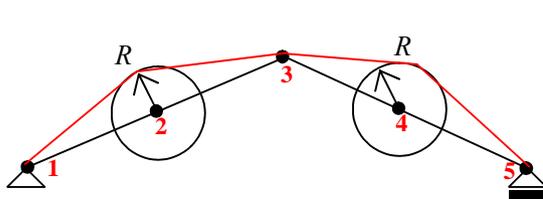
teknik *form finding* ini. Pertama dikenal dengan *Updated Reference Strategy*. Pada metode ini konfigurasi bentuk referensi akan selalu dimodifikasi pada setiap langkah iterasi. Keuntungan utamanya adalah metode ini diturunkan dari konsep mekanika benda elastis, sehingga lebih mudah untuk dipahami, sedangkan keuntungan lainnya, metode ini sangat mudah diaplikasikan secara numerik.



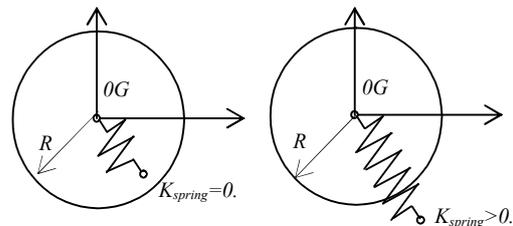
Gbr. 1 Perbedaan Konsep Desain Konvensional dan Form Finding

Tabel 1 Variasi opsi untuk reduksi tegangan

Option 1	All members at two ends for bending deformation
Option 2	All members at one end with a larger bending stress
Option 3	Limited members for ends with bending stresses larger satisfying $\sigma \geq \sigma_y \times s$, where s may be assigned as 0.5. (two ends are considered)
For the above optioned, the loop for axial stresses is skipped.	
Option 4	All members at two ends for not only bending but also axial deformation



Gbr.2 Sebuah contoh dengan model sederhana



Gbr.3 Dua kemungkinan posisi baru setelah perhitungan

Kedua dikenal dengan *Force Density Method*, karena memang kerapatan gayanya diasumsikan konstan disepanjang proses pencarian bentuk. Terakhir adalah *Dynamic Relaxation Method*, dimana struktur dimodelkan sebagai kumpulan nodal dengan massa terkonsentrasi. Gaya yang bekerja tidak hanya beban statik tetapi juga beban inersia dan redaman. Penelitian ini menggunakan metode pertama, *Updated Reference Strategy*, dalam proses perubahan bentuk geometri struktur.

Pada metode ini, proses perubahan geometri ditentukan oleh suatu faktor koreksi bentuk α ,

seperti yang ditunjukkan oleh Pers.(3) berikut:

$$r(u, v, w) = \sum_{i=1}^m \alpha(u, v, w) \cdot r_i(u, v, w) \quad (3)$$

dimana $r(u, v, w)$ adalah besarnya perubahan bentuk geometri dan r_i adalah posisi awal nodal struktur. Pada penelitian ini, faktor koreksi bentuk ditentukan oleh faktor perubahan tegangan yang terjadi pada rangka *frame* yang mana perubahan tegangan tersebut didekati dengan fungsi *kuadratik*, seperti yang diperlihatkan oleh Pers.(6).



3. Teknik Pencarian Bentuk

Konsep teoritik dari teknik pencarian bentuk ini telah diuraikan sebelumnya dalam Ref.[3] dan ditulis ulang pada bahasan berikut untuk memudahkan pemahaman.

3.1. Posisi Awal

Sebagai contoh posisi awal dari sebuah model sederhana (Gbr.3) diberikan oleh Pers.(4) berikut:

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_{1g0} \\ X_{2g0} \\ X_{3g0} \\ X_{4g0} \\ X_{5g0} \end{Bmatrix} \quad \{Y\} = \begin{Bmatrix} Y_{1g0} \\ Y_{2g0} \\ Y_{3g0} \\ Y_{4g0} \\ Y_{5g0} \end{Bmatrix} \quad \{Z\} = \begin{Bmatrix} Z_{1g0} \\ Z_{2g0} \\ Z_{3g0} \\ Z_{4g0} \\ Z_{5g0} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

3.2. Modus Perpindahan

Posisi terbaru dari nodal setelah dibebani diberikan oleh Pers.(5) berikut.

