

Perbaikan Metode Perancangan Struktur Atap pada Daerah Rawan Gempa

Eka Satria^{1,a}, Shiro Kato², Yutaka Niho³

¹ Lab. Dinamika Struktur, Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas, Indonesia

² Toyohashi University of Technology, Japan

³ Kure National of Technology, Japan

Email: ^aekasatria@ft.unand.ac.id

Abstrak

Makalah ini menawarkan rekomendasi perbaikan terhadap metode perancangan struktur atap dari jenis *lattice shell* untuk daerah rawan gempa. Pada metode konvensional, kapasitas maksimum struktur atap dapat dihitung jika langkah-langkah berikut telah terpenuhi: (1) pemodelan geometri struktur atap, (2) pemodelan kondisi-kondisi batas, (3) pemodelan kekakuan pada sambungan batang, (4) penentuan dimensi dari batang rangka, dan (5) pemodelan pembebahan. Hasil yang diperoleh sebenarnya cukup berhasil untuk menentukan kapasitas maksimum dari struktur. Akan tetapi dengan berkembangnya teori-teori optimasi struktur dan berbagai mekanisme pengontrol kerusakan yang mampu menyerap energi ketika struktur mendapat beban yang cukup besar, maka metode perancangan ini akan terus menerus mengalami perbaikan. Makalah ini mengadopsi tiga teknik tambahan yang tidak hanya dapat lebih meningkatkan kekuatan, akan tetapi dipertimbangkan juga dapat menurunkan biaya konstruksi, dan meningkatkan keamanan dari perancangan.

Kata kunci : Struktur Atap, Buckling, Pencarian Bentuk, Penyesuaian Dimensi, Pengontrol Kerusakan

Pendahuluan

Makalah ini membahas usulan perbaikan pada prosedur perancangan struktur ruang pada daerah yang memiliki beban seismik yang cukup tinggi. Tidak seperti pada prosedur perancangan konvensional yang lebih menekankan pada aspek kekuatan, usulan ini juga mempertimbangkan aspek lain seperti biaya konstruksi dan keamanan. Ada tiga usulan perbaikan yang dibahas, sebagai berikut:

1. Penerapan Teknik Pencarian Bentuk (TPB) dalam menentukan bentuk geometri dari struktur ruang,
2. Penerapan Teknik Penyesuai Dimensi (TPD) dalam menentukan dimensi dari batang rangka penyusun struktur ruang,
3. Penerapan Model Pengontrol Kerusakan (MPK) sehingga struktur dapat menyerap sendiri energi pembebahan yang menimpanya.

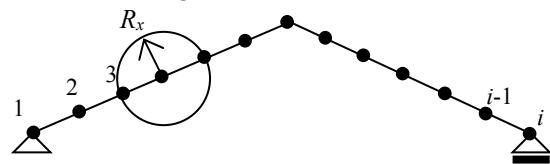
Teknik Pencarian Bentuk

TPB adalah suatu alternatif yang sedang berkembang dalam mengontrol atau merubah bentuk geometri awal struktur ke suatu bentuk dengan harga tegangan kerja kritis minimal.

Proses pencarian bentuk ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut [1,2,3]:

1. Penentuan koordinat geometri awal model, jenis material, bentuk dan dimensi batang penyusun, kondisi batas dan jenis pembebahan. Sebagai contoh, sebuah struktur atap dengan tampak samping diberikan seperti terlihat pada

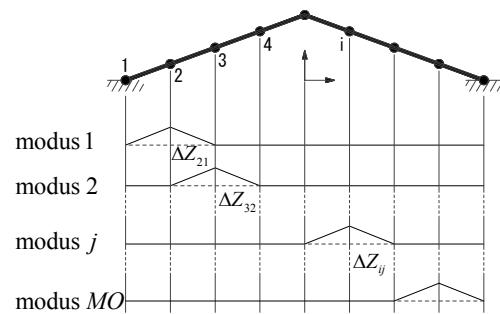
Gambar.1, terdiri dari beberapa batang dengan *i* nodal sambungan.



Gambar.1 Tampak samping struktur

Koordinat nodal awal sebelum diberikan beban dinyatakan dengan (X_{ig}, Y_{ig}, Z_{ig}) , sedangkan koordinat setelah diberikan beban dinyatakan $(X_{ig0}, Y_{ig0}, Z_{ig0})$.

2. Penentuan bentuk-bentuk modus perpindahan (diasumsikan sebanyak m atau MO modus), $\{\square X_{im}\}$, $\{\square Y_{im}\}$ dan $\{\square Z_{im}\}$, yang akibat jenis pembebahan yang diberikan oleh Pers.(1).



