

ANALISIS DAN DESAIN ATAP CANGKANG BETON PRATEGANG BENTUK *SPHERICAL DOME*

Ferry Fanjaya

NRP : 0721021

Pembimbing : Winarni Hadipratomo, Ir.

Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil

Univeritas Kristen Maranatha Bandung

ABSTRAK

Cangkang adalah bentuk struktur tiga dimensi yang tipis dan kaku yang memiliki permukaan lengkung. Permukaan cangkang dapat terjadi oleh sembarang bentuk yang menghasilkan bentuk struktur dengan unsur estetika dan nilai arsitektur yang indah.

Tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah menganalisis dan mendesain struktur atap bentuk kubah bola dari beton prategang. Beban-beban yang bekerja adalah beban mati (DL), beban hidup (LL), dan beban angin (WL). Gaya-gaya dalam diperoleh menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan Program SAP 2000 *Nonlinier*. Desain dilakukan secara manual, berdasarkan Peraturan SNI 2002 dan Peraturan Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung Tahun 1987 yang berlaku untuk beban anginnya.

Hasil desain dan analisis yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini mendapatkan gaya aksial radial dari perhitungan manual sebesar -187,46 kN, dan dari program SAP 2000 *Nonlinier* sebesar -184,08 kN dari struktur tanpa tendon dan dari struktur dengan tendon diperoleh hasil sebesar -349,612 kN. Hasil gaya aksial tangensial dari perhitungan manual sebesar -98,686 kN, dan dari program SAP 2000 *Nonlinier* sebesar -106,207 kN dari struktur tanpa tendon dan dari struktur dengan tendon diperoleh sebesar -1702,508 kN. Jumlah tendon tangensial yang digunakan per elemen sebanyak 6 buah 7-wire low relax strand $\frac{1}{2}$ " pada setiap ketinggian 0-8,17 m, 8,17-13,59 m, 13,59-15,11 m. Tulangan radial menggunakan tulangan berulir 5 D22 per elemen pada setiap ketinggian 0-8,17 m, 8,17-13,59 m, 13,59-15,11 m. Pada bagian tarik balok tepi menggunakan tulangan 4 D19 dan pada bagian tekan balok tepi menggunakan tulangan 4 D19.

Kata kunci: Atap, *Spherical*, Prategang, Tendon, Tulangan.

ANALYSIS AND DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE SPHERICAL DOME ROOF

Ferry Fanjaya

NRP : 0721021

Advisor : Winarni Hadipratomo, Ir.

Faculty of Engineering Department of Civil Engineering

Maranatha Christian University Bandung

ABSTRACT

Shell elements can form a three dimensional thin and rigid structure with curved surfaces. The surfaces of the shell can be created by any form, producing any beautiful structural form which has aesthetical as well as architectural value.

The purpose of writing this thesis is to analyze and design prestressed concrete spherical dome roof. The loading applied are dead load (DL), live load (LL), and wind load (WL). The internal forces were obtained by finite element method with the aid of SAP 2000 Nonlinier Software. While the design was executed manually, based on the Indonesian Buildings Regulation of 2002 and Buildings Regulation of 1987 for the wind load that still governed.

As the results, we obtained radial axial force of -187,46 kN, -184,08 kN, and -349,612 kN, while the tangential axial force are -98,686 kN, -106,207 kN and -1702,508 kN, manually and by SAP 2000 respectively. The number of tangential seven-wire low-relax strand of $\phi \frac{1}{2}$ " are 6 strands per element, and the radial reinforcement are provided by 5 D22 mild steel reinforcement per element, at each height of 0 - 8,17 m, 8,17 - 13,59 m, 13,59 - 15,11 m respectively. Reinforced concrete was applied as the edge beam at the bottom of the dome, reinforced by 4 D19 at the tensile side and 4 D19 at the non-tensile side.

Keywords: Roof, Spherical, Prestressed, Tendons, Reinforcement.