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{1g0} \\ X_{2g0} \\ X_{3g0} \\ X_{4g0} \\ X_{5g0} \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^m \begin{Bmatrix} X_{1i} \\ X_{2i} \\ X_{3i} \\ X_{4i} \\ X_{5i} \end{Bmatrix} \cdot \alpha_i$$

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y_{1g0} \\ Y_{2g0} \\ Y_{3g0} \\ Y_{4g0} \\ Y_{5g0} \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^m \begin{Bmatrix} Y_{1i} \\ Y_{2i} \\ Y_{3i} \\ Y_{4i} \\ Y_{5i} \end{Bmatrix} \cdot \alpha_i$$

$$\begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Z_{1g0} \\ Z_{2g0} \\ Z_{3g0} \\ Z_{4g0} \\ Z_{5g0} \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^m \begin{Bmatrix} Z_{1i} \\ Z_{2i} \\ Z_{3i} \\ Z_{4i} \\ Z_{5i} \end{Bmatrix} \cdot \alpha_i \quad (5)$$

Variabel m menyatakan jumlah modus perpindahan yang terlibat dalam perhitungan dan variabel α_i adalah faktor koreksi yang dihitung berdasarkan sensitivitas dari perhitungan tegangan.

3.3. Sensitivitas Perhitungan

Sensivitas proses penghitungan tegangan berdasarkan estimasi kuadratik seperti yang diberikan Pers.(6)

$$\sigma = \sigma_0 + \sum q_m \cdot \Delta\alpha_m + \sum \sum \frac{1}{2} h_{ml} \cdot \Delta\alpha_m \Delta\alpha_l \quad (6)$$

dimana j berarti jumlah modus, k adalah jumlah

nodal dan 0 berarti kondisi tegangan awal yang dihitung dengan analisis linear.

3.4. Fungsi Target Optimasi

Meskipun investigasi yang utama difokuskan pada proses mereduksi tegangan bending yang terjadi (opsi-1, -2 dan -3 pada Tabel 1), akan tetapi fungsi lain yang melibatkan proses pereduksian gabungan tegangan aksial dan bending juga diperhitungkan (opsi-4).

3.5. Mekanisme Pembatasan Perpindahan

Setelah dioptimasi, posisi terbaru nodal harus terletak di dalam lingkaran dengan jari-jari R (lihat Gbr.4). R adalah batasan perpindahan maksimum yang diijinkan. Jika posisi setelah dioptimasi terletak diluar lingkaran, posisi tersebut harus ditarik kembali ke dalam lingkaran dengan memanfaatkan pegas linear dengan suatu kekakuan $K_{spring} > 0$. Tentu saja kondisi ini juga akan mempengaruhi proses penghitungan faktor koreksi terbaru (α).

3.6. Proses Perhitungan Faktor Koreksi (α)

Ada 2 buah faktor yang mempengaruhi faktor koreksi (α); pertama, akibat pengaruh perubahan gaya-gaya dalam, dan kedua, akibat pengaruh pembatasan perpindahan oleh pegas.

A. Pengaruh Perubahan Gaya-Gaya Dalam

Besarnya energi regangan minimum yang diperoleh jika sensitivitas perhitungan adalah fungsi kuadratik, dinyatakan dengan Pers.(7). Persamaan ini dibagi dalam dua bentuk umum; bentuk linear dan kuadratik, seperti yang ditunjukkan oleh Pers.(8) dan (9). Kedua bentuk ini meliputi proses perubahan seluruh gaya dalam, baik gaya aksial maupun momen bending.

B. Pengaruh Pembatasan Perpindahan

Gaya pembalik yang digunakan untuk membawa nodal kembali ke dalam lingkaran dihitung dengan Pers.(10) sedangkan posisi terbaru nodal dihitung dengan Pers.(11). Berdasarkan energi regangan minimum diperoleh bentuk linear dan kuadratik dari faktor koreksi (α), seperti yang ditunjukkan oleh Pers.(12).

