

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Peraturan yang Digunakan

Peraturan-peraturan yang digunakan dalam analisis dan desain struktur atap cangkang ini yaitu :

- Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung tahun 1987,
- Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung tahun 1987,
- Tata cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung tahun 1991.

3.2 Kriteria Desain

Pada Tugas Akhir ini atap cangkang Paraboloid Hiperbolik didesain sebagai struktur yang memiliki daktilitas 1, artinya struktur sepenuhnya berperilaku elastis.

3.2.1 Dimensi komponen struktur

A. Plat cangkang

Sebagai akibat cara elemen struktur ini memikul beban dalam bidang (terutama dengan cara tarik dan tekan), struktur cangkang dapat lebih tipis dan

mempunyai bentang relatif besar. Tebal minimum plat cangkang berkisar sekitar 3 inci atau 7,5 cm (Mark Fintel,1987).

B. Balok tepi

Untuk struktur yang memiliki tingkat daktilitas 1, dimensi balok harus memenuhi ketentuan sebagai berikut (SK SNI T-15-1991-03) :

- Rasio dari lebar terhadap tinggi tidak boleh kurang dari 0,25.
- Lebar tidak boleh kurang dari 200 mm.
- Lebar tidak boleh lebih dari lebar komponen penumpu ditambah jarak yang tidak melebihi $\frac{3}{4}$ dari tinggi balok pada tiap sisi dari komponen penumpu.

C. Kolom

Dimensi kolom untuk struktur yang mempunyai tingkat daktilitas 1 adalah sebagai berikut (SK SNI T-15-1991-03) :

- Dimensi penampang terkecil minimum 250 mm.
- Rasio dimensi penampang terkecil dengan dimensi yang tegak lurus padanya tidak kurang dari 0,4.
- Rasio tinggi antar kolom terhadap dimensi penampang kolom terkecil tidak boleh lebih dari 25, untuk kolom yang mengalami momen yang dapat berbalik arah, rasionya tidak boleh lebih dari 16, untuk kolom kantilever rasionya tidak boleh lebih dari 10.

3.2.2 Desain tulangan plat cangkang

Karena plat cangkang dianggap elastis, homogen dan isotropis, maka plat cangkang dihitung sebagai struktur yang tidak retak.

Desain penulangan plat cangkang dapat dibagi dua, yaitu penulangan gaya aksial dan penulangan momen lentur. Keduanya dibagi lagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil.

A. Penulangan gaya aksial

Penulangan gaya aksial dibagi menjadi tiga, yaitu :

- penulangan transversal untuk menahan gaya aksial N_x ,
- penulangan longitudinal untuk menahan gaya aksial N_y ,
- penulangan tarik diagonal untuk menahan gaya N'_{xy} .

$N'_{xy} = N_{xy} - (M_{xy} / R)$, dengan R adalah jari-jari kelengkungan cangkang (mm).

Umumnya M_{xy} / R diabaikan sehingga $N'_{xy} = N_{xy}$.

Yang dimaksud arah transversal adalah arah yang sejajar dengan parabola yang terbuka ke bawah. Sedangkan yang dimaksud arah longitudinal adalah arah yang sejajar dengan parabola yang terbuka ke atas.

Tiga gaya N_x , N_y dan N_{xy} yang bekerja pada struktur cangkang dapat dianggap seperti tegangan yang ortogonal pada tegangan bidang, sehingga dapat diselesaikan dalam tegangan utama (tegangan tarik dan tegangan tekan). Pada gambar 3.1 diperlihatkan tegangan utama p dan q .

Tegangan geser p dan q yang terjadi :

$$p, q = \frac{N_x + N_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{N_x - N_y}{2}\right)^2 + N_{xy}^2} \quad (3.1)$$

dan arah tegangan utama tersebut :

$$\tan 2\theta = \frac{2N_{xy}}{(N_x - N_y)} \quad (3.2)$$

dimana : p, q = gaya geser yang terjadi pada sudut θ ,

N_x = gaya aksial arah x ,

N_y = gaya aksial arah y ,

N_{xy} = gaya geser yang terjadi,

θ = sudut terhadap sumbu longitudinal.

