

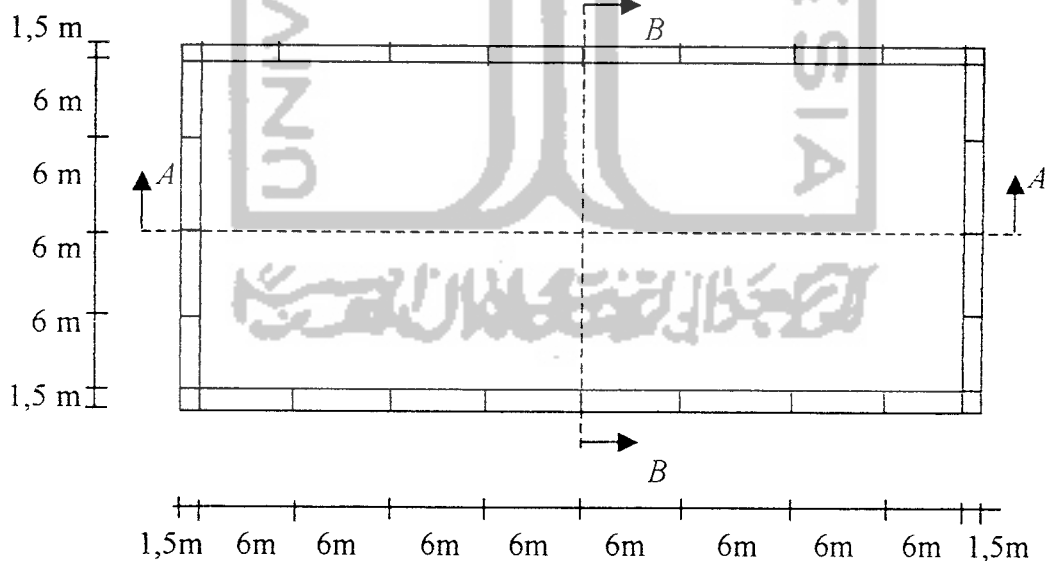
BAB IV

ANALISIS STRUKTUR DAN DESAIN TULANGAN

4.1. Geometri Struktur

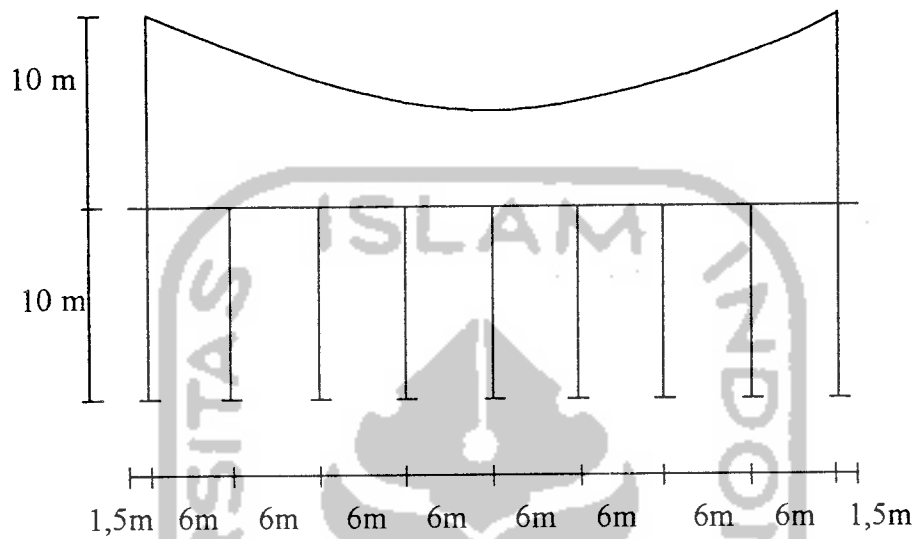
Bangunan gedung berukuran 48 x 24 m dengan atap cangkang berbentuk Paraboloid Hiperbolik.

Atap cangkang tersebut ditunjang oleh balok tepi dan kolom-kolom tepi. Denah atap, balok, dan kolom diperlihatkan pada gambar 4.1 dan gambar 4.2.

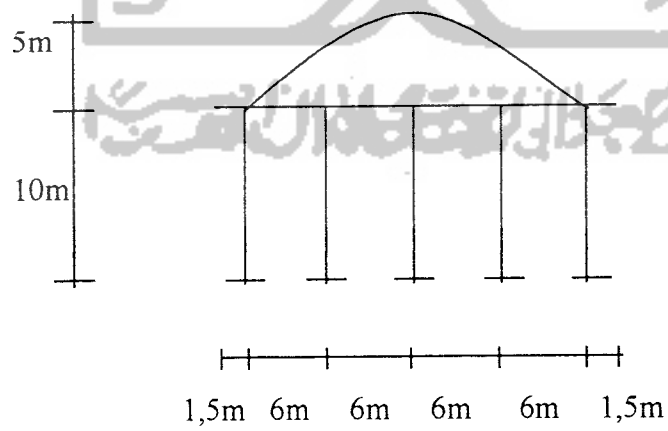


Gambar 4.1 Denah plat, balok dan kolom

Potongan *A-A* (memanjang)



Potongan *B-B* (melintang)



Gambar 4.2 Potongan memanjang dan melintang atap cangkang Paraboloid Hiperbolik

Struktur cangkang Paraboloid Hiperbolik dibentuk oleh kumpulan parabola dengan batas-batas :

- a. Parabola arah memanjang (searah dengan sumbu y) dengan batas $y=0$ dan $y=48$, persamaan parabola adalah : $z = 0,0087 y^2 - 0,4167 y + 20$
- b. Parabola arah melintang (searah dengan sumbu x) dengan batas $x=0$ dan $x=24$, persamaan parabola adalah : $z = -0,0694 x^2 + 1,6667 x + 10$

4.2. Perencanaan Awal

A. Plat cangkang

Tebal minimum plat cangkang adalah 7,5 cm, dengan memperhitungkan panjang bentang antar tumpuan, dipakai tebal 120 mm.

B. Plat luifel

Dari tabel 3.2.5(a) SK SNI T-15-1991-03, dianggap sebagai plat kantilever, tebal minimum adalah : $l/10 = 1500/10 = 150$ mm. Dipakai tebal plat luifel 150 mm.

C. Balok tepi

Balok tepi yang digunakan ada dua, yaitu balok tepi arah memanjang dan balok tepi arah melintang. Dari bab sebelumnya disebutkan bahwa dimensi penampang balok terkecil tidak boleh kurang dari 200 mm.

1. Balok tepi arah memanjang

Dari tabel 3.2.5(a) SK SNI T-15-1991-03, tebal/tinggi minimum balok adalah : $l/16 = 6000/16 = 375$ mm. Dengan memperhitungkan bahwa

plat cangkang hanya ditumpu oleh balok tepi arah memanjang, diambil tebal/tinggi balok 850 mm dan lebar balok 500 mm ($b/h > 0,25$).

2. Balok tepi arah melintang

Dipakai tinggi/tebal balok 750 mm dan lebar balok 500 mm.

D. Balok kantilever

Lebar balok minimum 200 mm. Dipakai lebar balok 250 mm dan tinggi balok 400 mm ($b/h > 0,25$).

E. Kolom

Dari bab sebelumnya telah disebutkan dimensi penampang kolom terkecil tidak boleh kurang dari 250 mm. Berdasarkan panjang/tinggi kolom, rasio antara tinggi kolom terhadap dimensi penampang terkecil tidak boleh lebih dari 16, sehingga dapat ditentukan : $l_k/16 = 10000/16 = 625$ mm. Digunakan kolom bujur sangkar dengan dimensi 800 mm x 800 mm.

Dari perhitungan di atas, ukuran/dimensi plat, balok dan kolom yang akan digunakan adalah :

- plat cangkang tebal 120 mm
- plat luifel tebal 150 mm
- balok tepi memanjang 500 mm x 850 mm
- balok tepi melintang 500 mm x 750 mm
- balok kantilever 250 mm x 400 mm
- kolom 800 mm x 800 mm

4.3 Perhitungan Beban

4.3.1 Pembebanan plat

A. Plat cangkang

- Beban mati

Beban mati pada plat cangkang adalah berat sendiri plat cangkang tersebut.

Beban akibat berat sendiri diperhitungkan dengan memasukkan harga berat per satuan volume (w) dan tebal plat cangkang. Untuk beton bertulang normal $w = 23 \text{ kN/m}^3$.

- Beban hidup

Beban hidup pada atap yang dipakai adalah beban hidup akibat berat pekerja.

Berat pekerja = $100 \text{ kg/m}^2 = 1 \text{ kN/m}^2$.

Beban merata akibat beban hidup pada plat cangkang tersebut pada input data SAP90 dikonversikan menjadi beban terpusat pada keempat titik (joint) dari setiap elemen plat.

B. Plat luifel

Beban mati dan beban hidup untuk plat luifel sama dengan pembebanan pada plat cangkang.

4.3.2 Pembebanan portal

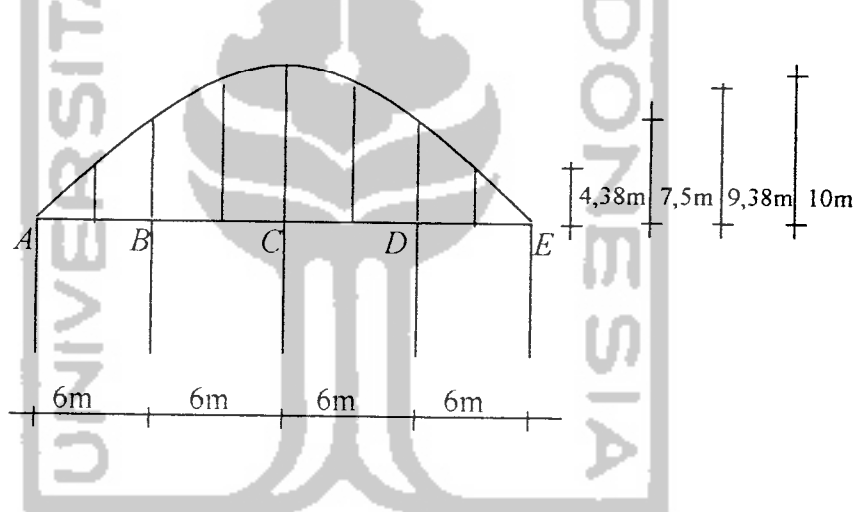
A. Portal memanjang

Beban yang terjadi pada portal memanjang diakibatkan oleh berat sendiri dari portal tersebut ditambah beban mati dan beban hidup pada plat cangkang dan plat luifel, serta berat sendiri balok kantilever.