Gambar.2 Modus-modus perpindahan [3]

$$\left. \begin{array}{l} \{\Delta X_{im}\} = \{\Delta X_{i1}, \Delta X_{i2}, \Delta X_{i3}, \dots, \Delta X_{ij}, \dots, \Delta X_{i(MO)}\} \\ \{\Delta Y_{im}\} = \{\Delta Y_{i1}, \Delta Y_{i2}, \Delta Y_{i3}, \dots, \Delta Y_{ij}, \dots, \Delta Y_{i(MO)}\} \\ \{\Delta Z_{im}\} = \{\Delta Z_{i1}, \Delta Z_{i2}, \Delta Z_{i3}, \dots, \Delta Z_{ij}, \dots, \Delta Z_{i(MO)}\} \end{array} \right\}$$

... (1)

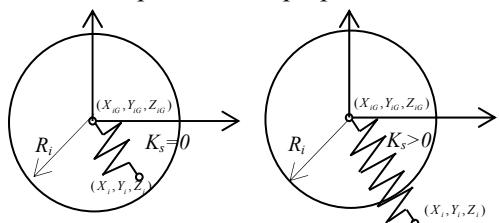
3. Penentuan koordinat geometri setelah dengan teknik pencarian bentuk yang dinyatakan dengan (X_i, Y_i, Z_i) dilakukan dengan Pers.(2). Dimana α_j adalah suatu faktor koreksi yang nilai awalnya diambil sembarang.

$$\left. \begin{array}{l} X_i = X_{ig0} + \sum_{j=1}^{MO} (\Delta X_{ij} \cdot \alpha_j) = X_{ig0} + \{\Delta X_{im}\} \{\alpha\} \\ Y_i = Y_{ig0} + \sum_{j=1}^{MO} (\Delta Y_{ij} \cdot \alpha_j) = Y_{ig0} + \{\Delta Y_{im}\} \{\alpha\} \\ Z_i = Z_{ig0} + \sum_{j=1}^{MO} (\Delta Z_{ij} \cdot \alpha_j) = Z_{ig0} + \{\Delta Z_{im}\} \{\alpha\} \end{array} \right\}$$

... (2)

dimana $\{\alpha\}^T = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_{MO}\}$

4. Perpindahan koordinat geometri (X_i, Y_i, Z_i) hanya bisa diterima jika tidak melewati batasan yang sudah ditetapkan sebelumnya, R_i . Jika seandainya batasan terlewati maka akan ada suatu mekanisme untuk menarik kembali koordinat tersebut agar masih berada dalam batasan, R_i . Gambar.3 memperlihatkan mekanisme pembatasan perpindahan ini.



Gambar.3 Mekanisme pegas untuk pembatasan perpindahan maksimum

Suatu koordinat baru (X_i, Y_i, Z_i) akan berada di dalam radius perpindahan yang diijinkan, R_i , atau harga suatu fungsi $f_i = 1 - \frac{1}{R_i} \cdot \delta_i > 0$.

Sebaliknya jika koordinat baru ini berada di luar radius perpindahan yang diijinkan, $f_i = 1 - \frac{1}{R_i} \cdot \delta_i < 0$, maka suatu mekanisme

penarik dengan memanfaatkan pegas linear dengan kekakuan K_s akan diaktifkan. Parameter perpindahan δ_i dihitung dengan Pers.(3).

$$\delta_i = \sqrt{(X_i - X_{iG})^2 + (Y_i - Y_{iG})^2 + (Z_i - Z_{iG})^2}$$

(3)

Energi pegas penarik ini diberikan oleh Pers.(4).

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{NODE} (K_{Si} \cdot \delta_i^2)$$

... (4)

5. Penghitungan tegangan kerja pada setiap batang dengan menggunakan analisa linear elastik, pada dua kondisi; pertama, pada saat struktur diberi beban $(X_{ig0}, Y_{ig0}, Z_{ig0})$, kedua, pada kondisi dengan modus perpindahan telah dilibatkan (X_i, Y_i, Z_i) .
6. Proses mereduksi nilai tegangan ini dilakukan dengan teknik minimalisasi fungsi U seperti yang diberikan Pers.(5) berikut ini:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{MEM} \left\{ \frac{A_k \ell_k}{E_k} (({}_b \sigma_k^{(1)})^2 + ({}_b \sigma_k^{(2)})^2) \right\} \quad (5)$$

dimana A_k , ℓ_k , dan E_k adalah luas penampang, panjang dan modulus elastisitas dari suatu batang ke- k dari struktur. MEM adalah jumlah total batang. Tegangan ${}_b \sigma_k^{(1)}$ dan ${}_b \sigma_k^{(2)}$ adalah tegangan lentur pada kedua ujung batang ke- k .

7. Sensitivitas perhitungan dilakukan Pers.(6) dengan mengasumsikan perubahan tegangan yang terjadi dalam hubungan linear.

$${}_b \sigma_{kj}^{(l)} = {}_b \sigma_{k0}^{(l)} + {}_b g_{kj}^{(l)} \alpha_j$$

... (6)

Simbol j dan 0 melambangkan tegangan lentur pada saat modus- j diperhitungkan dan pada saat kondisi awal (dimana modus-modus perpindahan belum diperhitungkan).