3.7. Perubahan Faktor Koreksi

Untuk menghitung perubahan faktor koreksi, Pers.(13) digunakan:

$$[SMG] = [Quadratic Term]_1 + [Quadratic Term]_2$$

$$[PPG] = [Linear Term]_1 + [Linear Term]_2$$

$$[SMG] \cdot \Delta\alpha = -[PPG] \Rightarrow \Delta\alpha = \frac{[SMG]}{[PPG]} \quad (13)$$

3.8. Faktor Koreksi Baru

Bentuk faktor koreksi baru dihitung



berdasarkan $\alpha_{new} = \alpha + \Delta\alpha \cdot FK$, dimana α_{new} adalah faktor koreksi baru; α faktor koreksi awal (diasumsikan pertama kali); $\Delta\alpha$ perubahan faktor

koreksi; and FK adalah faktor penyesuaian yang diasumsikan dari awal.

A. Pengaruh Perubahan Gaya-Gaya Dalam

$$\Lambda = \frac{1}{2} \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \ell = \frac{1}{2} \sigma \cdot \frac{\sigma}{E} \cdot A \cdot \ell = \frac{A\ell}{2E} \left(\sigma_{k0} + \sum q_{kj} \cdot \Delta\alpha_j + \sum \sum h_{jl} \cdot \Delta\alpha_j \cdot \Delta\alpha_l \right)^2 \quad (7)$$

$$= \frac{A\ell}{2E} \left(\sigma_{k0} \cdot \sigma_{k0} + 2\sigma_{k0} \cdot \sum q_{kj} \cdot \Delta\alpha_j + \sum \sum q_{kj} \cdot q_{kl} \cdot \Delta\alpha_j \cdot \Delta\alpha_l + \sigma_{k0} \cdot \sum \sum h_{jl} \cdot \Delta\alpha_j \cdot \Delta\alpha_l + \text{neglected factor} \right)$$

Bentuk Linear : $= \left\{ \Delta\alpha_1 \quad \Delta\alpha_2 \quad \dots \quad \Delta\alpha_j \right\}^T \left\{ \frac{A\ell}{E} \cdot \sigma_{k0} q_{k1} \quad \frac{A\ell}{E} \cdot \sigma_{k0} q_{k2} \quad \dots \quad \frac{A\ell}{E} \cdot \sigma_{k0} q_{kj} \right\}$ (8)

Bentuk Kuadratik :

$$= \frac{A\ell}{2E} \left(\sum q_{kj} \cdot \Delta\alpha_j \cdot \sum q_{kl} \cdot \Delta\alpha_l \right) = \frac{A\ell}{2E} \left\{ \Delta\alpha_1 \quad \Delta\alpha_2 \quad \dots \quad \Delta\alpha_j \right\} \begin{bmatrix} q_{k1} \cdot q_{k1} & q_{k2} \cdot q_{k1} & \dots & q_{kj} \cdot q_{k1} \\ q_{k1} \cdot q_{k2} & q_{k2} \cdot q_{k2} & \dots & q_{kj} \cdot q_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{k1} \cdot q_{kl} & q_{k2} \cdot q_{kl} & \dots & q_{kj} \cdot q_{kl} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \vdots \\ \Delta\alpha_l \end{Bmatrix};$$

dan

$$\sigma_0 \cdot \frac{A\ell}{2E} \left(\sum h_{jl} \cdot \Delta\alpha_j \cdot \Delta\alpha_l \right) = \sigma_0 \cdot \frac{A\ell}{2E} \left\{ \Delta\alpha_1 \quad \Delta\alpha_2 \quad \dots \quad \Delta\alpha_j \right\} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{l1} & h_{l2} & \dots & h_{lm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \vdots \\ \Delta\alpha_l \end{Bmatrix} \quad (9)$$

B. Pengaruh Pembatasan Perpindahan

$$f_j = 1 - \left\{ \left(\frac{X_{jg0} - X_{0G}}{R_j} \right)^2 + \left(\frac{Y_{jg0} - Y_{0G}}{R_j} \right)^2 + \left(\frac{Z_{jg0} - Z_{0G}}{R_j} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{ig0} \\ Y_{ig0} \\ Z_{ig0} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} X_{0G} \\ Y_{0G} \\ Z_{0G} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ Y_{11} & Y_{12} & & Y_{1m} \\ Z_{11} & Z_{12} & & Z_{1m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \vdots \\ \Delta\alpha_m \end{Bmatrix}, m = \text{mode} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{1}{2} K_i \cdot \left\{ (X_i - X_{0G})^2 + (Y_i - Y_{0G})^2 + (Z_i - Z_{0G})^2 \right\} \\ &= \frac{1}{2} K_i \cdot \left\{ \left((X_{ig0} - X_{0G})^2 + (Y_{ig0} - Y_{0G})^2 + (Z_{ig0} - Z_{0G})^2 \right) + \right. \\ &\quad \left. K_i \cdot \left((X_{ig0} - X_{0G}) \sum_{j=1}^m \{X_{im}\} \Delta\alpha_j + (Y_{ig0} - Y_{0G}) \sum_{j=1}^m \{Y_{im}\} \Delta\alpha_j + (Z_{ig0} - Z_{0G}) \sum_{j=1}^m \{Z_{im}\} \Delta\alpha_j \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} K_i \cdot \left(\left(\sum_{j=1}^m \{X_{im}\} \Delta\alpha_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^m \{Y_{im}\} \Delta\alpha_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^m \{Z_{im}\} \Delta\alpha_j \right)^2 \right) \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