B. Portal melintang

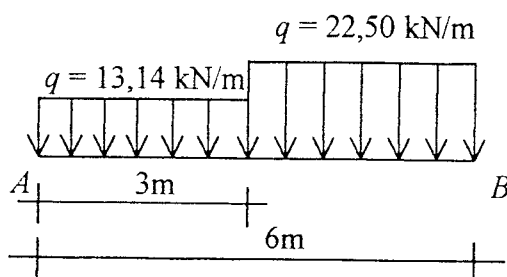
Beban yang terjadi pada portal melintang selain akibat berat sendiri portal tersebut, akibat beban mati dan beban hidup plat luifel, akibat berat sendiri balok kantilever, juga diakibatkan oleh berat dinding yang dipikulnya. Tebal dinding yang digunakan adalah 15 cm dengan berat $q = 300 \text{ kg/m}^2 = 3 \text{ kN/m}^2$.

Distribusi beban merata akibat berat dinding pada portal melintang adalah sebagai berikut :

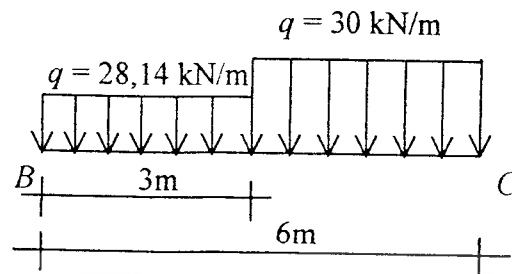


Gambar 4.3 Pembebanan pada portal melintang

- Bentang AB :



- Bentang BC :



Untuk bentang CD dan bentang DE besar bebannya sama seperti pada bentang BC dan bentang AB , tetapi posisi beban dibalik.

4.3.3 Pembebanan gempa

Beban gempa dianalisis secara dinamik dengan memasukkan data sebagai berikut :

A = sudut antara gempa dinamik dengan sumbu mendatar = 0°

S = faktor skala spektrum gempa

= $g \times I \times K \rightarrow$ dengan $g = 10\text{ m/det}^2$

= $10 \times 1,5 \times 1 = 15$

D = rasio damping struktur = $0,05$

t_p = periode

S_1 = harga spektrum gempa pada periode yang ditentukan pada arah 1

S_2 = harga spektrum gempa pada periode yang ditentukan pada arah 2

S_z = harga spektrum gempa pada periode yang ditentukan pada arah z

Nilai-nilai tp , S_1 , S_2 , dan S_z diambil dari grafik koefisien gempa dasar. Dalam hal ini diambil pada wilayah III untuk struktur di atas tanah lunak. Nilai-nilai tersebut adalah :

tp	S_1	S_2	S_z
0	0,07	0,07	0
0,5	0,07	0,07	0
1	0,07	0,07	0
2	0,035	0,035	0
3	0,035	0,035	0
100	0,035	0,035	0

4.4 Mutu Bahan

Mutu bahan yang digunakan dalam analisis dan desain struktur atap cangkang Paraboloid Hiperbolik dan balok tepi ini adalah :

- mutu beton $f'_c = 35$ MPa
- mutu baja tulangan $f_y = 400$ MPa

4.5 Input Data SAP90

Penomoran titik (joint) dan elemen pada struktur atap cangkang Paraboloid Hiperbolik dapat dilihat pada gambar 4.4 dan gambar 4.5.

Harga-harga berat-jenis, massa-jenis, modulus elastisitas dan modulus geser diambil sebagai berikut :

- berat-jenis beton bertulang normal (w) = 23 kN/m^3
- massa jenis (m) = $w / g = 23 / 10 = 2,3 \text{ kN det}^2/\text{m per m}^3$
- modulus elastisitas beton untuk $f'_c = 35$ MPa :

$$E = 27800 \text{ MPa} = 2,78 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

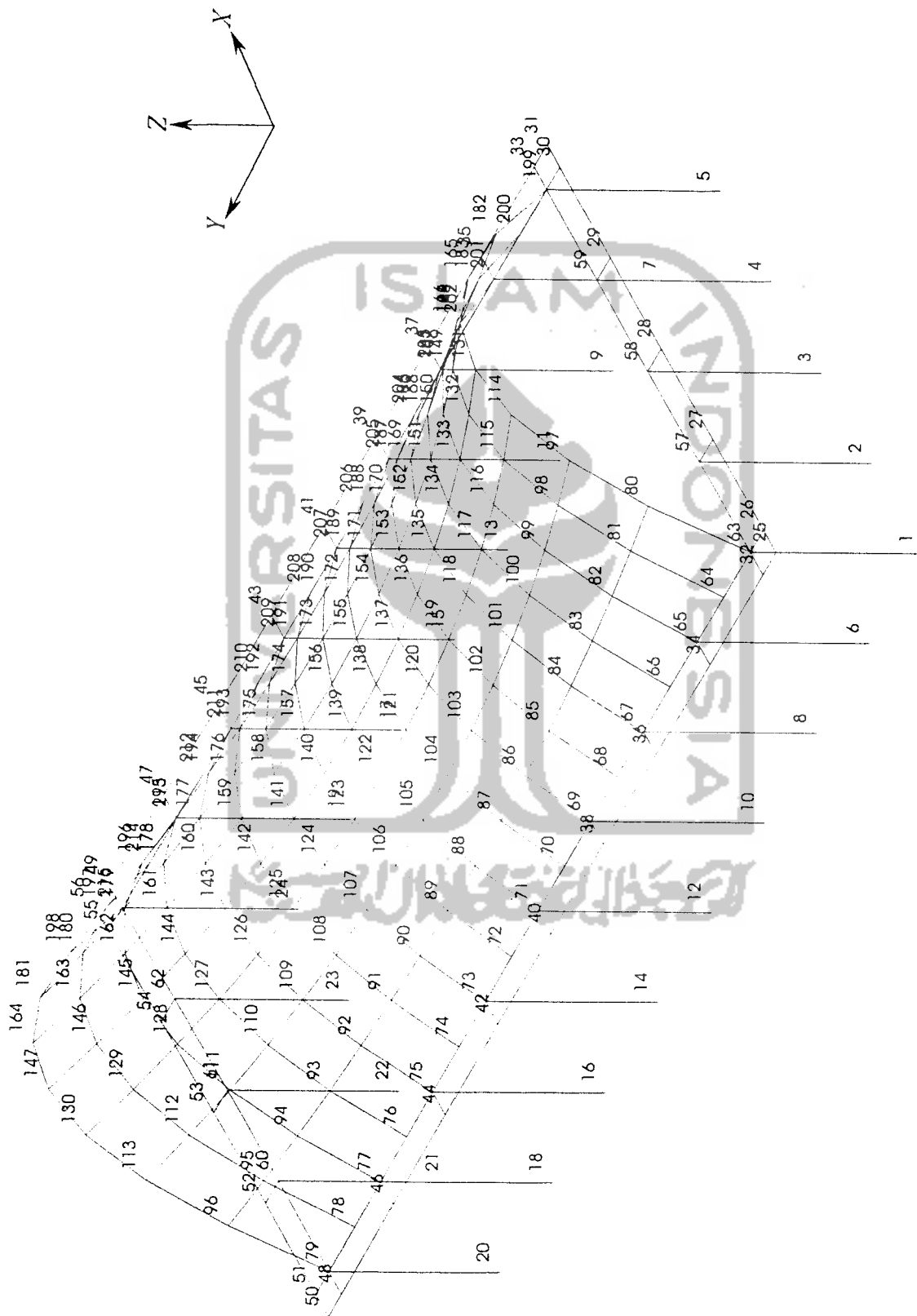
- modulus geser beton :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2,78 \cdot 10^7}{2(1+0,2)} = 1,1584 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

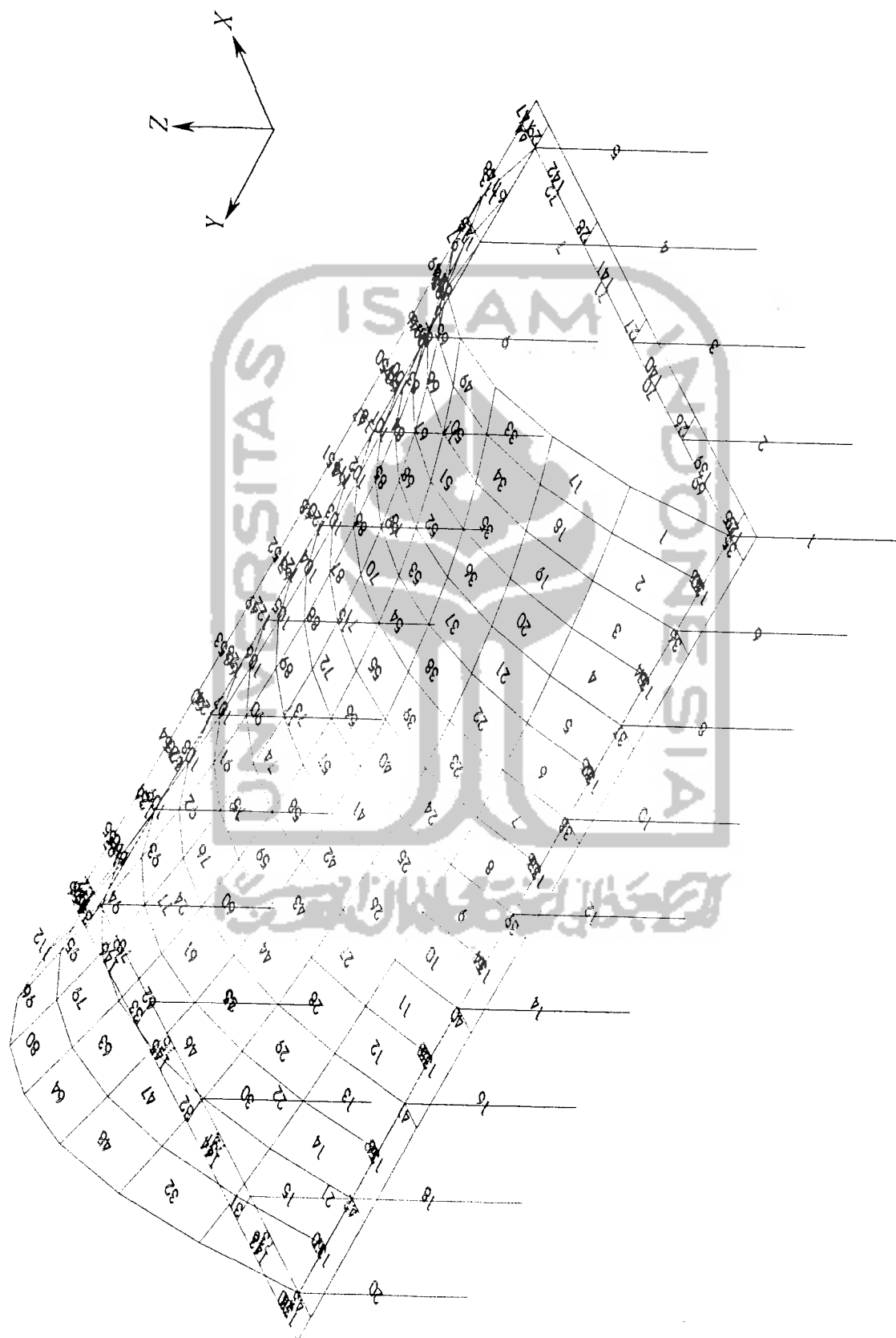
dimana ν (rasio Poisson) = 0,2 untuk $f'_c = 35 \text{ MPa}$

untuk komponen cangkang dipakai nilai rasio Poisson (ν) = 0





Gambar 4.4 Penomoran joint (titik)