8. Perubahan faktor koreksi α_j dilakukan berdasarkan dua kondisi:
- akibat perubahan tegangan lentur setiap batang (tahapan-7), dan
 - akibat mekanisme pegas yang akan menarik kembali koordinat yang melewati batasan perpindahan, R_i (tahapan-4).
9. Energi akibat perubahan tegangan lentur setiap batang diperoleh dengan mensubsitusikan Pers.(6) ke dalam Pers. (5) sebagai berikut:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{MEM} \left\{ \frac{A_k \ell_k}{E_k} \left[({}_b \sigma_{k0}^{(1)} + {}_b g_{kj}^{(1)} \alpha_j)^2 + ({}_b \sigma_{k0}^{(2)} + {}_b g_{kj}^{(2)} \alpha_j)^2 \right] \right\}$$

... (7)

10. Energi pegas untuk menarik kembali koordinat yang melebihi batasan, R_i , dinyatakan sebagai berikut:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{NODE} \left\{ K_{Si} \cdot \begin{pmatrix} (X_i - X_{iG})^2 + (Y_i - Y_{iG})^2 \\ + (Z_i - Z_{iG})^2 \end{pmatrix} \right\} \quad \dots (8)$$

11. Jika fungsi $W \neq 0$, maka faktor koreksi terbaru α_{new} dapat dihitung dengan Pers.(9) berikut:

$$\delta U^* = 0 \quad \dots (9)$$

$$\text{dimana } U^* = U + W \quad \dots (10)$$

Hasil yang diberikan oleh Pers.(9) dapat dinyatakan dengan Pers.(11) berikut:

$$\{LT_1\} + \{LT_2\} = -[[QT_1] + [QT_2]]\{\alpha\} \quad \dots (11)$$

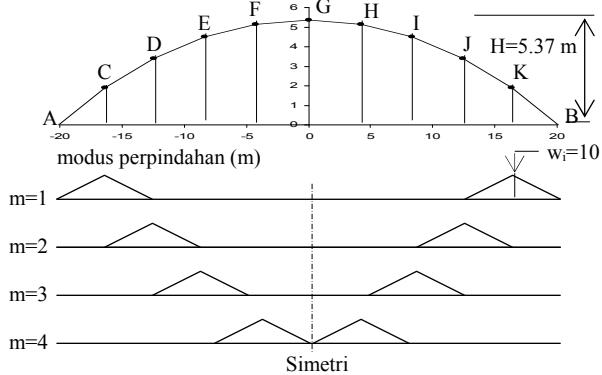
dimana

$$\left. \begin{aligned} \{LT_1\} &= \sum_{k=1}^{MEM} \left\{ \frac{A_k \ell_k}{E_k} \left\{ {}_b \sigma_{k0}^{(1)} \{{}_b g_{kj}^{(1)}\} + {}_b \sigma_{k0}^{(2)} \{{}_b g_{kj}^{(2)}\} \right\} \right\} \\ \{LT_2\} &= \sum_{i=1}^{NODE} K_{Si} \left\{ (X_{ig0} - X_{iG}) \{X_{im}\} + (Y_{ig0} - Y_{iG}) \{Y_{im}\} + (Z_{ig0} - Z_{iG}) \{Z_{im}\} \right\} \\ [QT_1] &= \sum_{k=1}^{MEM} \frac{A_k \ell_k}{E_k} \left[\{{}_b g_{kj}^{(1)}\} \{{}_b g_{kj}^{(1)}\}^T + \{{}_b g_{kj}^{(2)}\} \{{}_b g_{kj}^{(2)}\}^T \right] \\ [QT_2] &= \sum_{i=1}^{NODE} K_{Si} [\{X_{im}\} \{X_{im}\}^T + \{Y_{im}\} \{Y_{im}\}^T + \{Z_{im}\} \{Z_{im}\}^T] \end{aligned} \right\} \quad \dots (12)$$

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk melihat keefektifan TPB dalam meningkatkan kekuatan struktur [1,2,3]. Contoh yang paling sederhana [2] memperlihatkan bagaimana struktur bidang dengan bentuk yang bervariasi seperti segitiga, *circular*, dan *ellips* dapat dirubah ke bentuk akhir yang memiliki tegangan lentur terkecil.

Struktur bidang 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 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.

Gambar.4 memperlihatkan struktur dengan bentuk awal *circular* serta bentuk modus perpindahan yang diberikan.



Gambar.4 Struktur bidang *circular* dan modus perpindahannya [2]

Dari Gambar.4, beberapa kondisi yang digunakan untuk penerapan TPB ini: (i). ketinggian titik G dibuat konstan sebesar $H=537.33 \text{ cm}$, (ii). 4 modus 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, $R=100 \text{ cm}$, (iv). faktor koreksi awal diasumsikan seragam untuk semua modus $\alpha=0.01$.

Hasil Pencarian Bentuk

Dengan menggunakan program komputasi berdasarkan prosedur TPB di atas, bentuk akhir geometri dari struktur bidang diperoleh. Dengan menggunakan bentuk awal *circular*, *ellips* dan segitiga, diperoleh bentuk akhir yang sama yaitu bentuk yang hampir mirip dengan bentuk awal *circular*. Perbedaan koordinat bentuk yang optimum ini dengan bentuk *circular* awal sangat kecil. Akan tetapi jika tegangan lentur maksimum antara kedua bentuk ini dijadikan acuan, maka tegangan lentur maksimum dari struktur hasil optimasi akan sedikit lebih kecil dibandingkan dengan struktur awal *circular*. Dari Gambar.5 terlihat bahwa untuk struktur bidang dengan bentuk geometri segitiga terjadi penurunan tegangan lentur maksimum dari $\sigma_b=0.641 \text{ kN/cm}^2$ menjadi 0.0316 kN/cm^2 , untuk struktur *ellips* terjadi penurunan tegangan lentur maksimum dari $\sigma_b=0.265 \text{ kN/cm}^2$ menjadi 0.0316 kN/cm^2 , dan untuk *circular* hanya ada sedikit penurunan dari $\sigma_b=0.024 \text{ kN/cm}^2$ menjadi 0.0071 kN/cm^2 .