[LinearTerm]₂
[Quadratic Term]₂

4. Studi Kasus dan Pembahasan

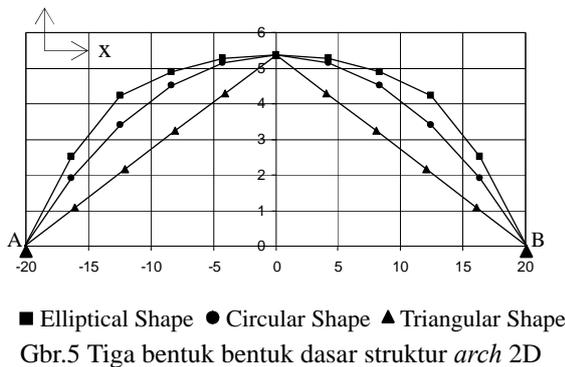
Dua contoh kasus sederhana dari struktur *lattice shell* diperlihatkan pada bahasan ini. Kasus pertama adalah struktur *circular arch* dan kasus kedua adalah struktur *circular dome*. Ada dua perhitungan yang akan digunakan dalam bahasan

ini. Pertama adalah penghitungan bentuk geometri yang paling optimum dengan harga tegangan *bending* maksimum terkecil, kemudian dilanjutkan dengan penghitungan kekuatan *buckling* struktur.

4.1. Struktur Arch 2D

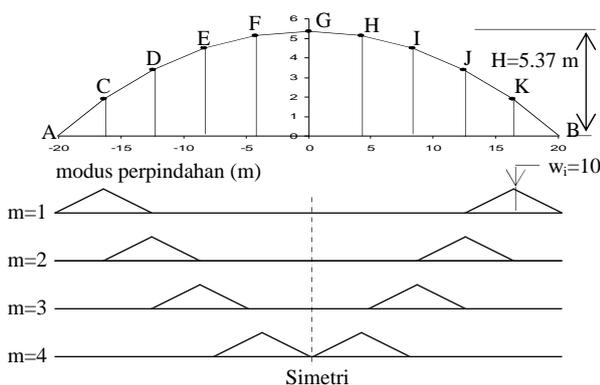


Suatu struktur arch 2D diperlihatkan oleh Gbr.5. Struktur tersebut dibangun dari batangan pipa dengan diameter, $d_0=39.59 \text{ cm}$ dan ketebalan, $t=1.34 \text{ cm}$. Ketinggian arch, $H=537.33 \text{ cm}$ dan panjang arch total, $L_{cr}=4200 \text{ cm}$. Batangan pipa tersebut memiliki bahan dengan tegangan luluh, $\sigma_y=23.5 \text{ kN/cm}^2$ dan elastisitas, $E=20500 \text{ MPa}$.



Struktur arch tersebut ditumpu sederhana pada kedua ujung arch (nodal A dan B). Sementara jenis pembebanan yang diberikan diasumsikan sebagai beban berat sendiri, yang dimodelkan seragam diseluruh nodal sepanjang arch.

Penerapan teknik pencarian bentuk untuk struktur arch ini dibatasi oleh beberapa kondisi, sebagaimana terlihat pada Gbr.6.