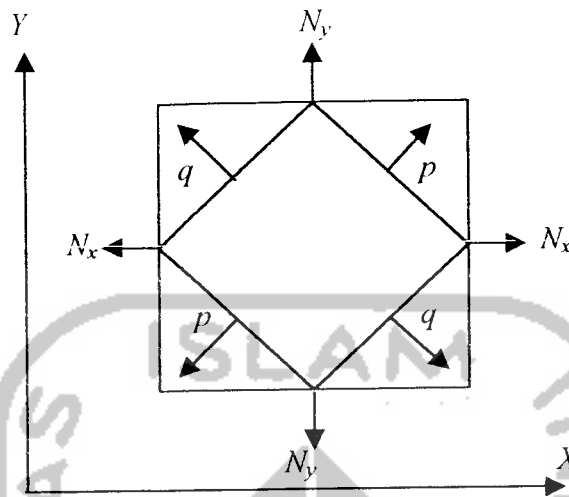
Secara teori, seluruh bagian dari struktur cangkang harus dikontrol regangan dan tegangan ijin yang terjadi. Pada prakteknya hanya dikontrol pada dua kondisi, yaitu pada $x = 0$ dan pada $x = \pm L/2$. Tiap kondisi mengakibatkan perubahan persamaan (3.1) dan (3.2).

Untuk $x = \pm L/2$, $N_y = N_x = 0$, dan $N_{xy} \sin kx = N_{xy}$, persamaan (3.1) dan persamaan (3.2) menjadi :

$$p, q = \pm N_{xy} \quad (3.3)$$

$$\tan 2\theta = 2N_{xy}/0 \rightarrow \theta = 45^\circ \quad (3.4)$$

Jadi tegangan tarik diagonal membentuk sudut 45° terhadap sumbu longitudinal dan besarnya sama dengan N_{xy} .



Gambar 3.1 Tegangan utama pada struktur cangkang

Untuk $x = 0, N_{xy} = 0$ didapatkan :

$$p = N_x \quad (3.5)$$

$$q = N_y \quad (3.6)$$

$$\tan 2\theta = 0 \rightarrow \theta = 0^\circ \text{ atau } 90^\circ \quad (3.7)$$

dengan kata lain N_x dan N_y adalah tegangan utama.

Dari persamaan (3.4) terlihat bahwa tulangan geser diperlukan untuk menahan tegangan tarik diagonal yang mempunyai $\theta = 45^\circ$. Desain tulangan berdasar pada N_{xy} maksimum. Luas tulangan yang diperlukan adalah :

$$A_s = N_{xy, maks} / \phi f_y \quad (3.8)$$

dimana : A_s = luas tulangan per meter panjang plat (mm^2)

f_y = tegangan luluh baja (MPa)

ϕ = faktor reduksi kekuatan

Desain tulangan longitudinal berdasar pada harga N_y maksimum. Luas tulangan yang diperlukan adalah :

$$A_s = N_y \text{maks} / \phi f_y \quad (3.9)$$

Desain tulangan transversal berdasar pada harga N_x maksimum. Luas tulangan yang diperlukan adalah :

$$A_s = N_x \text{maks} / \phi f_y \quad (3.10)$$

B. Penulangan momen lentur

Penulangan momen lentur terdiri dari dua arah, yaitu arah longitudinal dan transversal. Tulangan ini dapat dikombinasikan dengan tulangan tarik di atas.

Analisis tulangan lentur dapat dilihat pada gambar 3.2. Pada gambar tersebut dipakai notasi-notasi sebagai berikut :

f_c' = tegangan ijin beton (MPa)

f_y = tegangan luluh baja (MPa)

E_s = modulus elastisitas baja (MPa)