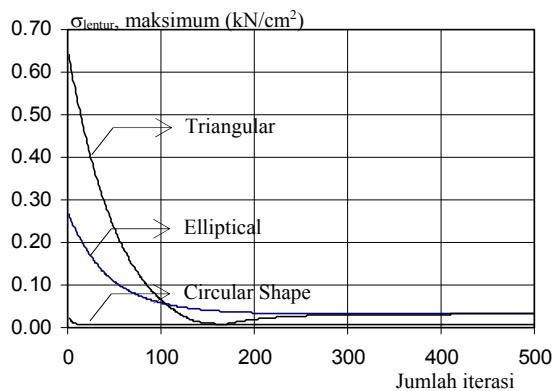
Analisa Kekuatan Buckling Struktur

Dengan menggunakan program komputasi berbasiskan nonlinear FEM untuk struktur rangka *frame*, kekuatan *buckling* dari struktur bidang

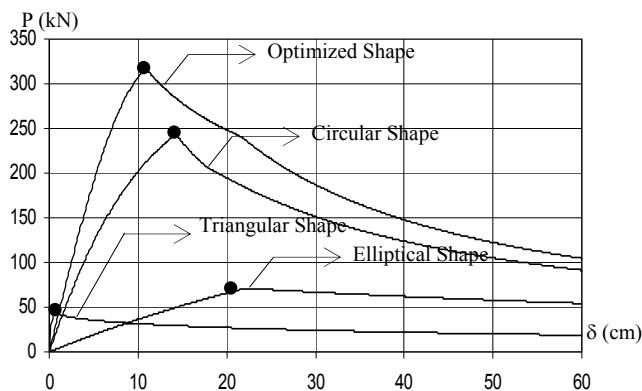
dengan bentuk-bentuk geometri *ellips*, *circular* dan segitiga dan bentuk optimum dari TPB diperbandingkan satu sama lainnya. Hasil yang diberikan terlihat bahwa kekuatan *buckling* dari struktur hasil optimasi dengan TPB memberikan kekuatan *buckling* yang paling tinggi dari bentuk-bentuk awal lainnya. Dari Gambar.6 diperlihatkan bahwa kekuatan *buckling* struktur hasil optimasi sebesar 312 kN, lebih besar dari struktur *circular*, 242 kN, struktur *ellips*, 72 kN, dan struktur segitiga, 41 kN. Hasil ini menunjukkan keefektifan TPB dalam perancangan struktur ruang tergambar secara jelas.

Teknik Penyesuaian Dimensi

TPD akan menghitung ulang dimensi dari rangka struktur dan menyesuaikannya dengan kapasitas maksimum struktur yang direncanakan pada awal perancangan. Melalui konsep ini diperoleh suatu dimensi rangka batang yang optimal yang biasanya akan lebih kecil dari dimensi awal yang ditetapkan sebelum perancangan. Konsekuensinya berat total struktur akan lebih ringan sehingga biaya konstruksi juga akan turun.



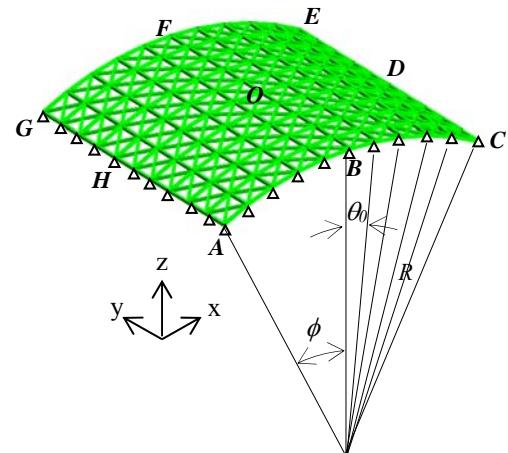
Gambar.5 Reduksi tegangan lentur struktur *circular*, *ellips* dan segitiga dengan TPB [2]



Gambar.6 Perbandingan beban buckling dari struktur bidang sebelum dan sesudah optimasi dengan TPB [2]

Prosedur umum untuk konsep TPD ini dijelaskan secara detail dalam Ref.[4], dan keefektifannya diperlihatkan pada sebuah struktur sederhana berbentuk panel silinder, diperkenalkan oleh **Niho et.al** [3], seperti diperlihatkan oleh Gambar.7. Struktur atap ini dibentuk oleh batang-batang penyusun dalam arah longitudinal yang sejajar dengan sumbu-x dan batang-batang diagonal yang memotong sumbu-x sehingga membentuk sudut 60° dengan batang longitudinal. Jumlah divisi dalam arah sumbu-x dilambangkan dengan n_x sebesar 6 sedangkan dalam arah *circumferential* dilambangkan dengan n_y sebesar 10. Panjang setiap batang penyusun sendiri diasumsikan sama sekitar 4000 mm. Sudut bukaan awal (ϕ) akan terbagi lagi akibat pengaruh jumlah divisi n_y . Sudut ini dilambangkan dengan θ_0 dibuat bervariasi dari 2, 3 sampai 4 derajat. Setiap nodal pada struktur atap akan bekerja gaya vertikal ke bawah sebesar $P_d = 54.32\text{kN}$ dan dibebani dengan kombinasi antara tumpuan tetap (titik A, C, E dan G) dan *roller* pada sisi luarnya.