Gambar 4.5 Penomoran elemen

INPUT DATA SAP90 STRUKTUR ATAP CANGKANG PARABOLOID HIPERBOLIK

STRUKTUR ATAP CANGKANG PARABOLOID HIPERBOLIK (SATUAN KN-M)

SYSTEM

L=2 V=2

JOINTS

1	X=0	Y=0	Z=0	
5	X=24	Y=0	Z=0	G=1, 5, 1
6	X=0	Y=6	Z=0	
20	X=0	Y=48	Z=0	G=6, 20, 2
7	X=24	Y=6	Z=0	
19	X=24	Y=42	Z=0	G=7, 19, 2
21	X=6	Y=48	Z=0	
24	X=24	Y=48	Z=0	G=21, 24, 1
25	X=-1.5	Y=-1.5	Z=10	
26	X=0	Y=-1.5	Z=10	
30	X=24	Y=-1.5	Z=10	G=26, 30, 1
31	X=25.5	Y=-1.5	Z=10	
32	X=-1.5	Y=0	Z=10	
48	X=-1.5	Y=48	Z=10	G=32, 48, 2
33	X=25.5	Y=0	Z=10	
49	X=25.5	Y=48	Z=10	G=33, 49, 2
50	X=-1.5	Y=49.5	Z=10	
51	X=0	Y=49.5	Z=10	
55	X=24	Y=49.5	Z=10	G=51, 55, 1
56	X=25.5	Y=49.5	Z=10	
57	X=6	Y=0	Z=10	
59	X=18	Y=0	Z=10	G=57, 59, 1
60	X=6	Y=48	Z=10	
62	X=18	Y=48	Z=10	G=60, 62, 1
63	X=0	Y=0	Z=10	
79	X=0	Y=48	Z=10	G=63, 79, 1
80	X=3	Y=0	Z=14.38	
96	X=3	Y=48	Z=14.38	
182	X=21	Y=0	Z=14.38	
198	X=21	Y=48	Z=14.38	
97	X=6	Y=0	Z=17.50	
113	X=6	Y=48	Z=17.50	
165	X=18	Y=0	Z=17.50	
181	X=18	Y=48	Z=17.50	
114	X=9	Y=0	Z=19.38	
130	X=9	Y=48	Z=19.38	
148	X=15	Y=0	Z=19.38	
164	X=15	Y=48	Z=19.38	
131	X=12	Y=0	Z=20	
147	X=12	Y=48	Z=20	
199	X=24	Y=0	Z=10	
215	X=24	Y=48	Z=10	G=199, 215, 1
81	X=3	Y=3	Z=13.86	
95	X=3	Y=45	Z=13.86	
183	X=21	Y=3	Z=13.86	
197	X=21	Y=45	Z=13.86	
98	X=6	Y=3	Z=16.62	
112	X=6	Y=45	Z=16.62	

166	X=18	Y=3	Z=16.62
180	X=18	Y=45	Z=16.62
115	X=9	Y=3	Z=18.28
129	X=9	Y=45	Z=18.28
149	X=15	Y=3	Z=18.28
163	X=15	Y=45	Z=18.28
132	X=12	Y=3	Z=18.83
146	X=12	Y=45	Z=18.83
82	X=3	Y=6	Z=13.42
94	X=3	Y=42	Z=13.42
184	X=21	Y=6	Z=13.42
196	X=21	Y=42	Z=13.42
99	X=6	Y=6	Z=15.86
111	X=6	Y=42	Z=15.86
167	X=18	Y=6	Z=15.86
179	X=18	Y=42	Z=15.86
116	X=9	Y=6	Z=17.33
128	X=9	Y=42	Z=17.33
150	X=15	Y=6	Z=17.33
162	X=15	Y=42	Z=17.33
133	X=12	Y=6	Z=17.81
145	X=12	Y=42	Z=17.81
83	X=3	Y=9	Z=13.04
93	X=3	Y=39	Z=13.04
185	X=21	Y=9	Z=13.04
195	X=21	Y=39	Z=13.04
100	X=6	Y=9	Z=15.21
110	X=6	Y=39	Z=15.21
168	X=18	Y=9	Z=15.21
178	X=18	Y=39	Z=15.21
117	X=9	Y=9	Z=16.51
127	X=9	Y=39	Z=16.51
151	X=15	Y=9	Z=16.51
161	X=15	Y=39	Z=16.51
134	X=12	Y=9	Z=16.95
144	X=12	Y=39	Z=16.95
84	X=3	Y=12	Z=12.73
92	X=3	Y=36	Z=12.73
186	X=21	Y=12	Z=12.73
194	X=21	Y=36	Z=12.73
101	X=6	Y=12	Z=14.69
109	X=6	Y=36	Z=14.69
169	X=18	Y=12	Z=14.69
177	X=18	Y=36	Z=14.69
118	X=9	Y=12	Z=15.86
126	X=9	Y=36	Z=15.86
152	X=15	Y=12	Z=15.86
160	X=15	Y=36	Z=15.86
135	X=12	Y=12	Z=16.25
143	X=12	Y=36	Z=16.25
85	X=3	Y=15	Z=12.50
91	X=3	Y=33	Z=12.50
187	X=21	Y=15	Z=12.50
193	X=21	Y=33	Z=12.50
102	X=6	Y=15	Z=14.28



108	X=6	Y=33	Z=14.28
170	X=18	Y=15	Z=14.28
176	X=18	Y=33	Z=14.28
119	X=9	Y=15	Z=15.35
125	X=9	Y=33	Z=15.35
153	X=15	Y=15	Z=15.35
159	X=15	Y=33	Z=15.35
136	X=12	Y=15	Z=15.71
142	X=12	Y=33	Z=15.71
86	X=3	Y=18	Z=12.33
90	X=3	Y=30	Z=12.33
188	X=21	Y=18	Z=12.33
192	X=21	Y=30	Z=12.33
103	X=6	Y=18	Z=13.99
107	X=6	Y=30	Z=13.99
171	X=18	Y=18	Z=13.99
175	X=18	Y=30	Z=13.99
120	X=9	Y=18	Z=14.99
124	X=9	Y=30	Z=14.99
154	X=15	Y=18	Z=14.99
158	X=15	Y=30	Z=14.99
137	X=12	Y=18	Z=15.32
141	X=12	Y=30	Z=15.32
87	X=3	Y=21	Z=12.23
89	X=3	Y=27	Z=12.23
189	X=21	Y=21	Z=12.23
191	X=21	Y=27	Z=12.23
104	X=6	Y=21	Z=13.82
106	X=6	Y=27	Z=13.82
172	X=18	Y=21	Z=13.82
174	X=18	Y=27	Z=13.82
121	X=9	Y=21	Z=14.78
123	X=9	Y=27	Z=14.78
155	X=15	Y=21	Z=14.78
157	X=15	Y=27	Z=14.78
138	X=12	Y=21	Z=15.09
140	X=12	Y=27	Z=15.09
88	X=3	Y=24	Z=12.19
190	X=21	Y=24	Z=12.19
105	X=6	Y=24	Z=13.75
173	X=18	Y=24	Z=13.75
122	X=9	Y=24	Z=14.69
156	X=15	Y=24	Z=14.69
139	X=12	Y=24	Z=15

:

RESTRAINTS

1	24	1	R=1,1,1,1,1,1
25	215	1	R=0,0,0,0,0,0

:

MASSES

139	M=430.56,430.56,0,0,0,120565.77
-----	---------------------------------

:

CONSTRAINTS

57	59	1	C=63,0,0,0,0,0
32	33	1	C=63,0,0,0,0,0

```

199          C=63,0,0,0,0,0
60  62  1    C=79,0,0,0,0,0
48  49  1    C=79,0,0,0,0,0
215          C=79,0,0,0,0,0
64  79  1    C=0,63,0,0,0,0
26  51  25   C=0,63,0,0,0,0
200 215  1    C=0,199,0,0,0,0
30  55  25   C=0,199,0,0,0,0
25          C=26,32,0,0,0,63
31          C=30,33,0,0,0,199
50          C=51,48,0,0,0,79
56          C=55,49,0,0,0,215
:
FRAME
C CONTROL INFORMATION DATA
NM=4  NL=4  Z=-1  NSEC=3
C MATERIAL SECTION PROPERTY DATA
1  SH=R  T=0.30,0.80  E=2.78E7  G=1.1584E7  W=23  M=2.3
2  SH=R  T=0.35,0.50  E=2.78E7  G=1.1584E7  W=23  M=2.3
3  SH=R  T=0.35,0.50  E=2.78E7  G=1.1584E7  W=23  M=2.3
4  SH=R  T=0.40,0.25  E=2.78E7  G=1.1584E7  W=23  M=2.3
C SPAN LOADING DATA
1  TRAP=0,-13.14,0,3,-13.14,0,3,-22.50,0,6,-22.50
2  TRAP=0,-28.14,0,3,-28.14,0,3,-30.00,0,6,-30.00
3  TRAP=0,-30.00,0,3,-30.00,0,3,-28.14,0,6,-28.14
4  TRAP=0,-22.50,0,3,-22.50,0,3,-13.14,0,6,-13.14
C ELEMENT LOCATION DATA
C COLUMNS
1  1  63  M=1  LP=3,0  G=1,4,4,136
2  2  57  M=1  LP=3,0  G=2,1,1,1
6  6  65  M=1  LP=3,0  G=7,2,2,2
7  7  201 M=1  LP=3,0  G=6,2,2,2
24 24 215 M=1  LP=3,0
21 21 60  M=1  LP=3,0  G=2,1,1,1
C BEAMS
25 26 63  M=4  LP=3,0
26 27 57  M=4  LP=3,0  G=2,1,1,1
29 30 199 M=4  LP=3,0
30 79 51  M=4  LP=3,0
31 60 52  M=4  LP=3,0  G=2,1,1,1
34 215 55 M=4  LP=3,0
35 63 32  M=4  LP=2,0
36 65 34  M=4  LP=2,0  G=6,1,2,2
43 79 48  M=4  LP=2,0
44 33 199 M=4  LP=2,0
45 35 201 M=4  LP=2,0  G=6,1,2,2
52 49 215 M=4  LP=2,0
53 63 65  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136
54 65 67  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136
55 67 69  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136
56 69 71  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136
57 71 73  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136
58 73 75  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136
59 75 77  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136
60 77 79  M=2  LP=3,0  G=1,8,136,136