ϵ_c' = regangan beton maksimum 0.003

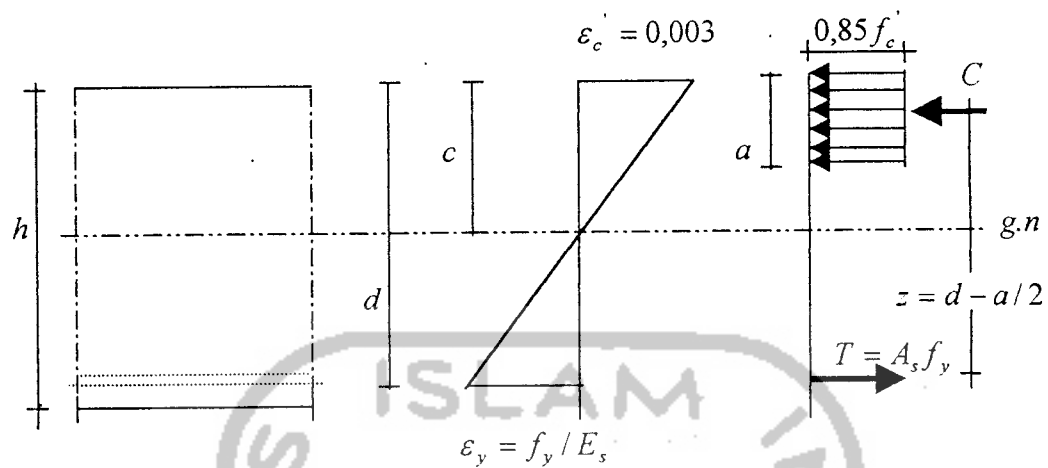
c = jarak garis netral terhadap sisi tekan terluar (mm)

d = tinggi efektif plat (mm)

b = lebar plat ditinjau per meter (mm)

z = lengan momen (mm)

A_s = luas tulangan (mm^2)



Gambar 3.2 Analisis tulangan lentur

Dari gambar 3.2 terlihat gaya tekan oleh beton :

$$C = 0,85 f_c' ab \quad (3.11)$$

Gaya tarik yang dihasilkan oleh baja tulangan :

$$T = A_s f_y \quad (3.12)$$

Pada kondisi seimbang dimana akan terjadi regangan luluh pada baja tarik dan regangan beton tekan maksimum 0,003 :

$$C = T \quad (3.13)$$

$$0,85 f_c' ab = A_s f_y \quad (3.14)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c' b} \quad (3.15)$$

Besar momen yang dihasilkan oleh gaya tekan beton terhadap titik berat tulangan baja atau sebaliknya :

$$M_u = \phi 0,85 f_c' ab z \quad (3.16)$$

atau

$$M_u = \phi A_s f_y z \quad (3.17)$$

dengan $z = d - a/2$, sehingga luas tulangan yang diperlukan adalah :

$$A_s = \frac{M_u}{\phi f_y z} \quad (3.18)$$

Rasio tulangan (ρ) minimum untuk plat tergantung pada kebutuhan tulangan untuk susut dan suhu.

Rasio tulangan susut dan suhu terhadap luas bruto minimum (SK SNI T-15-1991-03) :

plat yang menggunakan tulangan mutu 300	0,0020
plat yang menggunakan tulangan mutu 400	0,0018
plat yang menggunakan tulangan dengan tegangan leleh > 400 MPa yang diukur dari tegangan leleh sebesar 0,35 % tetapi tidak boleh kurang dari 0,0014	$0,0018 * 400 / f_y$

3.2.3 Desain tulangan balok tepi

Pada balok tepi bekerja gaya-gaya yaitu momen lentur, gaya geser dan momen puntir.

A. Penulangan momen lentur.

Kuat lentur rencana M_u dipilih yang lebih menentukan :

- $M_u = 1,2M_D + 1,6M_L$

- $M_u = 1,05(M_D + M_L + \frac{4}{k}M_E)$

Analisis tulangan lentur diperlihatkan dalam gambar 3.3. Agar keseimbangan gaya horisontal terpenuhi, gaya tekan C pada beton dan gaya tarik T pada tulangan harus saling mengimbangi :

$$C = T \quad (3.19)$$

$$0,85 f'_c ab = A_s f_y \quad (3.20)$$

Luas tulangan yang diperlukan untuk menahan gaya lentur adalah :