Gbr.6 Batasan untuk Teknik Pencarian Bentuk

Dari Gbr.6, beberapa kondisi yang digunakan untuk penerapan teknik pencarian bentuk ini: (i). ketinggian titik G dibuat konstan sebesar $H=537.33 \text{ cm}$, (ii). 4 modulus perpindahan diberikan dalam

bentuk simetri, dengan amplitudo perpindahan diasumsikan seragam sebesar $w_i=10 \text{ cm}$, (iii). perpindahan tiap nodal selama proses pencarian bentuk hanya diijinkan dalam area dengan radius, $R=100 \text{ cm}$, (v). faktor koreksi awal diasumsikan $\Delta\alpha=0.01$ dan $FK=0.1$ (subbab 3.8), dan (vi). target fungsi optimasi yang digunakan adalah opsi-1.

Hasil Pencarian Bentuk

Dengan menggunakan program komputasi berdasarkan persamaan-persamaan matematika yang diberikan pada bab 3, bentuk akhir geometri dari struktur arch diperoleh. Dengan menggunakan bentuk awal *circular*, *ellips* dan *triangular arch*, diperoleh bentuk akhir (optimum) yang sama yaitu bentuk yang hampir mirip dengan bentuk awal *circular arch* (Tabel 2). Perbedaan bentuk yang optimum ini dengan *circular arch* sangat kecil. Akan tetapi jika tegangan *bending* maksimum antara kedua bentuk ini dijadikan acuan, maka tegangan *bending* maksimum dari struktur hasil optimasi akan sedikit lebih kecil dibandingkan dengan struktur awal *circular arch*. Dari Gbr.8 terlihat bahwa untuk struktur arch dengan bentuk geometri *triangular* terjadi penurunan tegangan *bending* maksimum dari $\sigma_b=0.641 \text{ kN/cm}^2$ menjadi 0.0316 kN/cm^2 , untuk struktur *elliptical arch* terjadi penurunan tegangan *bending* maksimum dari $\sigma_b=0.265 \text{ kN/cm}^2$ menjadi 0.0316 kN/cm^2 , dan untuk *circular arch* hanya ada sedikit penurunan dari $\sigma_b=0.024 \text{ kN/cm}^2$ menjadi 0.0071 kN/cm^2 .

Analisa Kekuatan Buckling Struktur

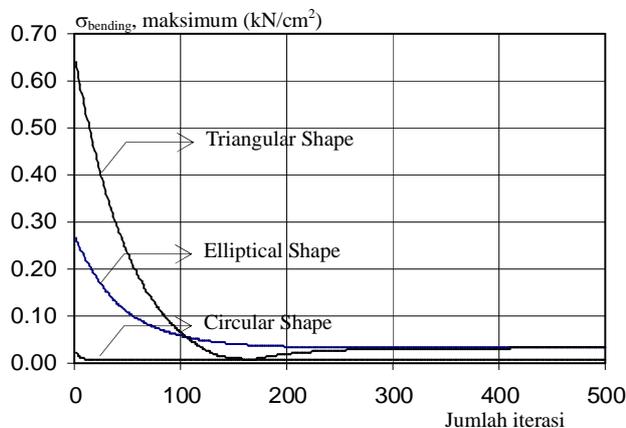
Dengan menggunakan program komputasi berbasis nonlinear FEM untuk struktur rangka *frame*, kekuatan buckling dari struktur arch dengan bentuk-bentuk geometri *elliptical arch*, *circular arch*, *triangular arch* dan bentuk arch optimum yang diperoleh dari teknik pencarian bentuk diperbandingkan satu sama lainnya. Hasil yang diberikan terlihat bahwa kekuatan *buckling* dari struktur arch yang telah dioptimasi memberikan kekuatan *buckling* yang paling tinggi dari bentuk-bentuk awal lainnya. Dari Gbr.8 diperlihatkan bahwa kekuatan *buckling* struktur arch yang dioptimasi sebesar 312 kN , lebih besar dari struktur *circular arch*, 242 kN , struktur *elliptical arch*, 72 kN , dan struktur *triangular arch*, 41 kN . Hasil ini menunjukkan keefektifan teknik pencarian bentuk dalam perancangan struktur *lattice shell* tergambar secara jelas.