```



69	63	57	M=3	LP=2,0	NSL=1,0	G=1,4,16,3
70	57	58	M=3	LP=2,0	NSL=2,0	G=1,4,3,3
71	58	59	M=3	LP=2,0	NSL=3,0	G=1,4,3,3
72	59	199	M=3	LP=2,0	NSL=4,0	G=1,4,3,16

:

SHELL

C CONTROL INFORMATION DATA

NM=2 Z=-1

C MATERIAL PROPERTY DATA

1 E=2.78E7 U=0.0 W=23 M=2.3

2 E=2.78E7 U=0.2 W=23 M=2.3

C ELEMENT LOCATION DATA

1	JQ=63,64,80,81	ETYPE=0	M=1	TH=0.12	LP=2	G=16,8
129	JQ=25,32,26,63	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
130	JQ=32,34,63,65	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
131	JQ=34,36,65,67	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
132	JQ=36,38,67,69	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
133	JQ=38,40,69,71	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
134	JQ=40,42,71,73	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
135	JQ=42,44,73,75	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
136	JQ=44,46,75,77	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
137	JQ=46,48,77,79	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
138	JQ=48,50,79,51	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
139	JQ=26,63,27,57	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
140	JQ=27,57,28,58	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
141	JQ=28,58,29,59	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
142	JQ=29,59,30,199	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
143	JQ=79,51,60,52	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
144	JQ=60,52,61,53	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
145	JQ=61,53,62,54	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
146	JQ=62,54,215,55	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
147	JQ=30,199,31,33	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
148	JQ=199,201,33,35	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
149	JQ=201,203,35,37	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
150	JQ=203,205,37,39	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
151	JQ=205,207,39,41	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
152	JQ=207,209,41,43	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
153	JQ=209,211,43,45	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
154	JQ=211,213,45,47	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
155	JQ=213,215,47,49	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	
156	JQ=215,55,49,56	ETYPE=2	M=2	TH=0.15	LP=2	

:

LOADS

25	31	6	L=2	F=0,0,-0.5625
26	30	4	L=2	F=0,0,-2.8125
27	29	1	L=2	F=0,0,-4.50
32	33	1	L=2	F=0,0,-2.8125
57	59	1	L=2	F=0,0,-4.50
48	49	1	L=2	F=0,0,-2.8125
60	62	1	L=2	F=0,0,-4.50
50	56	6	L=2	F=0,0,-0.5625
51	55	4	L=2	F=0,0,-2.8125
52	54	1	L=2	F=0,0,-4.50
63	79	16	L=2	F=0,0,-7.3125
199	215	16	L=2	F=0,0,-7.3125

80	182	17	L=2	F=0,0,-4.50
96	198	17	L=2	F=0,0,-4.50
34	46	2	L=2	F=0,0,-4.50
64	78	2	L=2	F=0,0,-4.50
65	77	2	L=2	F=0,0,-9.00
200	214	2	L=2	F=0,0,-4.50
201	213	2	L=2	F=0,0,-9.00
35	47	2	L=2	F=0,0,-4.50
81	95	1	L=2	F=0,0,-9.00
98	112	1	L=2	F=0,0,-9.00
115	129	1	L=2	F=0,0,-9.00
132	146	1	L=2	F=0,0,-9.00
149	163	1	L=2	F=0,0,-9.00
166	180	1	L=2	F=0,0,-9.00
183	197	1	L=2	F=0,0,-9.00

:

SPEC

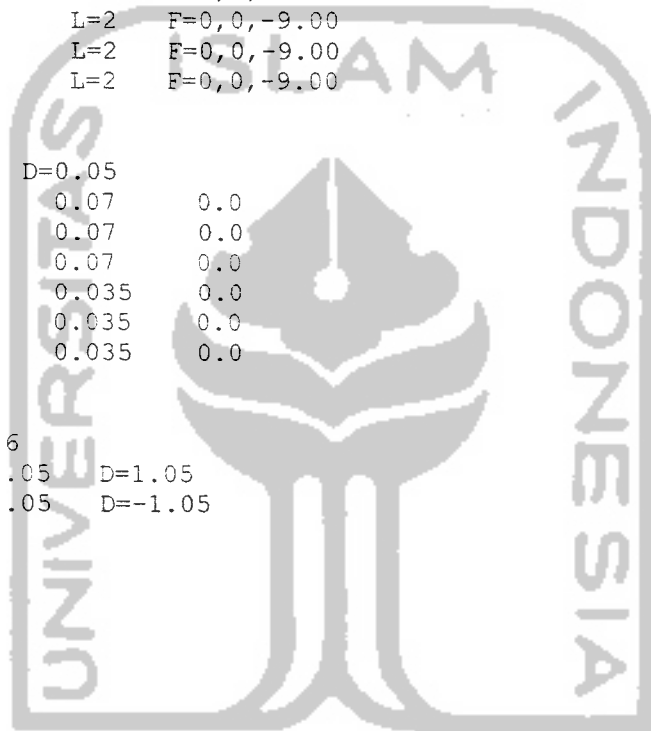
A=0	S=15	D=0.05		
0	0.07	0.07	0.0	
0.5	0.07	0.07	0.0	
1	0.07	0.07	0.0	
2	0.035	0.035	0.0	
3	0.035	0.035	0.0	
100	0.035	0.035	0.0	

:

COMBO

1	C=1.2,1.6		
2	C=1.05,1.05	D=1.05	
3	C=1.05,1.05	D=-1.05	

:



وَمَا كُنَّا بِمُعْجِزِينَ لَكُمْ وَلَئِن كُنَّا إِلَّا لِنُفِذَ بِكُمْ آيَاتِنَا

4.6 Desain Tulangan Plat Cangkang

Desain tulangan plat cangkang didasarkan pada nilai-nilai dari hasil analisis struktur dengan SAP90 berupa gaya aksial dan momen. Perhitungan luas tulangan akibat gaya aksial yang dipakai adalah gaya aksial tarik, sedangkan luas tulangan akibat momen dipakai momen positif dan momen negatif.

4.6.1 Desain tulangan arah transversal

Desain tulangan pada arah transversal menggunakan harga-harga N_x^{maks} , M_y^{-maks} dan M_y^{+maks} .

Contoh hitungan :

Elemen 1

- Luas tulangan akibat gaya aksial tarik :

$$\phi = 0,8 \text{ (untuk aksial tarik)}$$

$$A_s = \frac{N_x^{maks}}{\phi f_y} = \frac{96,643 \cdot 10^3}{0,8 \cdot 400} = 302,01 \text{ mm}^2/\text{m}$$

- Luas tulangan akibat momen :

selimut beton 20 mm

tulangan $\varnothing 16$

$$d = 120 - 20 - 16/2 = 92 \text{ mm}$$

$$\frac{M_u}{\phi} = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\text{anggapan awal } \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0,9d$$

$$\frac{16,230.10^6}{0,8} = A_s \cdot 400 \cdot 0,9 \cdot 92 \rightarrow A_s = 612,55 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c b} = \frac{612,55 \cdot 400}{0,85 \cdot 35 \cdot 1000} = 8,24 \text{ mm}$$

$$\frac{16,230.10^6}{0,8} = A_s \cdot 400 \left(92 - \frac{8,24}{2} \right)$$

$$A_s = 577,14 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Hasil perhitungan luas tulangan arah transversal dapat dilihat pada tabel 4.1 dan 4.2.

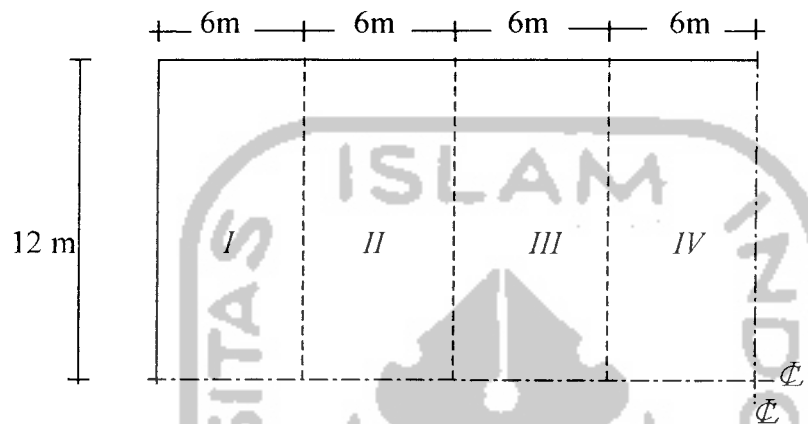
Tabel 4.1 Luas tulangan akibat gaya aksial tarik transversal

No. Elemen	$N_x \text{ maks}$ (kN/m)	A_s (mm ² /m)	No. Elemen	$N_x \text{ maks}$ (kN/m)	A_s (mm ² /m)
1	96,643	302,01	33	34,662	108,32
2	678,52	2120,38	34	21,936	68,55
3	180,16	563,00	35	12,153	37,98
4	2,3935	7,48	36	48,526	151,64
5	214,09	669,03	37	-	-
6	-	-	38	-	-
7	392,69	1030,28	39	-	-
8	18,911	59,10	40	-	-
17	63,696	199,05	49	-	-
18	41,508	129,71	50	-	-
19	273,65	855,16	51	-	-
20	86,288	269,65	52	-	-
21	89,456	279,55	53	-	-
22	50,322	157,26	54	-	-
23	-	-	55	-	-
24	-	-	56	4,4708	13,97