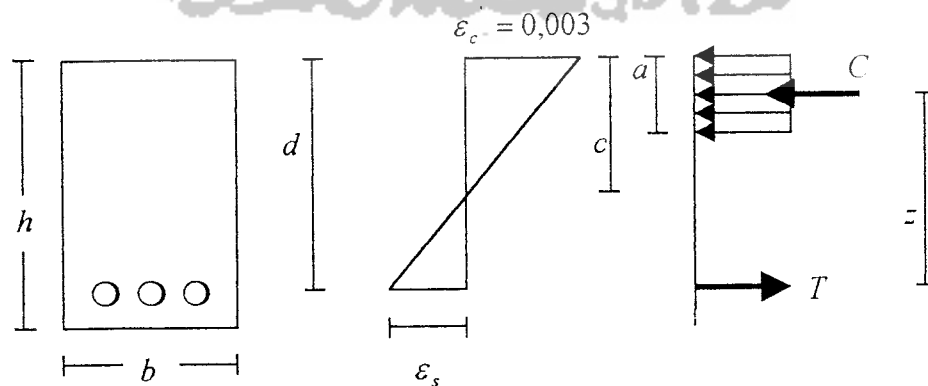
$$A_s = \frac{M_u}{\phi_y z} \quad (3.21)$$

dimana : A_s = luas tulangan lentur (mm^2)

M_u = momen rencana (N mm)

f_y = kuat leleh tulangan (MPa)

z = lengan momen (mm)



Gambar 3.3 Analisis penampang untuk tulangan tunggal

Tulangan lentur harus memenuhi rasio tulangan yang diijinkan. Rasio tulangan (ρ) merupakan rasio antara luas tulangan tarik dan luas penampang elemen, yaitu :

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (3.22)$$

dimana : ρ = rasio tulangan

b = lebar balok (mm)

d = tinggi efektif balok (mm)

Pada kegagalan seimbang, rasio tulangan dinamakan ρ_b . Rasio tulangan seimbang ini diperoleh dengan menganggap bahwa regangan dalam baja sama dengan regangan leleh (ε_y) dan regangan dalam beton mencapai regangan hancur.

Rasio tulangan seimbang ρ_b adalah :

$$\rho_b = \frac{(0,85 f_c' \beta_1)}{f_y} \frac{600}{(600 + f_y)} \quad (3.23)$$

dimana : f_c' = kuat tekan beton yang disyaratkan (MPa)

f_y = tegangan luluh baja (MPa)

β_1 = koefisien yang tergantung dari harga f_c'

Harga β_1 tergantung dari harga f_c' dengan ketentuan sebagai berikut :

$$f_c' \leq 30 \text{ MPa} \quad \beta_1 = 0,85$$

$$f_c' > 30 \text{ MPa} \quad \beta_1 = 0,85 - 0,008(f_c' - 30)$$

Harga β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65

Kegagalan seimbang terjadi bila $\rho = \rho_b$. Untuk memastikan kegagalan tarik akan terjadi, maka tulangan yang diijinkan harus dibatasi :

$$\rho_{maks} \leq 0,75 \rho_b \quad (3.24)$$

Kapasitas momen nominal dari elemen (M_n) adalah :

$$M_n = A_s f_y (d - a/2) \quad (3.25)$$

dimana : M_n = momen nominal penampang (N mm)

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c b}$$

Kapasitas momen nominal dari elemen yang direduksi dengan faktor ϕ harus lebih besar atau sama dengan kapasitas momen beban terfaktor :

$$M_n \geq M_u / \phi \quad (3.26)$$

dimana : M_u = momen rencana (N mm)

ρ minimum adalah :

$$\rho_{min} = 1,4 / f_y \quad (3.27)$$

dimana : f_y = kuat leleh tulangan (MPa)