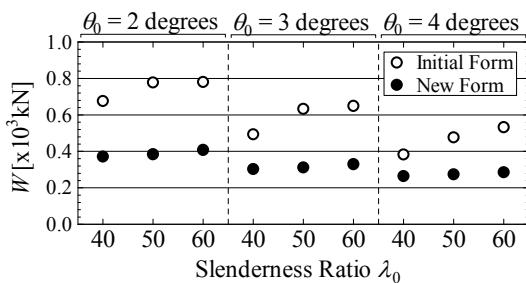
Untuk dimensi pada batang, struktur atap disusun oleh batangan pipa baja dengan modulus elastisitas $E_k = 2.06 \times 10^2 \text{ kN/mm}^2$ dan tegangan luluh $\sigma_y = 0.235 \text{ kN/mm}^2$. Kemudian seluruh batang diasumsikan tersambung secara kaku pada sebuah nodal di kedua ujung batang tersebut. Kelangsungan batang λ_0 dibuat bervariasi dalam harga 40, 50 dan 60.



Gambar.7 Panel Silinder

Tabel.1 Penurunan harga diameter dan ketebalan batang penyusun [3]

θ_0	θ_0	Dimensi Baru		Dimensi Awal	
		t_k [mm]	d_k [mm]	t_k [mm]	d_k [mm]
2°	40	9.033	282.8	18.96	311.1
	50	11.86	226.3	24.60	273.8
	60	15.43	188.6	24.49	276.1
3°	40	5.916	282.8	13.37	282.8
	50	8.020	226.3	20.19	248.9
	60	10.42	188.6	21.23	251.0
4°	40	4.457	282.8	9.303	282.8
	50	6.027	226.3	15.48	226.3
	60	7.818	188.6	18.08	228.2



Gambar.8 Penurunan berat struktur akibat penurunan diameter dan ketebalan pipa [3]

Tabel.1 memperlihatkan penurunan harga diameter, d_k , dan ketebalan pipa batang, t_k , penyusun struktur panel silinder dengan menggunakan TPD, sehingga secara langsung hal ini dapat mengurangi berat struktur secara keseluruhan (Gambar.8).

Sebagai contoh, untuk panel silinder dengan sudut bukaan $\theta_0=2^\circ$ dan untuk batang dengan rasio kelangsungan, $\lambda_0=40$, terjadi pengurangan diameter pipa dari 311.1 mm menjadi 282.8 mm dan pengurangan ketebalan dari 18.96 mm menjadi 9.033 mm. Pengurangan ini tentu akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap berat total dari struktur.

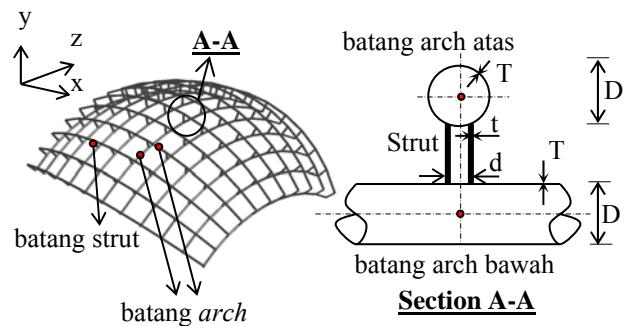
Sebagaimana yang terlihat pada Gambar.8 terjadi penurunan berat total struktur dari sekitar 680 kN menjadi 380 kN. Harga ini hampir mendekati setengah dari berat awal struktur, sehingga dari sisi biaya konstruksi, desain dapat yang diperoleh bernilai lebih ekonomis.

Hanya saja dengan menggunakan dimensi pipa yang lebih kecil, tentu saja kekuatan struktur akan menjadi lebih kecil dari sebelumnya. Hasil penghitungan menunjukkan rasio kekuatan maksimum terhadap beban desain (P_{cr}/P_d) turun dari 1.8 ke 1.4. Akan tetapi jika harga kekuatan maksimum ini diperbandingkan terhadap berat total struktur (P_{cr}/W) maka rasio P_{cr}/W struktur dengan pipa yang direduksi masih berharga lebih besar dari rasio P_{cr}/W struktur dengan pipa awal (10.5 terhadap 7.5).

Mekanisme Pengontrol Kerusakan (MPK)

Usulan perbaikan lainnya adalah mencari model pengontrol kerusakan yang dapat diterapkan langsung pada struktur. Melalui MPK, bagian dari struktur (yang secara desain bukan bagian kritis) akan dikondisikan lebih lemah, sehingga ketika struktur mengalami pembebahan yang cukup besar, maka dampak kerusakan dapat dilokalisir hanya pada bagian yang dilemahkan ini saja, bukan pada bagian yang paling kritis pada struktur.

Makalah ini mengusulkan penggunaan sambungan-T sebagai model pengontrol kerusakan yang diterapkan pada struktur atap jenis dome.