Tabel 4.2 Luas tulangan akibat momen arah transversal

No. Elemen	M_y^- maks (kNm/m)	A_s (mm ² /m)	M_y^+ maks (kNm/m)	A_s (mm ² /m)
1	16,230	577,14	13,728	484,65
2	13,051	459,86	19,721	708,40
3	5,5705	192,17	7,8921	274,04
4	14,441	510,87	22,184	802,64
5	13,021	458,76	10,609	371,22
6	5,0008	172,24	10,977	384,50
7	18,634	667,24	17,467	623,34
8	12,773	449,71	13,984	494,05
17	0,7856	26,74	12,440	437,57
18	4,8522	167,05	6,3602	219,90
19	2,6514	90,72	6,7954	235,23
20	1,6178	55,20	3,6445	125,05
21	5,7324	197,84	2,4459	83,65
22	4,1435	142,37	3,9968	137,27
23	5,7299	197,75	0,9330	31,77
24	6,6490	230,07	0,1299	4,41
33	1,3301	45,35	1,9360	66,11
34	1,9191	65,53	5,0847	175,17
35	3,1611	108,32	2,1896	74,83
36	3,0696	105,16	1,7348	59,21
37	3,0376	104,05	2,2457	76,76
38	4,2809	147,15	-	-
39	3,4874	119,61	0,9159	31,19
40	5,0512	174,00	1,6544	56,45
49	1,5852	54,08	0,9132	31,10
50	1,9954	68,15	0,3485	11,85
51	3,1262	107,11	-	-
52	3,4493	118,29	-	-
53	2,7096	92,73	-	-
54	2,2868	78,17	-	-
55	1,7351	59,22	1,0010	34,10
56	2,0882	71,34	2,3595	80,67

Pembagian daerah penempatan tulangan arah transversal adalah seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pembagian daerah penempatan tulangan transversal

Tulangan ditempatkan pada kedua sisi dari cangkang, yaitu sisi atas dan sisi bawah.

A. Daerah I

$$A_s \text{ akibat } N_x \text{ maks} = 2120,38 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^- \text{ maks} = 577,14 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^+ \text{ maks} = 708,40 \text{ mm}^2/\text{m}$$

- Tulangan sisi atas :

$$A_s = \frac{2120,38}{2} + 577,14 = 1637,33 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 110$ ($A_s = 1827,84 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

- Tulangan sisi bawah :

$$A_s = \frac{2120,38}{2} + 708,04 = 1768,59 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 110$ ($A_s = 1827,84 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

B. Daerah II

$$A_s \text{ akibat } N_x \text{ maks} = 855,16 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^- \text{ maks} = 510,87 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^+ \text{ maks} = 802,64 \text{ mm}^2/\text{m}$$

- Tulangan sisi atas :

$$A_s = \frac{855,16}{2} + 510,87 = 938,45 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 160$ ($A_s = 1256,64 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

- Tulangan sisi bawah :

$$A_s = \frac{855,16}{2} + 802,64 = 1230,22 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 160$ ($A_s = 1256,64 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

C. Daerah III

$$A_s \text{ akibat } N_x \text{ maks} = 669,03 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^- \text{ maks} = 458,76 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^+ \text{ maks} = 384,50 \text{ mm}^2/\text{m}$$

- Tulangan sisi atas :

$$A_s = \frac{669,03}{2} + 458,76 = 793,28 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 250$ ($A_s = 804,25 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

- Tulangan sisi bawah :

$$A_s = \frac{669,03}{2} + 384,50 = 719,02 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 250$ ($A_s = 804,25 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

D. Daerah IV

$$A_s \text{ akibat } N_x \text{ maks} = 1030,28 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^- \text{ maks} = 667,24 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_y^+ \text{ maks} = 623,34 \text{ mm}^2/\text{m}$$

- Tulangan sisi atas :

$$A_s = \frac{1030,28}{2} + 667,24 = 1182,38 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 170$ ($A_s = 1182,72 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

- Tulangan sisi bawah :

$$A_s = \frac{1030,28}{2} + 623,34 = 1138,48 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 170$ ($A_s = 1182,72 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

4.6.2 Desain tulangan arah longitudinal

Desain tulangan pada arah longitudinal menggunakan harga-harga $N_y \text{ maks}$, $M_x^- \text{ maks}$ dan $M_x^+ \text{ maks}$. Perhitungan luas tulangan arah longitudinal dapat dilihat pada tabel 4.3 dan 4.4.

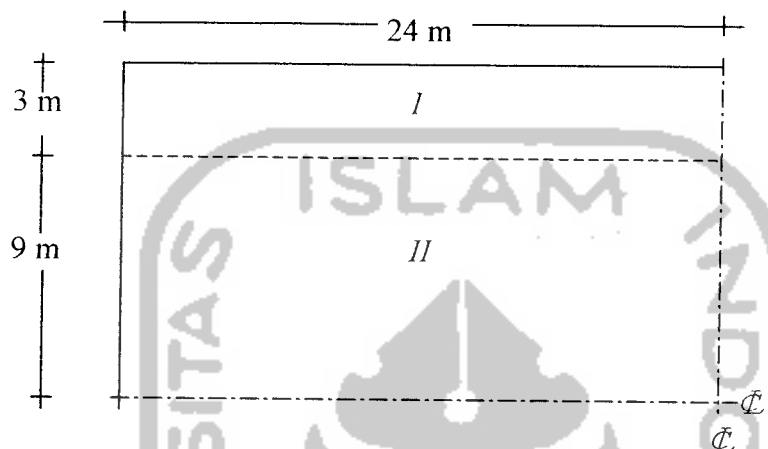
Tabel 4.3 Luas tulangan akibat gaya aksial tarik longitudinal

No. Elemen	$N_y, maks$ (kN/m)	A_s (mm ² /m)	No. Elemen	$N_y, maks$ (kN/m)	A_s (mm ² /m)
1	-	-	33	29,949	93,59
2	360,02	1125,06	34	42,820	133,81
3	52,411	163,78	35	131,55	411,09
4	284,88	890,25	36	159,35	497,97
5	136,75	427,34	37	159,90	499,69
6	70,430	220,09	38	144,69	452,16
7	98,032	306,35	39	150,15	469,22
8	-	-	40	91,046	284,52
17	30,724	96,01	49	8,939	27,94
18	66,789	208,72	50	47,714	149,11
19	191,42	598,19	51	70,151	219,22
20	184,81	577,53	52	106,36	332,38
21	150,56	470,50	53	164,35	513,59
22	85,504	267,20	54	145,31	454,09
23	0,082	0,26	55	147,38	460,56
24	-	-	56	82,463	257,70

Tabel 4.4 Luas tulangan akibat momen arah longitudinal

No. Elemen	$M_x^- maks$ (kNm/m)	A_s (mm ² /m)	$M_x^+ maks$ (kNm/m)	A_s (mm ² /m)
1	46,828	1826,51	41,606	1596,43
2	30,909	1147,73	42,351	1628,79
3	30,862	1145,83	42,363	1629,32
4	4,4704	153,74	38,805	1476,07
5	14,749	522,23	38,833	1477,27
6	31,737	1181,43	49,440	1944,48
7	37,272	1411,08	57,143	2033,96
8	47,365	1850,60	57,156	2034,73
17	19,752	709,58	45,630	1773,06
18	5,1784	178,45	37,229	1409,27
19	3,7756	129,60	37,266	1410,83
20	12,097	425,09	14,853	526,59
21	13,322	469,77	14,840	525,59
22	26,774	981,95	11,460	401,97
23	26,783	982,31	2,3996	82,05
24	30,437	1128,60	2,4050	82,24
33	15,663	556,05	1,0171	34,65
34	15,590	553,34	1,0834	36,91
35	14,774	523,15	-	-
36	13,903	491,08	-	-
37	14,491	512,71	-	-
38	14,528	514,08	0,1054	3,58
39	22,109	799,75	5,6927	196,45
40	22,113	799,90	6,9179	239,55
49	15,780	560,39	2,6183	89,58
50	15,781	560,43	-	-
51	15,520	550,75	-	-
52	15,304	542,74	-	-
53	11,191	392,23	-	-
54	6,2874	217,34	0,5183	17,48
55	5,9111	204,11	5,0041	172,35
56	6,3028	217,88	7,4015	256,65

Pembagian daerah penempatan tulangan arah longitudinal adalah seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Pembagian daerah penempatan tulangan longitudinal

Tulangan ditempatkan pada kedua sisi dari cangkang, yaitu sisi atas dan sisi bawah.

A. Daerah I

$$A_s \text{ akibat } N_{y,maks} = 1125,06 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_x^- \text{ maks} = 1850,60 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_x^+ \text{ maks} = 2034,73 \text{ mm}^2/\text{m}$$

- Tulangan sisi atas :

$$A_s = \frac{1125,06}{2} + 1850,60 = 2413,13 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\emptyset 16 - 75$ ($A_s = 2680,83 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

- Tulangan sisi bawah :

$$A_s = \frac{1125,06}{2} + 2034,73 = 2597,26 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 75$ ($A_s = 2680,83 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

B. Daerah II

$$A_s \text{ akibat } N_{y,maks} = 598,19 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_x^- \text{ maks} = 1128,60 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ akibat } M_x^+ \text{ maks} = 1173,06 \text{ mm}^2/\text{m}$$

- Tulangan sisi atas :

$$A_s = \frac{598,19}{2} + 1128,60 = 1427,70 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 130$ ($A_s = 1546,63 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

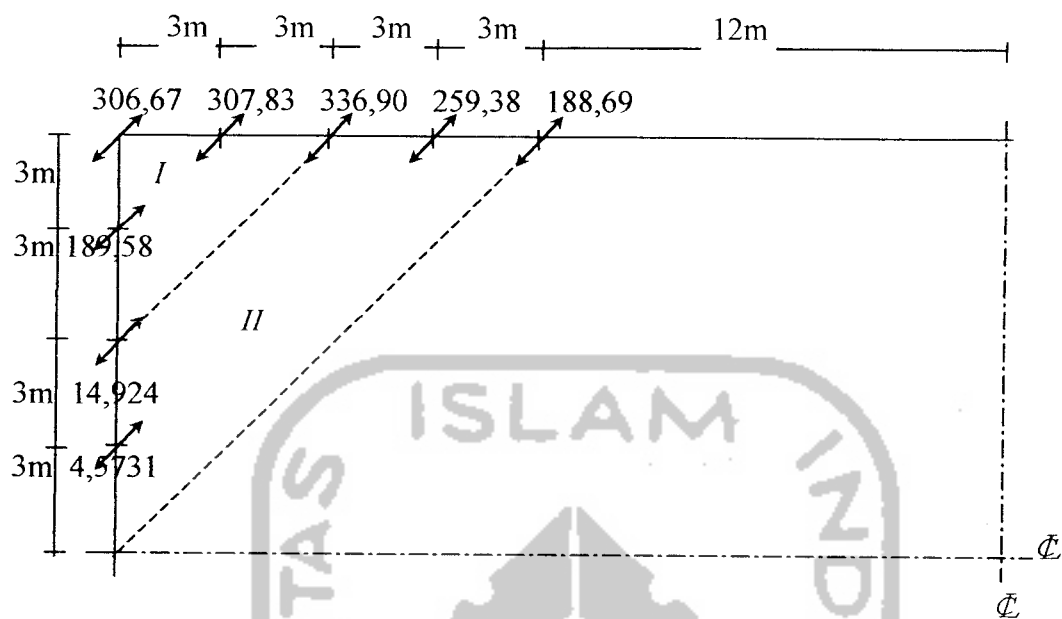
- Tulangan sisi bawah :

$$A_s = \frac{598,19}{2} + 1173,06 = 1472,16 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai $\varnothing 16 - 130$ ($A_s = 1546,63 \text{ mm}^2/\text{m} > 0,0035bh = 420 \text{ mm}^2/\text{m}$).