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Surat Keterangan Tugas Akhir.....	ii
Surat Keterangan Selesai Tugas Akhir	iii
Lembar Pengesahan	iv
Pernyataan Orisinalitas Laporan Tugas Akhir	v
Pernyataan Publikasi Laporan Penelitian.....	vi
Abstrak.....	vii
<i>Abstract</i>	viii
Kata Pengantar	ix
Daftar Isi.....	xi
Daftar Gambar.....	xiii
Daftar Tabel	xvi
Daftar Notasi	xvii
Daftar Lampiran	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penulisan.....	2
1.3 Ruang Lingkup Pembahasan.....	2
1.4 Sistematika Pembahasan	4
BAB II TINJAUAN LITERATUR	5
2.1 Struktur Cangkang Tipis <i>Spherical Dome</i> Beton Prategang.....	5
2.1.1 Cangkang Putar.....	6
2.1.2 Analisis Keseimbangan Gaya Membran <i>Spherical Dome</i>	8
2.2 Beban Yang Bekerja Pada Struktur Cangkang	11
2.3 Desain Struktur Cangkang	12
2.3.1 Desain Komponen Struktur Beton Prategang	12
2.3.2 Ketebalan Struktur Cangkang.....	15
2.3.3 Desain Balok Tepi	15
2.3.4 Desain Tendon Struktur Cangkang.....	16
2.3.5 Desain Tulangan Struktur Cangkang.....	26
2.3.6 Panjang Penyaluran Tulangan	28
2.4 Metode Elemen Hingga Pada <i>SAP 2000 Nonlinier</i>	30
2.4.1 Elemen Struktur Cangkang.....	31
BAB III STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN	33
3.1 Pemodelan Struktur <i>Spherical Dome</i>	33
3.2 Data Pembebanan.....	35
3.3 Pemodelan dan <i>Input</i> Analisis Pada Program <i>SAP 2000</i>	37
3.3.1 Pemodelan Struktur <i>Spherical Dome</i>	37
3.3.2 <i>Input</i> Beban Yang Bekerja Pada Struktur Cangkang	44
3.4 Hasil <i>Output</i> <i>SAP 2000 Nonlinier</i>	51
3.5 Analisis Gaya-Gaya Dalam.....	53
3.6 Desain Struktur <i>Spherical Dome</i> Dengan Beton Prategang.....	69
3.6.1 Ketebalan Struktur Cangkang <i>Spherical Dome</i>	69
3.6.2 Desain Tulangan Radial	70

3.6.3 Desain Tulangan Tangensial	74
3.6.4 Desain Tulangan Penutup Atap Puncak Kubah	83
3.6.5 Gambar Daerah Penjangkaran.....	83
3.6.6 Desain Tulangan Balok Tepi.....	83
3.6.7 Panjang Penyaluran Tulangan Balok Tepi.....	88
3.7 Batas Ijin Lendutan	90
3.8 Pembahasan.....	91
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	93
4.1 Kesimpulan	93
4.2 Saran.....	94
Daftar Pustaka	95
Lampiran	96