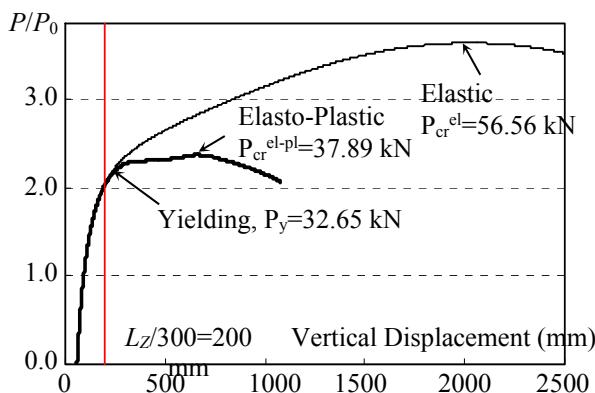
Gambar.9 Penggunaan sambungan-T pada struktur atap jenis dome [5,6]

Hasil-hasil penghitungan [5,6,7] terhadap karakteristik struktur atap dengan sambungan-T ini menunjukkan:

Pertama, dari investigasi kelayakan (*feasibility*) yang dilakukan terhadap struktur tersebut akibat pembebahan statik diperoleh bahwa struktur tersebut cukup layak digunakan sebagai rangka utama struktur atap.

Sebagai contoh, sebuah struktur atap seperti yang diperlihatkan pada Gambar.9 memiliki panjang rentangan $L=60m$ dibagi dalam ukuran grid segi empat yang sama $6m \times 6m$. Sebuah batang strut dengan diameter $d=216.3$ mm dan ketebalan $t=8mm$ digunakan sebagai penghubung dari dua batang arch yang bersilangan yang memiliki dimensi $D=318.5$ mm dan ketebalan $T=8mm$. Sudut bukaan kemiringan $\theta=30^\circ$ berharga sama dalam arah sumbu-x dan sumbu-y. Dari hasil perhitungan, lihat Gambar.9, diperoleh beban *buckling* yang bekerja sebesar $P_{cr}^{el}=56.56$ kN berdasarkan analisis elastik dan $P_{cr}^{el-pl}=37.89$ kN berdasarkan analisis elasto-plastik. Kemudian peluluhan (*yielding*) akan terjadi pertama kali pada sambungan-T dengan $P_{yield}=32.65$ kN. Berdasarkan suatu kriteria desain yang terdapat pada Standar Perancangan Struktur Baja yang dikeluarkan oleh AIJ (*Architectural Institute of Japan*) tahun 2002 dinyatakan bahwa perpindahan

maksimum akibat beban kritis berdasarkan analisis elastis harus kecil atau sama dari $\delta_{max}=L/300$, dimana L adalah panjang rentangan atap maksimum. Sehingga berdasarkan data panjang rentangan 60m diperoleh $\delta_{max}=200mm$. Ini berarti beban yang bekerja pada $\delta_{max}=200mm$ diasumsikan sebagai beban kritis, dimana $P_{cr}/P_0 = 2.06$ atau $P_{cr}=31.1kN$. Intensitas pembebanan persatuannya luas grid segi empat diperoleh $p_{cr, design}=(2 \times 31.1kN)/(6 \times 6m^2)=1.73 kN/m^2$. Hasil ini membuktikan, secara praktik, struktur dome ini dapat digunakan untuk mendukung gabungan beban berat sendiri dan beban luar seperti salju sebesar $1.73kN/m^2$. Jika diasumsikan beban berat sendiri sebesar $0.8 kN/m^2$, ini berarti beban salju yang bisa ditahan adalah sebesar $0.93kN/m^2$. Beban salju sebesar ini biasanya dapat ditemukan pada daerah-daerah dengan salju yang tergolong sedang di Jepang.

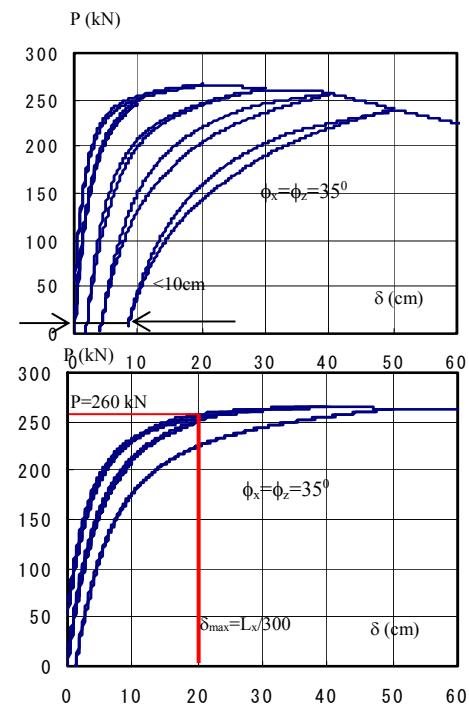


Gambar.9 Hasil perhitungan beban *buckling* struktur atap [5,7]

Kedua, dari karakteristik sambungan-T dibawah pengaruh beban statik berulang memperlihatkan bahwa sambungan tersebut dapat bertindak sebagai suatu sistem yang mampu merekoveri deformasi struktur yang besar untuk kembali ke posisi semula (*self recovery system*). Hal ini disebabkan karena pengaruh adanya momen pembalik pada sambungan, sehingga walaupun beban besar terjadi, kondisi sambungan masih dominan teregang secara elastis. Regangan elastis sisa inilah yang akan merekoveri perpindahan yang besar tadi, sehingga perpindahan sisa pada nodal acuan menjadi tidak begitu besar.