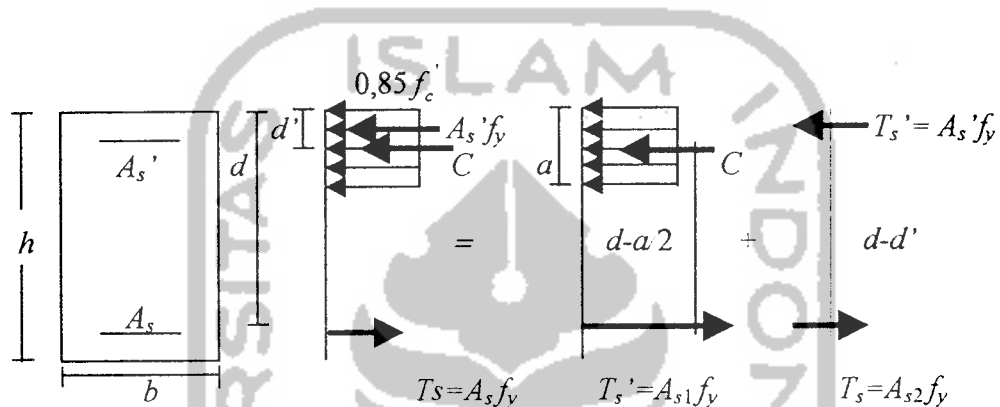
Bila ρ dari tulangan yang diperlukan lebih besar dari ρ_{maks} , maka dipakai tulangan rangkap. Analisis tulangan rangkap diperlihatkan pada gambar 3.4.

Dari luas tulangan tunggal yang didapatkan dengan memakai harga ρ_{maks} , dapat dihitung M_{n1} :

$$M_{n1} = A_{s1} f_y (d - a/2) \quad (3.27a)$$

Untuk menahan M_n diperlukan tulangan tekan A_s' dan tambahan tulangan tarik A_{s2} . Momen kopel dari A_s' dan A_{s2} tersebut menahan momen sisa :

$$M_{n2} = M_n - M_{n1} \quad (3.27b)$$



Gambar 3.4 Analisis penampang untuk tulangan rangkap

Bila baja tekan telah leleh, luas tulangan tekan = luas tambahan tulangan tarik :

$$A_{s2} = A_s' = \frac{M_{n2}}{f_y(d-d')} \quad (3.27c)$$

dimana : d' = jarak antara serat tekan terluar dengan titik berat tulangan tekan

(mm)

Bila baja tekan belum leleh, luas tulangan tekan adalah :

$$A_s' = \frac{M_{n2}}{f_s'(d-d')} \quad (3.27d)$$

dimana : f_s' = tegangan ijin tekan baja (MPa)

Jadi, luas tulangan tarik dalam kondisi tulangan rangkap :

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (3.27e)$$

B. Penulangan geser

Kuat geser rencana (V_u) dipilih yang lebih menentukan dari harga-harga V_u berikut ini :

- $V_u = 1,2V_D + 1,6V_L$
- $V_u = 0,7[(M_{kap} + M'_{kap})/l_n] + 1,05(V_D + V_L)$ akan tetapi tidak perlu lebih besar dari :
- $V_u = 1,05(V_D + V_L + \frac{4}{k}V_E)$

dimana : M_{kap} = momen kapasitas (momen nominal aktual) di sendi plastis pada satu ujung atau bidang muka kolom

M'_{kap} = momen kapasitas pada ujung lainnya

l_n = bentang bersih komponen

$M_{kap} = \phi_0 M_n$

ϕ_0 = faktor penambahan kekuatan (overstrength factor). Faktor untuk memperhitungkan pengaruh penambahan kekuatan maksimal tulangan terhadap kuat luluh yang ditetapkan, ditentukan 1,25 untuk baja dengan $f_y < 400$ MPa, dan 1,40 untuk $f_y \geq 400$ MPa.

Kekuatan geser direncanakan, sehingga :

$$V_n \geq V_u / \phi \quad (3.28)$$

dimana : $\phi = 0,60$ untuk geser

Gaya geser pada balok ditahan oleh kuat geser nominal :

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.29)$$

dimana : V_c = kuat geser nominal beton

V_s = kuat geser nominal tulangan geser

Bila balok hanya menerima gaya geser dan momen lentur, maka harga V_c :

$$V_c = 1/6 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (3.30)$$

Jarak tulangan maksimal pada tulangan geser adalah nilai terkecil dari harga-harga berikut :

- $d/2$
- 600 mm

Bila $V_c > 1/3 \sqrt{f'_c} b_w d$, jarak maksimal tulangan geser diatas dapat diambil setengahnya.