DAFTAR GAMBAR

Gamabr 2.1 Gaya Meridian dan Paralel.....	6
Gambar 2.2 Gaya Membran pada Elemen Permukaan <i>Infini</i>	7
Gambar 2.3 Komponen dari Gaya $N_{\theta}r_1d\phi$ pada Arah Y yang Dibutuhkan Untuk Menyederhanakan Persamaan Dasar 2.1 a	7
Gambar 2.4 Potongan Kubah dengan Beban Gravitasi Total W	8
Gambar 2.5 Distribusi Gaya Membran Gravitasi Pada <i>Spherical Dome</i> . (a) Segmen Kubah Datar Dari Tinggi h' . (b) Tegangan Membran Akibat Berat Sendiri w_D ($N_{\theta} = 0$ Untuk $\phi = 45^0$)	9
Gambar 2.6 Gambar Koefisien Angin	12
Gambar 2.7 Jenis Tendon (a) <i>MacAlloy Bar</i> (b) <i>Diwidag Bar</i> (c) <i>7-wire Strand</i> (d) <i>Compacted Strand</i> (e) <i>Normal Strand</i> (f) <i>Wire</i>	17
Gambar 2.8 <i>Strand</i> (a) 3 kawat (b) 7 kawat (<i>7-wire strand</i>) (c) 19 kawat.....	18
Gambar 2.9 Perpendekan Elastis pada Elemen Pratarik	19
Gambar 2.10 Analisis Penampang Balok Prategang dengan Momen Positif ...	25
Gambar 2.11 Sumbu Lokal dan Notasi Gaya Dalam Pada Elemen Cangkang (a)Tegangan dan Gaya Membran. (b)Momen Puntir dan Momen Lentur Pelat.....	31
Gambar 2.12 Gambar Arah Sumbu Lokal Elemen Cangkang.....	32
Gambar 2.13 Gambar Arah Sumbu Lokal Balok Tepi	32
Gambar 3.1 Bentuk 3 Dimensi Dari <i>Spherical Dome</i>	34
Gambar 3.2 Potongan Horisontal Struktur <i>Spherical Dome</i>	34
Gambar 3.3 Potongan Vertikal Struktur <i>Spherical Dome</i>	34
Gambar 3.4 Detail 1 dari Potonga Vertikal Struktur <i>Spherical Dome</i>	35
Gambar 3.5 Mendefinisikan Satuan dan Model Yang Digunakan	37
Gambar 3.6 Mendefinisikan <i>Shell Type</i> dan Dimensi Cangkang	38
Gambar 3.7 <i>Spherical Dome</i>	38
Gambar 3.8 Mendifinisikan Material.....	39
Gambar 3.9 <i>Input Material Property Data</i>	40
Gambar 3.10 <i>Input Data Pelat</i>	41
Gambar 3.11 Mendefinisikan Bentuk Balok Tepi	42
Gambar 3.12 <i>Input Data Balok Tepi</i>	43
Gambar 3.13 <i>Reinforcement</i> Balok Tepi.....	43
Gambar 3.14 Struktur <i>Spherical Dome</i>	44
Gambar 3.15 Perletakan	44
Gambar 3.16 Mendefinisikan <i>Static Load Cases</i>	45
Gambar 3.17 Mendefinisikan Beban Hidup.....	45
Gambar 3.18 Mendefinisikan Beban Angin di Pihak Angin Pada $\frac{1}{4}$ Busur Pertama	46
Gambar 3.19 Mendefinisikan Beban Angin di Pihak	

Angin Pada $\frac{1}{4}$ Busur Kedua	46
Gambar 3.20 Mendefinisikan Beban Angin dibelakang	
Angin Pada $\frac{1}{4}$ Busur Kedua	47
Gambar 3.21 Mendefinisikan Beban Angin dibelakang	
Angin Pada $\frac{1}{4}$ Busur Kedua	47
Gambar 3.22 Mendefinisikan Kombinasi Beban 1	48
Gambar 3.23 Mendefinisikan Kombinasi Beban 2	48
Gambar 3.24 Mendefinisikan Kombinasi Beban 3	49
Gambar 3.25 Mendefinisikan Kombinasi Beban 4	49
Gambar 3.26 Mendefinisikan Kombinasi Beban 5	50
Gambar 3.27 Mendefinisikan Acuan yang Digunakan	51
Gambar 3.28 Menentukan Tabel Hasil yang Akan Dikeluarkan	52
Gambar 3.29 Tabel <i>Element Forces – Area Shells</i>	52
Gambar 3.30 Sumbu Global XY Struktur Kubah	53
Gambar 3.31 Sumbu Global XZ Struktur Kubah.....	54
Gambar 3.32 Sumbu Global YZ Struktur Kubah.....	54
Gambar 3.33 Sumbu Lokal dan Notasi Gaya Dalam	
pada Elemen Cangkang (a)Tegangan dan	
Gaya Membran. (b) Momen Puntir dan	
Momen Lentur Pelat.....	55
Gambar 3.34 Gambar Arah Sumbu Lokal Balok Tepi	56
Gambar 3.35 Potongan Horisonatal M11 (N.mm/mm) Akibat Kombinasi 2	57
Gambar 3.36 Potongan Vertikal M22 (N.mm/mm) Akibat Kombinasi 2.....	58
Gambar 3.37 Potongan Horisontal F11 (N/mm) Akibat Kombinasi 2	59
Gambar 3.38 Potongan Verikal F22 Akibat Kombinasi 2	60
Gambar 3.39 Potongan Vertikal Deformasi Akibat Beban Mati	60
Gambar 3.40 Grafik Deformasi Akibat Beban Mati.....	61
Gambar 3.41 Potongan Vertikal Deformasi Akibat Beban Kombinasi 1	62
Gambar 3.42 Grafik Deformasi Akibat Beban Kombinasi 1	62
Gambar 3.43 Potongan Vertikal Deformasi Akibat Beban Kombinasi 2	63
Gambar 3.44 Grafik Deformasi Akibat Beban Kombinasi 2	63
Gambar 3.45 Potongan Vertikal Deformasi Akibat Beban Kombinasi 3	64
Gambar 3.46 Grafik Deformasi Akibat Beban Kombinasi 3	64
Gambar 3.47 Potongan Vertikal Deformasi Akibat Beban Kombinasi 4	65
Gambar 3.48 Grafik Deformasi Akibat Beban Kombinasi 4.....	66
Gambar 3.49 Potongan Vertikal Deformasi Akibat Beban Kombinasi 5	66
Gambar 3.50 Grafik Deformasi Akibat Beban Kombinasi 5	67
Gambar 3.51 Potongan Vertikal Deformasi Akibat Beban Mati dan	
Beban-Beban Kombinasi	68
Gambar 3.52 Potongan Melintang Dari Struktur Cangkang.....	70
Gambar 3.53 Luas Tulangan Pada Bentang 7614,051 mm Yang Diperlukan ...	84
Gambar 3.54 Luas Tulangan Tumpuan Kiri	84
Gambar 3.55 Luas Tulangan Tengah Bentang.....	85
Gambar 3.56 Luas Tulangan tumpuan Kanan.....	85
Gambar 3.57 Shear Reinforcing Area Per Unit Lenght	86
Gambar 3.58 Shear Reinforcing Area Per Unit Lenght	87
Gambar 3.59 Shear Reinforcing Area Per Unit Lenght	88
Gambar 3.60 Penulangan Balok Tepi	88