Sebagai contoh, Gambar.10 memperlihatkan respon perpindahan pada dua nodal referensi dibawah pengaruh beban statik berulang. Beban salju yang berulang ($1 kN/m^2$ pada setiap layer of dome) diberikan dalam 5 tahap proses pembebanan dan penghilangan beban (*loading-unloading steps*). Beban pertama diberikan sampai perpindahan nodal pada titik referensi mencapai

$\delta_l=100mm$, kemudian diikuti dengan penghilangan beban sampai gaya menjadi nol, $P=0 kN$. Pembebaan kedua diberikan sampai perpindahan nodal mencapai $\delta_2=200mm$, kemudian kembali dilakukan penghilangan beban. Selanjutnya siklus pembebahan dan penghilangan beban dilanjutkan sampai siklus kelima sampai perpindahan nodal mencapai $\delta_3=300mm$, $\delta_4=400mm$ dan $\delta_5=500mm$.



Gambar.10 Respon perpindahan nodal struktur dome dibawah pembebahan statik berulang (a) pada nodal paling kritis (atas)
(b) pada nodal dengan perpindahan paling maksimum (bawah) [5,7]

Sebagaimana diperlihatkan Gambar.10, pengamatan dilakukan pada 2 buah nodal sebagai titik referensi. Pertama, pada nodal paling kritis dimana peluluan pertama kali terjadi (Gambar.10a), dan kedua pada titik dengan perpindahan vertikal paling maksimum (Gambar.10b). Hasil yang diperoleh memperlihatkan kemampuan sistem sambungan untuk merekoveri perpindahan besar yang terjadi akibat beban salju yang berat. Bahkan ketika perpindahan $\delta_5=500mm$ terjadi, momen pembalik (*restoring moment*) yang bekerja di sambungan masih bisa menurunkan perpindahan pada nodal kritis sampai kurang dari $100mm$. Alasan utama dibalik karakteristik ini adalah masih terdapatnya regangan elastis pada sambungan walaupun sambungan tersebut terdefleksi cukup besar ($\delta_5=500mm$), dan ketika pembebahan dihilangkan,

perpindahan sisa (*residual displacement*) pada nodal berharga kecil.

Ketiga, dari karakteristik sambungan-T dibawah pengaruh beban dinamik seperti gempa memperlihatkan bahwa peluluhan pada sambungan dapat menyerap energi input akibat gempa sehingga energi yang diteruskan ke struktur utama atap dapat diminimalkan. Dampaknya adalah kerusakan pada struktur utama tersebut dapat diminimalkan.

Pada Tabel 2 dan 3 diperlihatkan nilai real dan persentase dari energi regangan pada struktur atap yang diajukan akibat pembebangan gempa yang diberikan dalam arah sumbu-x dan sumbu-z. Sebagai kesimpulan terlihat bahwa untuk input percepatan gempa yang tinggi, misal $A_{max}=5000 \text{ mm/s}^2$, energi regangan yang mampu diserap batang *strut* ketika gempa terjadi sebesar 76.95% sampai 82.63%. Akan tetapi untuk gempa rendah, dengan $A_{max}\leq 3000 \text{ mm/s}^2$, kebanyakan energi regangan yang terjadi diserap oleh batang *arch* sebesar 88%. Hasil ini menjelaskan bahwa pada waktu gempa kuat terjadi, plastisitas akan terjadi pertama kali pada sambungan-T melalui proses peluluhan. Proses peluluhan ini mampu menyerap energi regangan yang terjadi sehingga meminimalkan dampak kerusakan pada bagian struktur lain, terutama bagian batang *arch*. Sebaliknya, pada waktu gempa ringan terjadi, energi regangan kebanyakan diserap oleh batang *arch*. Akan tetapi karena deformasi yang terjadi akibat gempa ini cukup kecil, maka batang *arch* masih berada dalam kondisi aman.

Tabel 2. Energi regangan pada batang akibat gempa dalam arah sumbu-x [6,7]

A_{max} (mm/s ²)	Energi Regangan [kN·m]		Energi Regangan (%)	
	Arch	Strut	Arch	Strut
0	8.01	0.99	88.99	11.01
2500	8.01	0.99	88.99	11.01
3000	8.01	1.56	83.67	16.33
5000	8.38	27.96	23.05	76.95

Tabel 3. Energi regangan pada batang akibat gempa dalam arah sumbu-x [6,7]

A_{max} (mm/s ²)	Energi Regangan [kN·m]		Energi Regangan (%)	
	Arch	Strut	Arch	Strut
0	8.01	0.99	88.99	11.01
2500	8.01	0.99	88.99	11.01
3000	8.02	1.38	85.28	14.72
5000	8.23	39.14	17.37	82.63

Kesimpulan

Ketiga teknik yang diperkenalkan dipertimbangkan dapat memperbaiki prosedur perancangan struktur atap konvensional, terutama pada daerah rawan gempa. Hasil-hasil penelitian menunjukkan:

(1). Melalui Teknik Pencarian Bentuk, dapat diperoleh bentuk akhir struktur dengan tegangan lentur yang bisa dibuat rendah. Sebagai contoh sederhana, suatu struktur bidang dengan 3 variasi bentuk awal; *ellips*, *circular* dan segitiga, memiliki tegangan lentur sebesar 0.265 kN/cm^2 , 0.024 kN/cm^2 dan 0.641 kN/cm^2 dapat direduksi ke bentuk optimum dengan harga tegangan lentur 0.0316 kN/cm^2 , 0.0316 kN/cm^2 dan 0.0071 kN/cm^2 . Keefektifan metode ini terlihat dengan harga kekuatan struktur terhadap buckling untuk struktur optimum (312 kN) yang jauh lebih tinggi dari bentuk-bentuk awal; *ellips* (72 kN), *circular* (242 kN) dan segitiga (41 kN).