4.6.3 Desain tulangan arah diagonal

Tulangan arah diagonal ditempatkan pada bagian tepi dari plat cangkang yang membentuk sudut 45° terhadap sumbu longitudinal. Besarnya nilai $N_{xy,maks}$ pada bagian tepi dari plat cangkang dari hasil SAP90 serta pembagian daerah penempatan tulangan diagonal dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Besar nilai N_{xy} dan pembagian daerah penulangan

A. Daerah I

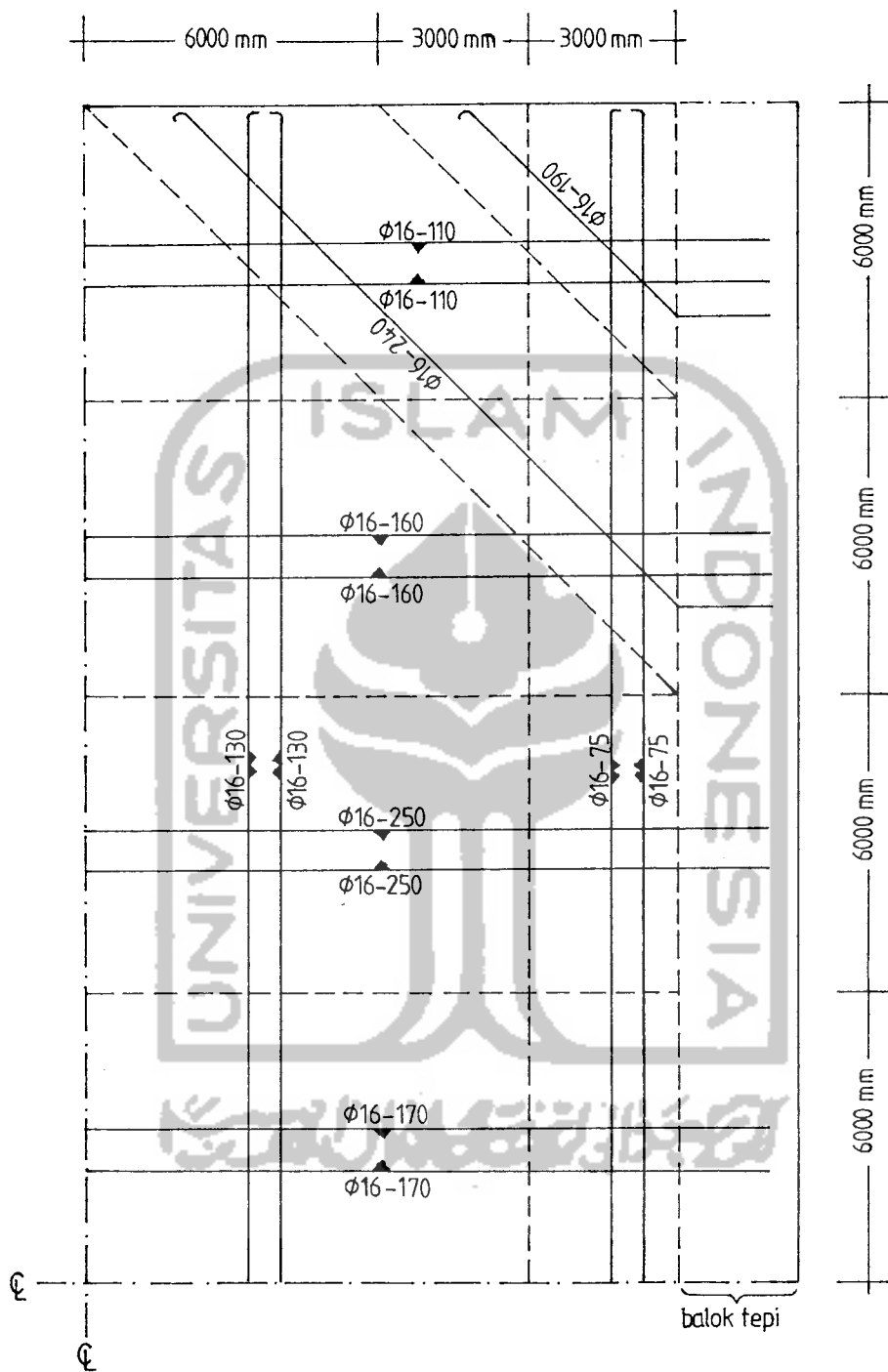
$$A_s = \frac{N_{xy, maks}}{\phi f_y} = \frac{336,90 \cdot 10^3}{0,8 \cdot 400} = 1052,81 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai tulangan $\text{Ø}16 - 190$ ($A_s = 1058,22 \text{ mm}^2/\text{m}$)

B. Daerah II

$$A_s = \frac{N_{xy, maks}}{\phi f_y} = \frac{259,38 \cdot 10^3}{0,8 \cdot 400} = 810,56 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Dipakai tulangan $\text{Ø}16 - 240$ ($A_s = 837,76 \text{ mm}^2/\text{m}$)



Gambar 4.9 Penulangan plat cangkang Paraboloid Hiperbolik

4.7 Desain Tulangan Balok Tepi

Dari hasil analisis struktur dengan SAP90, gaya-gaya yang bekerja pada balok tepi arah memanjang terdiri dari dua arah, yaitu gaya-gaya yang bekerja pada bidang yang sejajar dengan tinggi dan panjang balok (bidang 1-2) serta yang bekerja pada bidang yang sejajar dengan lebar dan panjang balok (bidang 1-3).

Data gaya-gaya yang bekerja pada balok tepi arah memanjang tersebut adalah :

- Pada bidang 1-2 :

$$V_u^{\text{maks}} = 101,99 \text{ kN}$$

$$M_u^-^{\text{maks}} = 165,06 \text{ kNm}$$

$$M_u^+^{\text{maks}} = 76,90 \text{ kNm}$$

- Pada bidang 1-3 :

$$V_u^{\text{maks}} = 118,05 \text{ kN (konstan sepanjang balok tepi)}$$

$$M_u^-^{\text{maks}} = 360,56 \text{ kNm}$$

$$M_u^+^{\text{maks}} = 347,71 \text{ kNm}$$

- Momen torsi :

$$T_u^{\text{maks}} = 203,39 \text{ kNm}$$

4.7.1 Desain tulangan geser

Tulangan geser direncanakan dengan membandingkan luas tulangan geser yang diperlukan akibat gaya geser yang bekerja pada bidang 1-2 dan bidang 1-3 dari balok tepi.

Pada bidang 1-2 :

$$V_u \text{ maks} = 101,99 \text{ kN}$$

$$b_w = 500 \text{ mm}, h = 850 \text{ mm}, d_s = 70 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 850 - 70 = 780 \text{ mm}$$

Kekuatan geser beton :

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_c} b_w d = \frac{1}{6} \sqrt{35} \cdot 500 \cdot 780 = 384,5452 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0,6 \cdot 384,5452 = 230,7271 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{2} \phi V_c = 0,5 \cdot 230,7271 = 115,3636 \text{ kN}$$

$V_u < \frac{1}{2} \phi V_c$, sehingga tidak diperlukan tulangan geser.

Pada bidang 1-3 :

$$V_u \text{ maks} = 118,05 \text{ kN}$$

$$b_w = 850 \text{ mm}, h = 500 \text{ mm}, d_s = 70 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 500 - 70 = 430 \text{ mm}$$

Kekuatan geser beton :

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_c} b_w d = \frac{1}{6} \sqrt{35} \cdot 850 \cdot 430 = 360,3879 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0,6 \cdot 360,3879 = 216,2327 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{2} \phi V_c = 0,5 \cdot 216,2327 = 108,1164 \text{ kN}$$

$\frac{1}{2} \phi V_c < V_u < V_c$, sehingga diperlukan tulangan geser minimum.

Dipakai sengkang $\varnothing 12$ ($A_v = 226 \text{ mm}^2$).

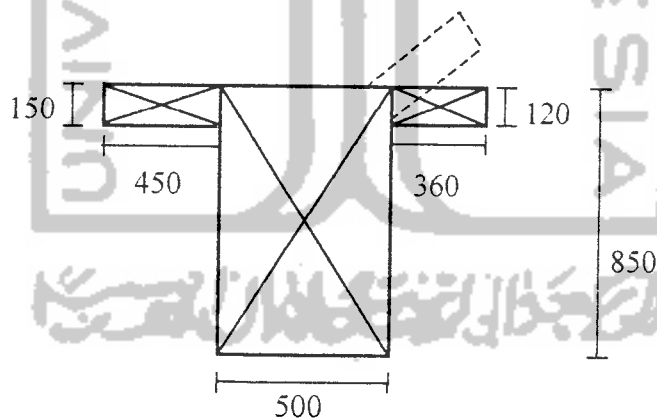
Jarak sengkang diambil nilai terkecil dari nilai-nilai berikut :

- $s = \frac{3A_v f_y}{b_w} = \frac{3.226.400}{850} = 319 \text{ mm}$
- $s = d/2 = 430/2 = 215 \text{ mm}$
- $s \leq 600 \text{ mm}$

Dari perhitungan di atas, untuk tulangan geser pada badan balok tepi digunakan sengkang $\emptyset 12 - 210$.