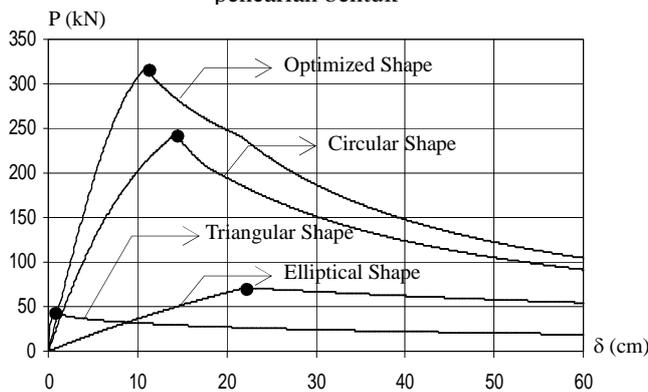
Tabel 2. Harga ketinggian nodal sebelum dan sesudah penggunaan teknik pencarian bentuk (TPB)

	Circular (cm)		Elliptical (cm)		Triangular (cm)	
	Awal	TPB	Awal	TPB	Awal	TPB
A	0.	0.	0.	0.	0.	0.
C	190.6	185.1	250.5	189.5	107.5	189.5
D	341.0	335.1	422.4	340.0	214.9	340.0
E	449.7	446.6	488.7	451.1	322.4	451.1
F	515.4	514.9	525.5	519.3	429.9	519.3
G	537.3	537.3	537.3	537.3	537.3	537.3
H	515.4	514.9	525.5	519.3	429.9	519.3
I	449.7	446.6	488.7	451.1	322.4	451.1
J	341.0	335.1	422.4	340.0	214.9	340.0
K	190.6	185.1	250.5	189.5	107.5	189.5
B	0.	0.	0.	0.	0.	0.

arch disusun dengan oleh sekumpulan batang dengan panjang $l_0=350\text{ cm}$, diameter $d_0=39.59\text{ cm}$ dan tebal $t=0.376\text{ cm}$. Batang pipa tersebut memiliki elastisitas, $E=20500\text{ MPa}$, tegangan luluh, $\sigma_y=23.5\text{ kN/cm}^2$ dan poisson rasio, $\nu=0.2$. Dalam pemodelan, empat buah titik: A,C,E dan G ditumpu sederhana dalam arah sumbu-x, -y dan -z. Jenis pembebanan yang diberikan kepada struktur adalah pembebanan seragam diseluruh permukaan dome. Dalam penerapan teknik pencarian bentuk, ketinggian titik pusat (titik O) diasumsikan sebesar 1074 cm dari dasar struktur dan ketinggian titik pusat sisi struktur (titik B, D, F dan H) adalah sebesar 537 cm dari dasar stuktur. Selama proses optimasi, titik-titik ini ditahan tetap pada posisinya sementara nodal-nodal lain diijinkan terdeformasi secara vertikal dalam rentangan maksimum $R=100\text{ cm}$. Parameter optimasi yang digunakan adalah $\alpha=0.01$, $FK=0.1$ dan $w_{i0}=10\text{ cm}$. Modus perpindahan yang dipergunakan diberikan dalam dua arah, arah sumbu-x dan sumbu-y, sebagaimana terlihat pada Gbr.11.



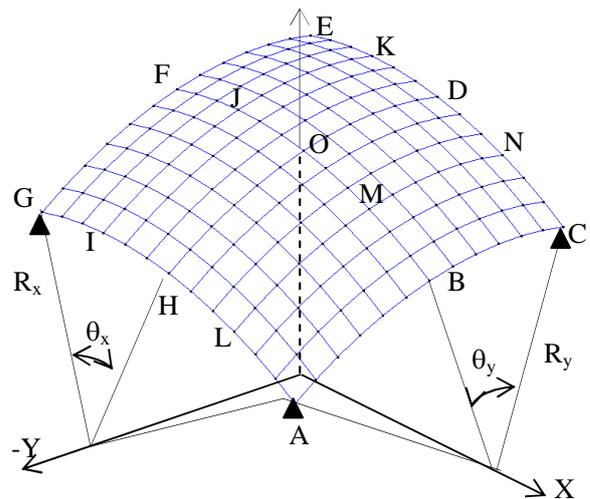
Gbr.8 Reduksi tegangan bending struktur *circular*, *elliptical* dan *triangular arch* dengan teknik pencarian bentuk



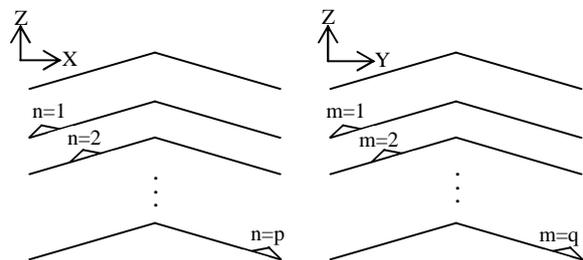
Gbr.9 Perbandingan beban buckling dari struktur *arch* sebelum dan sesudah optimasi.