Untuk merencanakan tulangan geser, yang perlu diperhatikan adalah besar nilai antara V_u dan ϕV_c , yaitu :

- bila $V_u < 1/2 \phi V_c$ tidak diperlukan tulangan geser,
- bila $1/2 \phi V_c < V_u \leq \phi V_c$ diperlukan tulangan geser minimum,
- bila $\phi V_c < V_u \leq \phi(V_c + 1/3 \sqrt{f'_c} b_w d)$ diperlukan tulangan geser untuk menahan gaya geser kelebihan,

- bila $\phi(V_c + 1/3\sqrt{f'_c} b_w d) < V_u \leq \phi(V_c + 2/3\sqrt{f'_c} b_w d)$ diperlukan tulangan geser untuk menahan gaya geser kelebihan,
- bila $V_u > \phi(V_c + 2/3\sqrt{f'_c} b_w d)$ maka penampang harus diperbesar.

Pada tempat di mana diperlukan tulangan geser minimum, jumlah luas tulangan yang diperlukan adalah :

$$A_v = 1/3(b_w s / f_y) \quad (3.31)$$

harga V_s adalah :

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (3.32)$$

Jadi diameter tulangan dan jarak tulangan ditentukan dahulu untuk mendapatkan V_s . Kemudian dikontrol terhadap persamaan (3.28) dan (3.29).

C. Penulangan momen torsi

Tulangan untuk menahan momen torsi ada dua macam, yaitu tulangan longitudinal dan tulangan transversal.

Momen torsi diperhitungkan apabila :

$$T_u > \phi 1/20 \sqrt{f'_c} \sum x^2 y \quad (3.33)$$

dimana : T_u = momen torsi rencana (N mm)

ϕ = faktor reduksi kekuatan

$\sum x^2 y$ = konstanta torsi penampang

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

Momen torsi direncanakan harus memenuhi :

$$T_n \geq T_u / \phi \quad (3.34)$$

dimana : T_n = momen torsi nominal penampang (N mm)

$$T_n = T_c + T_s$$

T_c = ketahanan momen beton (N mm)

$$T_c = \frac{\left(\frac{1}{15} \sqrt{f_c}\right) \sum x^2 y}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,4V_u}{C_t T_u}\right)^2}}$$

V_u = gaya geser rencana (N)

C_t = faktor yang menghubungkan sifat tegangan geser

$$= \frac{b_w d}{\sum x^2 y}$$

Jarak maksimal tulangan torsi adalah nilai terkecil dari ketentuan berikut:

- $1/4 (x_i + y_i)$
- 300 mm

Untuk tulangan arah longitudinal jarak tulangan maksimal adalah 300 mm.

Bila momen terfaktor torsi $T_u > \phi T_c$, maka harus diberi tulangan torsi.

Kuat momen torsi T_s adalah :

$$T_s = \frac{A_t \alpha_t x_1 y_1 f_y}{s} \quad (3.35)$$

dimana : A_t = luas tulangan torsi arah transversal

$$\alpha_t = \frac{1}{3} \left(2 + \frac{x_1}{y_1} \right) \leq 1,50$$

$$T_s \leq 4T_c$$

Nilai T_n tidak boleh kurang dari T_u / ϕ , dan apabila $T_s > 4T_c$ maka penampang harus diperbesar.

Luas tulangan longitudinal adalah luas tulangan terbesar dari dua luas tulangan berikut :

$$A_l = 2A_t \frac{x_1 + y_1}{s} \quad (3.36)$$

atau

$$A_l = \left\{ \frac{2,8xs}{f_y} \left(\frac{T_u}{T_u + \frac{V_u}{3C_t}} \right) - 2A_t \right\} \frac{x_1 + y_1}{s} \quad (3.37)$$

dimana : s = jarak tulangan arah transversal

Nilai A_l yang didapat dari persamaan (3.36) dan (3.37) tidak perlu melebihi nilai yang diperoleh apabila $2A_t$ diganti dengan $b_w s / (3f_y)$.