Gambar 3.61 Potongan A-A.....	89
Gambar 3.62 Potongan B-B.....	89
Gambar 3.63 Detail Sambungan Tulangan Balok Tepi	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 KSH Menurut PCI Untuk <i>Post-tensioned</i>	22
Tabel 2.2 Nilai K dan μ Menurut PCI.....	23
Tabel 2.3 Perhitungan Tegangan Akhir pada Balok Prategang dengan Momen Negatif.....	26
Tabel 3.1 Tabel Jumlah Tulangan Radial Tepi Cangkang Bawah.....	71
Tabel 3.2 Tabel Jumlah Strand Tangensial Tepi Cangkang Bawah	74
Tabel 3.3 Tabel Perbandingan Gaya Aksial Radial Pada Perhitungan SAP 2000 Dengan Perhitungan Manual	91
Tabel 3.4 Tabel Perbandingan Gaya Aksial Tangensial Pada Perhitungan SAP 2000 Dengan Perhitungan Manual	91

DAFTAR NOTASI

a	radius bola, m.
A_c	luas penampang beton, mm^2 .
A_{ps}	luas tendon yang digunakan, mm^2 .
$A_{ps,perlu}$	luas tendon yang diperlukan, mm^2 .
$A_{s,min}$	luas tulangan minimum, mm^2 .
$A_{s,perlu}$	luas tulangan yang diperlukan, mm^2 .
$A_{s,pakai}$	luas tulangan yang dipakai, mm^2 .
A_{tr}	total luas penampang tulangan transversal dalam jarak s , mm^2 .
A_v	luas tulangan geser, MPa.
b	dimensi dalam arah yang ditentukan, mm.
c	dimensi jarak atau cover, mm.
d	bentang cangkang, m.
d_p	jarak dari serat tarik terluar ke titik pusat tulangan tekan longitudinal, mm.
d_b	diameter nominal tulangan, mm.
e	eksentrisitas, mm.
E_c	modulus elastisitas beton, MPa.
E_{ci}	modulus elastisitas awal beton, MPa.
f_c	tegangan tekan pada serat terluar, MPa.
f_{ci}	tegangan tekan awal beton, MPa.
f_c'	mutu beton pada kondisi layan/beban kerja, MPa.
f_{ci}'	mutu beton pada kondisi awal, MPa.
f_{cs}	tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, MPa.
f_{cs}	tegangan beton pada lokasi cgs, MPa.
f_{csd}	tegangan beton pada cgs akibat semua beban mati yang bekerja setelah gaya prategang selesai dikerjakan, MPa.
f_{pi}	tegangan ijin tendon pascatarik, pada jangkar dan penyambung beton, segera setelah penjangkaran tendon.
f_{pi}	tegangan awal, MPa.
f_{pi}^0	tegangan awal baja, MPa.
f_{pj}	tegangan waktu <i>jacking</i> , MPa.
f_{pu}	mutu baja prategang, MPa.
f_{ts}	tegangan serat tarik terluar didaerah tarik yang pada awalnya mengalami tekan, MPa.
f_{ti}	tegangan tarik awal beton, MPa.
f_y	kuat leleh tulangan, MPa.
f_{yt}	kuat leleh tulangan transversal, MPa.
f_{yv}	kuat geser tulangan, MPa.
F11	gaya aksial membran searah dengan axis 1, N.
F12	gaya geser membran, N.
F22	gaya aksial membran searah dengan axis 2, N.
h	dimensi dalam arah yang ditentukan, mm.
I_c	momen inersia neton, mm^4 .
jd	lengan momen, mm.
K_{tr}	indeks tulangan transversal/melintang, mm.