4.7.2 Desain tulangan kombinasi geser dan torsi

Nilai-nilai yang digunakan dalam perhitungan tulangan kombinasi geser dan torsi yaitu $V_u \text{maks} = 101,99 \text{ kN}$ (pada bidang 1-2), $V_u \text{maks} = 118,05 \text{ kN}$ (pada bidang 1-3) dan $T_u \text{maks} = 203,39 \text{ kNm}$.



$$T_u = 203,39 \text{ kNm}$$

Batas besar efek T_u :

$$T_{ub} = \phi \left(\frac{1}{20} \sqrt{f_c'} \sum x^2 y \right)$$

$$\sum x^2 y = 500^2 \cdot 850 + 150^2 \cdot 450 + 120^2 \cdot 360 = 227,809 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$T_{ub} = 0,6 \left(\frac{1}{20} \sqrt{35} \cdot 227,809 \cdot 10^6 \right) = 40,4321 \text{ kNm}$$

$T_u > T_{ub}$, yang berarti torsi harus diperhitungkan bersama geser.

Sebagai tulangan geser dan torsi digunakan sengkang tertutup $\varnothing 12$ mm.

A. Perencanaan sengkang torsi

$$T_n = \frac{T_u}{\phi} = \frac{203,39}{0,6} = 338,9833 \text{ kNm}$$

selimut beton 40 mm, $h = 850$ mm, $d_s = 70$ mm, $b_w = 500$ mm

$$d = h - d_s = 850 - 70 = 780 \text{ mm}$$

sumbu beton dalam menahan torsi :

$$C_t = \frac{b_w d}{\sum x^2 y} = \frac{500 \cdot 780}{227,809 \cdot 10^6} = 0,0017 / \text{mm}$$

$$T_c = \frac{\frac{1}{15} \sqrt{f_c} \sum x^2 y}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,4V_u}{C_t T_u} \right)}} = \frac{\frac{1}{15} \sqrt{35} \cdot 227,809 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,4 \cdot 118,05 \cdot 10^3}{0,0017 \cdot 203,39 \cdot 10^6} \right)}} = 84,2783 \text{ kNm}$$

torsi yang harus ditahan tulangan torsi :

$$T_s = T_n - T_c = 338,9833 - 84,2783 = 254,7050 \text{ kNm}$$

$$4T_c = 4 \cdot 84,2783 = 337,134 \text{ kNm} > T_s \rightarrow \text{OK}$$

$$T_s = \frac{A_t \alpha_t x_1 y_1 f_y}{s} \rightarrow \frac{A_t}{s} = \frac{T_s}{\alpha_t x_1 y_1 f_y}$$

$$x_1 = 500 - 2(40 + 6) = 408 \text{ mm}$$

$$y_1 = 850 - 2(40 + 6) = 758 \text{ mm}$$

$$\alpha_r = \frac{1}{3} \left(2 + \frac{y_1}{x_1} \right) = \frac{1}{3} \left(2 + \frac{758}{408} \right) = 1,2859 < 1,5$$

$$\frac{A_r}{s} = \frac{254,7050 \cdot 10^6}{1,2859 \cdot 408 \cdot 758 \cdot 400} = 1,6012 \text{ mm}^2/\text{mm jarak/kaki}$$

B. Perencanaan sengkang geser

Perencanaan sengkang geser didasarkan pada nilai V_u maks pada bidang 1-2 dan V_u maks pada bidang 1-3.

Akibat gaya geser pada bidang 1-2 :

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} = \frac{101,99}{0,6} = 169,98 \text{ kN}$$

sumbangan beton dalam menahan geser :

$$V_c = \frac{\frac{1}{6} \sqrt{f_c} b_w d}{\sqrt{1 + \left(2,5 C_r \frac{T_u}{V_u} \right)^2}}$$

dengan $b_w = 500 \text{ mm}$, $d = 850 - 70 = 780 \text{ mm}$

$$C_r = \frac{b_w d}{\sum x^2 y} = \frac{500 \cdot 780}{227,809 \cdot 10^6} = 0,0017$$

$$V_c = \frac{\frac{1}{6} \sqrt{35} \cdot 500 \cdot 780}{\sqrt{1 + \left(2,5 \cdot 0,0017 \frac{203,39 \cdot 10^6}{101,99 \cdot 10^3} \right)^2}} = 45,0593 \text{ kN}$$

$$V_s = V_n - V_c = 169,98 - 45,0593 = 124,9207 \text{ kN}$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y d} = \frac{124,9207 \cdot 10^3}{400 \cdot 780} = 0,4004 \text{ mm}^2/\text{mm jarak/dua kaki}$$

Akibat gaya geser pada bidang 1-3 :

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} = \frac{118,05}{0,6} = 196,75 \text{ kN}$$

sumbangan beton dalam menahan geser :

$$V_c = \frac{\frac{1}{6} \sqrt{f_c'} b_w d}{\sqrt{1 + \left(2,5 C_t \frac{T_u}{V_u} \right)^2}}$$

dengan $b_w = 850 \text{ mm}$, $d = 500 - 70 = 430 \text{ mm}$

$$C_t = \frac{b_w d}{\sum x^2 y} = \frac{850 \cdot 430}{227,809 \cdot 10^6} = 0,0016$$

$$V_c = \frac{\frac{1}{6} \sqrt{35} \cdot 850 \cdot 430}{\sqrt{1 + \left(2,5 \cdot 0,0016 \frac{203,39 \cdot 10^6}{118,05 \cdot 10^3} \right)^2}} = 51,7514 \text{ kN}$$

$$V_s = V_n - V_c = 196,75 - 51,7514 = 144,9986 \text{ kN}$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y d} = \frac{144,9986 \cdot 10^3}{400 \cdot 430} = 0,8430 \text{ mm}^2/\text{mm jarak/dua kaki}$$

Dari kedua nilai A_v/s di atas, digunakan nilai yang terbesar, yaitu yang diperoleh pada bidang 1-3.

C. Perencanaan tulangan geser dan torsi (gabungan)

$$\frac{A_{vt}}{s} = 2 \frac{A_t}{s} + \frac{A_v}{s} = 2 \cdot 1,6012 + 0,8430 = 4,0454 \text{ mm}^2$$

dipakai sengkang $\emptyset 12 \text{ mm}$ dengan luas dua kaki $A_s = 226 \text{ mm}^2$

jarak sengkang :

$$s = \frac{A_s}{\left(\frac{A_{vt}}{s}\right)} = \frac{226}{4,0454} = 55,8659 \text{ mm}$$

jarak sengkang maksimum :

$$\frac{1}{4}(x_1 + y_1) = \frac{1}{4}(408 + 758) = 291,5 \text{ mm} > 55,8659 \text{ mm}$$

dipakai jarak sengkang $s = 55 \text{ mm}$

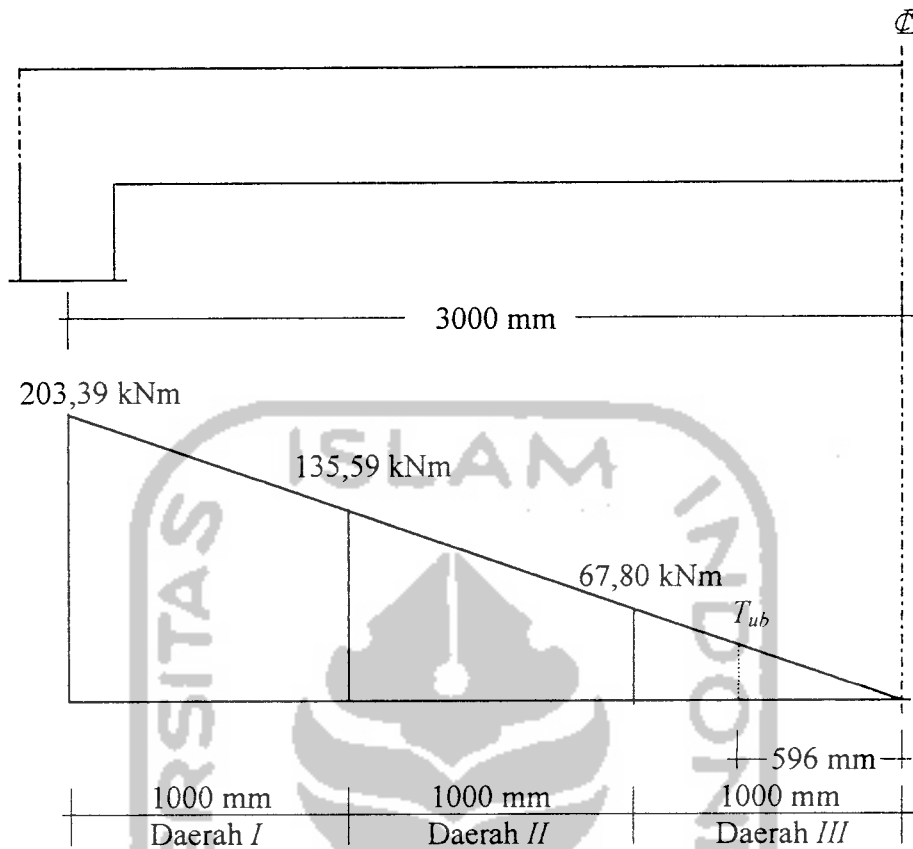
luas sengkang minimum perlu :

$$A_t + 2A_v = \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_y} \rightarrow \frac{1}{3} \frac{850 \cdot 55}{400} = 38,9583 \text{ mm}^2 < 226 \text{ mm}^2$$

Digunakan sengkang $\text{Ø}12 - 55$.

Pada kenyataannya, daerah pada balok tepi yang menahan momen torsi paling besar adalah daerah dekat tumpuan dan semakin ke tengah bentang besar momen torsi akan semakin berkurang. Apabila digunakan sengkang seperti pada hitungan sebelumnya untuk sepanjang balok tepi, akan menyebabkan pemborosan pada jumlah sengkangnya.

Agar lebih efisien, bentang balok tepi dibagi menjadi beberapa daerah penulangan sengkang.



Dengan cara yang sama seperti pada hitungan sebelumnya, diperoleh :

Daerah	T_u (kNm)	V_u (kN)	$\frac{A_t}{s}$	$\frac{A_v}{s}$	$\frac{A_{vt}}{s}$	Tulangan terpakai
I	203,39	118,05	1,6012	0,8430	4,0454	Ø12 – 55
II	135,59	118,05	0,9060	0,6983	2,5103	Ø12 – 90
III	67,80	118,05	0,2346	0,3076	0,7768	Ø12 – 210

D. Perencanaan tulangan torsi memanjang

$$A_l = 2 \frac{A_t}{s} (x_1 + y_1) = 2 \cdot 1,6012 (408 + 758) = 3734 \text{ mm}^2$$

atau :

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

karena $\frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_y} = 38,9583 \text{ mm}^2 < 2A_t = 2.1,6012.55 = 176,13 \text{ mm}^2$, maka :

$$A_t = \left[\frac{2,8.850.55}{400} \left(\frac{203,39.10^6}{203,39.10^6 + \frac{118,05.10^3}{3.0,0016}} \right) - 176,13 \right] \frac{(408 + 758)}{55}$$

$$= 2455,34 \text{ mm}^2 < 3734 \text{ mm}^2$$

Digunakan $A_t = 3734 \text{ mm}^2$ yang pemasangannya dikombinasikan dengan tulangan lentur. Luas tambahan $\frac{1}{4} A_t = 933,50 \text{ mm}^2$.