4.2. Struktur *Lattice Dome*

Model kedua adalah struktur *lattice shell* yang melengkung pada kedua sisinya dengan sudut bukaan setengah yang sama, $\theta_x=\theta_y=30^\circ$ (lihat Gbr.10). Struktur ini juga akan memiliki panjang rentangan yang sama dalam arah sumbu-x dan -y, yaitu sebesar $2\theta_x R_x=2\theta_y R_y=4200\text{ cm}$. Kelengkungan



Gbr.10 Geometri dari *circular lattice dome*



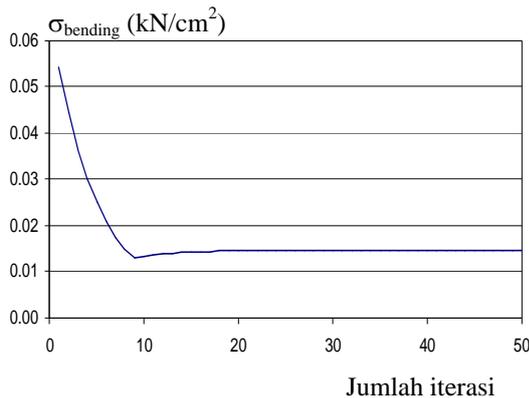
Gbr.11 Modus perpindahan

Hasil Pencarian Bentuk

Dengan menggunakan program komputasi, bentuk akhir geometri dari struktur *dome* diperoleh. Perbedaan bentuk geometri optimum dari struktur

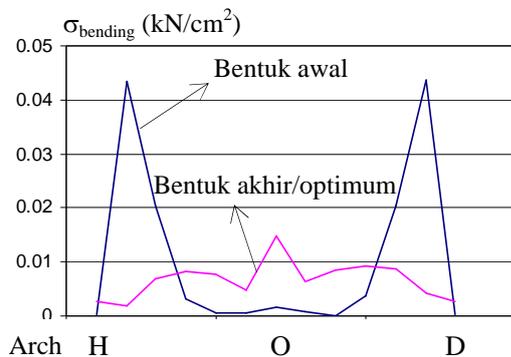


dome yang diperoleh jika dibandingkan dengan bentuk *circular dome* sangat kecil. Akan tetapi jika tegangan *bending* maksimum antara kedua bentuk ini dijadikan acuan, maka tegangan *bending* maksimum dari struktur hasil optimasi akan lebih kecil dibandingkan dengan struktur awal. Dari Gbr 12 terlihat terjadi reduksi tegangan *bending* maksimum dari 0.055 kN/cm² dibentuk geometri awal menuju 0.014 kN/cm² pada bentuk optimum

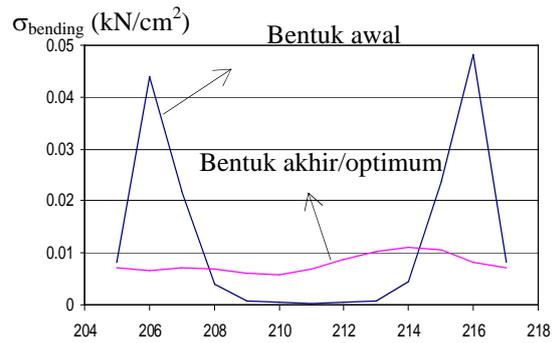


Gbr.12 Reduksi tegangan bending dalam iterasi

Gbr.13 memperlihatkan distribusi tegangan *bending* maksimum pada nodal-nodal di arch HOD, IJK dan LMN (lihat Gbr.10) untuk sebelum dan sesudah teknik pencarian bentuk diterapkan. Pada arch HOD terlihat bahwa tegangan *bending* maksimum turun dari sekitar 0.042 kN/cm² menjadi 0.015 kN/cm². Sedangkan arch IJK dan LMN yang pada struktur simetri satu sama lain terhadap sumbu-y, diperoleh hasil yang sama dengan penurunan tegangan dari 0.042 kN/cm² menjadi 0.011 kN/cm².