l_d	panjang penyaluran, mm.
l_{db}	panjang penyaluran, mm.
LL	beban hidup, kg/m ² .
m	<i>Latitude division.</i>
M_D	momen akibat beban sendiri, N.mm.
M_n	momen nominal, N.mm.
M_{SD}	momen akibat beban mati tambahan, N.mm.
M_{torsi}	momen torsi, N.mm.
M_u	momen lentur penampang, N.mm.
M_{us}	hasil dari penjumlahan dari momen lentur penampang dan gaya aksial, N.mm.
M11	momen lentur pelat tegak lurus axis 1, N.mm.
M12	momen torsi plat, N.mm.
M22	momen lentur pelat tegak lurus axis 2, N.mm.
M_ϕ	momen radial, N.mm.
M_θ	momen tangensial, N.mm.
n	jumlah batang tulangan yang disalurkan.
n	modular rasio awal.
n	<i>Longitude division.</i>
N_u	gaya aksial, N.
N_θ	gaya tangensial, kN.
N_ϕ	gaya meridian, kN.
P_e	gaya prategang, MPa.
r	radius bola, m.
RH	kelembapan relatif.
s	jarak pusat ke pusat, mm.
SDL	beban mati tambahan, kg/m.
s_{max}	spasi tulangan geser maksimum, mm.
t	ketebalan struktur cangkang, mm.
t_{maks}	ketebalan maksimum struktur cangkang, mm.
V/S	rasio volume/permukaan.
w_{bs}	berat sendiri, kN/m.
W_D	intensitas berat sendiri cangkang per luas satuan (beban mati).
W_L	intensitas proyeksi beban hidup.
α	faktor lokasi tulangan.
β	faktor pelapis tulangan.
β	sudut pangkal.
γ	faktor ukuran tulangan.
λ	faktor agregat beton ringan.
ρ	rasio tulangan tarik.
ρ_b	rasio tulangan yang memberikan kondisi regangan yang seimbang.
ρ_{max}	rasio tulangan terbesar.
ρ_{min}	rasio tulangan terkecil.
ρ_p	rasio luas tendon dengan luas penampang beton.
ϕ	faktor reduksi kekuatan.
ϕ	sudut.
Δf_{pA}	kehilangan gaya prategang akibat penjangkaran, MPa.
Δf_{pCR}	kehilangan gaya prategang akibat rangkai, MPa.

Δf_{pES}	kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis, MPa.
Δf_{pF}	kehilangan gaya prategang akibat geser, MPa.
Δf_{pR}	kehilangan gaya prategang akibat relaksasi, MPa.
Δf_{pSH}	kehilangan gaya prategang akibat susut, MPa.
Δf_{pT}	kehilangan gaya prategang total, MPa.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran L1 Gambar <i>Spherical Dome</i>	97
Lampiran L2 <i>Table Element Forces Area-Shells</i>	98
Lampiran L3 Gambar Penjangkaran Tendon Tangensial	108
Lampiran L4 Gambar Panjang Penyaluran Tulangan Radial	111
Lampiran L5 Tabel Lendutan Ijin Maksimum Dari Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)	113
Lampiran L6 Manual Dari VSL	114
Lampiran L7 Langkah-Langkah Menambahkan Gaya Prategang Tendon	120
Lampiran L8 Gambar Perbandingan Struktur Tanpa Tendon dan Struktur Dengan Tendon	126