4.7.3 Desain tulangan lentur

Tulangan lentur direncanakan berdasarkan momen lentur yang bekerja pada balok tepi yang terdiri dari tulangan lentur pada bidang 1-2 dan tulangan lentur pada bidang 1-3.

Harga-harga yang dipakai :

- $\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$
- $\rho_b = \frac{0,85 f_c' \beta_1}{f_y} \frac{600}{600 + f_y}$, untuk $f_c' = 35 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,81$

$$= \frac{0,85.35.0,81}{400} \frac{600}{(600 + 400)} = 0,0361$$
- $\rho_{maks} = 0,75 \rho_b = 0,75.0,0361 = 0,0271$

$$\bullet \quad m = \frac{f_y}{0,85 f_c'} = \frac{400}{0,85 \cdot 35} = 13,4454$$

A. Tulangan lentur pada bidang 1-2

$$M_u^- \text{maks} = 165,06 \text{ kNm}$$

$$M_u^+ \text{maks} = 76,90 \text{ kNm}$$

$$b = 500 \text{ mm}, h = 850 \text{ mm}, d_s = 70 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 850 - 70 = 780 \text{ mm}$$

Tulangan momen negatif :

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{165,06}{0,8} = 206,3250 \text{ kNm}$$

$$R_n = \frac{M_u}{bd^2} = \frac{206,3250 \cdot 10^6}{500 \cdot 780^2} = 0,6783 \text{ MPa}$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right)$$

$$= \frac{1}{13,4454} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 13,4454 \cdot 0,6783}{400}} \right) = 0,0017 < \rho_{\text{min}}$$

$$A_y = \rho_{\text{min}} bd = 0,0035 \cdot 500 \cdot 780 = 1365 \text{ mm}^2$$

Kontrol kapasitas :

$$C = 0,85 f_c' ba = 0,85 \cdot 35 \cdot 500 \cdot a = 14875a$$

$$T = A_y f_y = 1365 \cdot 400 = 546000 \text{ N}$$

Keseimbangan gaya dalam $C = T$:

$$14875a = 546000 \rightarrow a = 36,7059 \text{ mm}$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 1365.400 \left(780 - \frac{36,7059}{2} \right) = 415,859 \text{ kNm} > \frac{M_u}{\phi} = 206,325 \text{ kNm}$$

luas tulangan total akibat tambahan luas tulangan torsi memanjang :

$$A_s = 1365 + 933,50 = 2298,50 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan 5Ø25.

Tulangan momen positif :

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{76,90}{0,8} = 96,1250 \text{ kNm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{bd^2} = \frac{96,1250 \cdot 10^6}{500 \cdot 780^2} = 0,3160 \text{ MPa}$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{f_y}} \right)$$

$$= \frac{1}{13,4454} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 13,4454 \cdot 0,3160}{400}} \right) = 0,0008 < \rho_{min}$$

$$A_s = \rho_{min} bd = 0,0035 \cdot 500 \cdot 780 = 1365 \text{ mm}^2$$

Karena nilai A_s dan kontrol kapasitas sama seperti pada penulangan momen negatif, maka digunakan diameter dan jumlah tulangan yang sama yaitu 5Ø25.

B. Tulangan lentur pada bidang 1-3

$$M_u^- maks = 360,56 \text{ kNm}$$

$$M_u^+ maks = 347,71 \text{ kNm}$$

$$b = 850 \text{ mm}, h = 500 \text{ mm}, d_s = 70 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 500 - 70 = 430 \text{ mm}$$

Tulangan momen negatif :

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{360,56}{0,8} = 450,70 \text{ kNm}$$

$$R_n = \frac{M_u}{bd^2} = \frac{450,70 \cdot 10^6}{850 \cdot 430^2} = 2,8677 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \rho_{perlu} &= \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{f_y}} \right) \\ &= \frac{1}{13,4454} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 13,4454 \cdot 2,8677}{400}} \right) = 0,0076 \end{aligned}$$

$$\rho_{\min} < \rho_{perlu} < \rho_{\max}$$

$$A_s = \rho_{perlu} b d = 0,0076 \cdot 850 \cdot 430 = 2777,80 \text{ mm}^2$$

Kontrol kapasitas :

$$C = 0,85 f_c' b a = 0,85 \cdot 35 \cdot 850 \cdot a = 25287,5a$$

$$T = A_s f_y = 2777,80 \cdot 400 = 1111120 \text{ N}$$

Keseimbangan gaya dalam $C = T$:

$$25287,5a = 1111120 \rightarrow a = 43,9395 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_n &= A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 2777,80 \cdot 400 \left(430 - \frac{43,9395}{2} \right) \end{aligned}$$

$$= 453,3706 \text{ kNm} > \frac{M_u}{\phi} = 450,70 \text{ kNm}$$

luas tulangan total akibat tambahan luas tulangan torsi memanjang :

$$A_s = 2777,80 + 933,50 = 3711,30 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan 8Ø25.

Tulangan momen positif :

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{347,71}{0,8} = 434,6375 \text{ kNm}$$

$$R_n = \frac{M_u}{bd^2} = \frac{434,6375 \cdot 10^6}{850 \cdot 430^2} = 2,7655 \text{ MPa}$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{f_y}} \right)$$

$$= \frac{1}{13,4454} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 13,4454 \cdot 2,7655}{400}} \right) = 0,0073$$

$$\rho_{min} < \rho_{perlu} < \rho_{maks}$$

$$A_s = \rho_{perlu} bd = 0,0073 \cdot 850 \cdot 430 = 2668,15 \text{ mm}^2$$

Kontrol kapasitas :

$$C = 0,85 f_c' ba = 0,85 \cdot 35 \cdot 850 \cdot a = 25287,5a$$

$$T = A_s f_y = 2668,15 \cdot 400 = 1067260 \text{ N}$$

Keseimbangan gaya dalam $C = T$:

$$25287,5a = 1067260 \rightarrow a = 42,2050 \text{ mm}$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 2668,15 \cdot 400 \left(430 - \frac{42,2050}{2} \right)$$

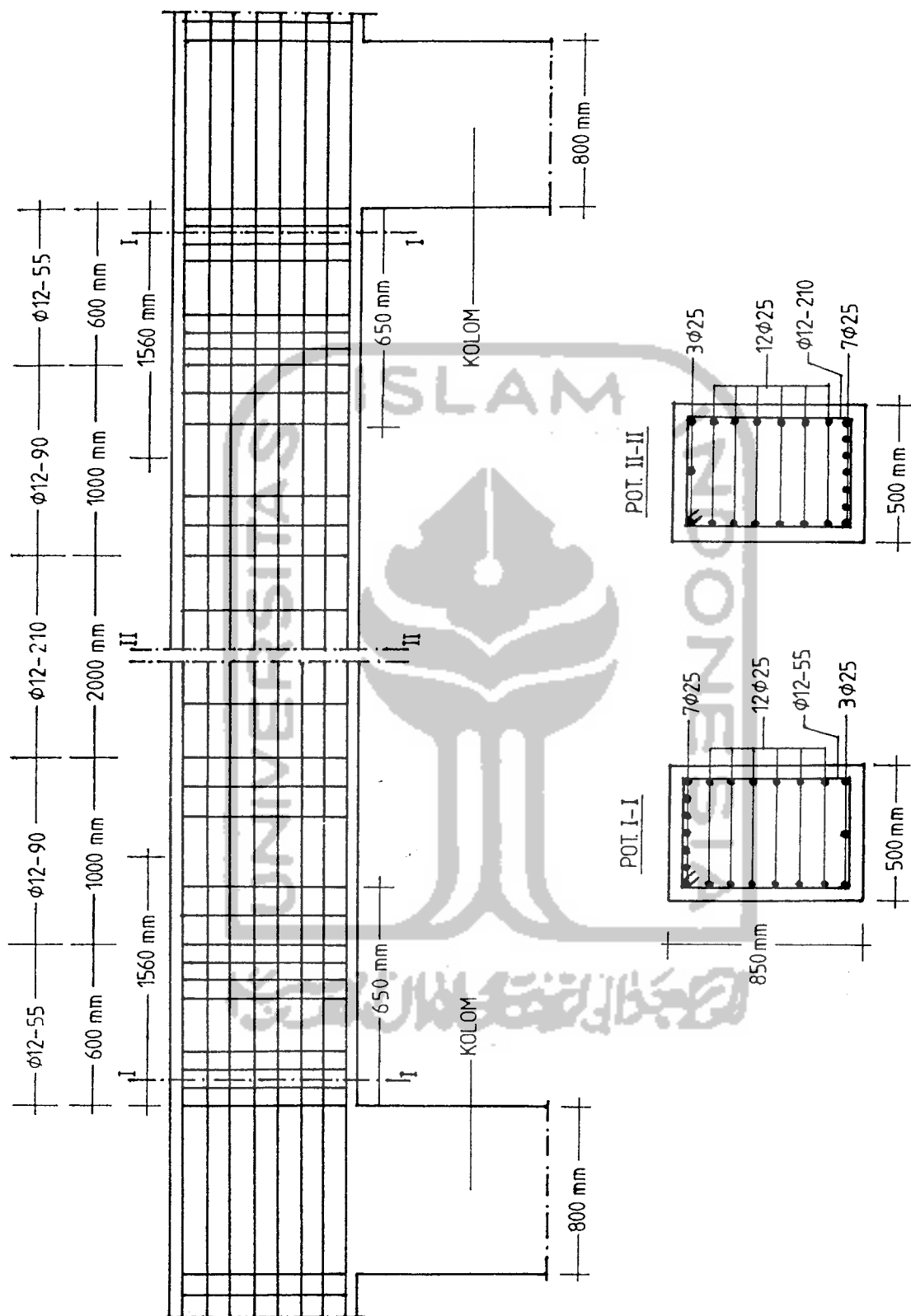
$$= 436,340 \text{ kNm} > \frac{M_u}{\phi} = 434,6375 \text{ kNm}$$

luas tulangan total akibat tambahan luas tulangan torsi memanjang :

$$A_s = 2668,15 + 933,50 = 3601,65 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan 8Ø25.





Gambar 4.10 Penulangan balok tepi