(a)



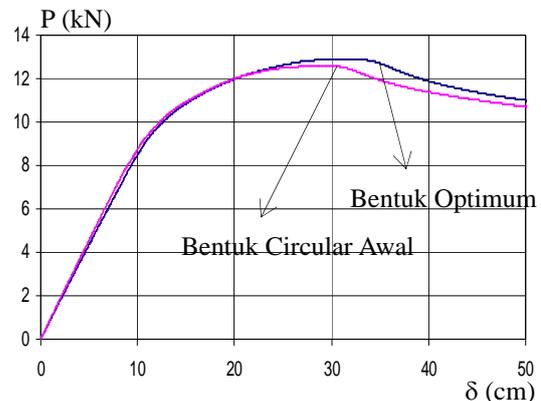
Arch I J K
L M N

(b)

Gbr.12 Distribusi tegangan *bending* maksimum sebelum dan sesudah penerapan teknik pencarian bentuk (a). untuk arch HOD (b). untuk arch IJK dan LMN

Analisa Kekuatan *Buckling* Struktur

Dengan menggunakan program komputasi berbasisan nonlinear FEM untuk struktur rangka frame, kekuatan *buckling* dari bentuk optimum dan bentuk awal *circular dome* diperbandingkan satu sama lain. Hasil yang diberikan pada Gbr.13 terlihat bahwa kekuatan *buckling* dari struktur *lattice dome* yang telah dioptimasi (13.0 kN) sedikit lebih tinggi dari bentuk awal (12.5 kN). Hasil ini menunjukkan keefektifan teknik pencarian bentuk dalam perancangan struktur *lattice shell* tergambar secara jelas



Gbr.13 Perbandingan beban buckling dari struktur *lattice dome* sebelum dan sesudah optimasi.

5. Kesimpulan

Hal-hal penting yang dapat dijadikan kesimpulan dari makalah ini adalah:

- Konsep pencarian bentuk yang digunakan dalam makalah ini dapat bekerja secara baik untuk mendapatkan bentuk optimum suatu struktur *lattice shell* dibawah pengaruh berbagai jenis



pembebanan vertikal. Bentuk optimum ini ditandai dengan harga terkecil dari tegangan bending maksimum yang diberikan oleh bentuk akhir struktur.

- Dari perbandingan kekuatan *buckling* yang dilakukan terhadap struktur *lattice shell* dengan geometri optimum yang diperoleh dari teknik pencarian bentuk dan kekuatan *buckling* bentuk awal struktur *lattice shell* diperoleh bahwa kekuatan *buckling* struktur yang dioptimasi jauh lebih besar dari struktur awal. Ini mengindikasikan bahwa teknik pencarian bentuk cukup efektif digunakan dalam perancangan struktur *lattice shell* yang biasanya gagal karena *buckling*.
- Bentuk akhir struktur dalam makalah ini hanya dibawah pengaruh kombinasi pembebanan vertikal seperti berat sendiri dan beban eksternal seperti beban salju. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, sebaiknya pengaruh beban horizontal seperti beban seismik atau beban angin sebaiknya juga diperhitungkan.

6. Ucapan Terimakasih

Makalah ini adalah bagian dari penelitian yang dibiayai oleh dana research grant IMHERE Unand tahun anggaran 2010. Untuk itu, dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada IMHERE Jakarta atas dana research yang diberikan.

Referensi

1. Ramm, E; Mehlorn, G. (1991), On Shape Finding Methods and Ultimate Load Analyses of Reinforced Concrete Shells, *Engineering Structures*, 13, 178-198.
2. J.S., Brew; W.J. Lewis. (2007), Free Hanging Membrane Model for Shell Structure, *Int. Journal for Numerical Methodin Eng.*, 71, 1513-1533
3. Satria, E; Kato, S.; Nakazawa, S. (2009); Form Finding of RC Shells Considering Multiple Design Loads, *The 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structure*, Nagoya, Japan, May, 89-90.
4. Bletzinger, K.U; Ramm, E (1993), Form Finding of Shells by Structural Optimization, *Engineering with Compt.*, 9, 27-35
5. Bletzinger, K.U; Kimmich, S; Ramm, E (1991), Efficient Modeling in Shape Optimal Design, *Computing Systems in Engineering*, 2, 483-495
6. Bletzinger, K.U; Wuchner, R; Daoud, F, Camprubi, N (2005), *Computational Methods for Form Finding and Optimization of Shells and Membranes*.