(2). Melalui Teknik Penyesuaian Dimensi, diameter dan tebal pipa dapat direduksi ke harga optimum. Sebagai contoh sebuah panel silinder dengan sudut bukaan $\theta_0=2^\circ$, disusun oleh batangan-batangan pipa dengan diameter $d_k=311.1 \text{ mm}$ dan ketebalan $t_k=18.96 \text{ mm}$. Melalui TPD, diameter dan ketebalan pipa dapat diturunkan menjadi $d_k=282.8 \text{ mm}$ dan $t_k=9.003 \text{ mm}$, berat total struktur juga dapat dikurangi dari 700 kN menjadi 390 kN . Hal ini tentu akan sangat menguntungkan secara ekonomis, karena berat struktur menjadi lebih ringan.

(3). Penggunaan sambungan-T pada struktur atap cukup layak untuk digunakan dikarena beberapa alasan sebagai berikut: (i). struktur atap jenis ini dengan rentang area sekitar $60\text{m}\times60\text{m}$ memiliki kekuatan desain sebesar 1.73 kN/m^2 . Jika diasumsikan beban berat sendiri 0.8 kN/m^2 , maka beban maksimum yang bisa ditahan adalah 0.93 kN/m^2 . Beban ini biasanya termasuk ke dalam kategori beban luar medium. Ini berarti struktur tersebut cukup fisibel diterapkan di lapangan. (ii). ketika siklus pembebangan dan penghilangan beban diterapkan terlihat bahwa ketika struktur dibebani secara besar, $\delta=500\text{mm}$, deformasi plastis sisa yang terjadi ketika beban dihilangkan masih kecil dari 100mm . Kondisi ini memperlihatkan kemampuan sistem sambungan dalam merekoveri perpindahan besar yang terjadi (*self-recovery system*). Hal ini disebabkan karena pengaruh adanya momen pembalik pada sambungan, sehingga walaupun beban besar terjadi, kondisi sambungan masih dominan teregang secara elastis. Regangan elastis sisa inilah yang akan merekoveri perpindahan yang besar tadi, sehingga perpindahan sisa pada nodal

acuan menjadi tidak begitu besar, (iii). karakteristik sambungan-T dibawah pengaruh beban dinamik seperti gempa memperlihatkan bahwa peluluhan pada sambungan dapat menyerap energi input akibat gempa besar sampai sekitar 82.63% sehingga energi yang diteruskan ke struktur utama atap dapat diminimalkan.

Infrastructure in the Chaotic Global Economic Competitiveness (ICCFAM), Padang-Indonesia, November, 2012.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI atas dana penelitian yang diberikan melalui Penelitian Fundamental melalui DIPA Universitas Andalas No:023.04.2.415061/2013, dimana makalah ini merupakan keluaran dari salah satu bagian penelitian tersebut.

Referensi

- [1] **Satria, E.**, Kato, S., Nakazawa, S., Niho, Y.; “*Form Finding of RC Shells Considering Multiple Design Loads*”, The 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structure, Nagoya, Japan, May, 2009
- [2] **Satria, E.**, Kato, S., Tanjung, J.;” *Kajie Keefektifan Penerapan Teknik Pencarian Bentuk dalam Perancangan Struktur Lattice Shell*”, Seminar Nasional SNTTM IX, Palembang, October, 2010.
- [3] Niho, Y., Kato, S., **Satria, E.**; “*A Study on a Procedure to Design Light-Weight Latticed Shells with High Strength*”, International Conference of IASS, Shanghai-China, November, 2010.
- [4] Kato, S; Kim, J.M.; Niho, Y (2000); “*Proportioning Method for Member Sections of Single Layer Reticulated Domes Based on the Results of Linear Buckling Analysis*”, International Conference of APCS, Seoul, Korea.
- [5] **Satria, E.**, Kato, S., Nakazawa, S., Kakuda, D., “*Buckling Behavior of Two-Way Single Layer Lattice Dome with Nodal Eccentricity*”, Journal Structural Engineering (AIJ), Vol 54B, March, 2008, pp.679-692.
- [6] **Satria, E.**; Kato, S.; Nakazawa, S.; Kakuda, D.; “*Study on Dynamic Behavior of a New Type of Two-Way Single Layer Lattice Dome with Nodal Eccentricity*”, Steel and Composite Structures, An International Journal, December, 2008, Vol.8 No.6, pp.511-530
- [7] **Satria, E.**; Kato, S.; “*Feasibility of Tubular T-Joints As A Damage Controller For Roof Structures under Loading*”, International Conference of Managing Assets and