keamanan yang cukup dan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami kerusakan **(Edward G. Nawy, 1990)**

Balok dukungan sederhana yang diberi beban memiliki satu titik yang momennya maksimum. Makin besar beban yang diberikan, makin besar pula momennya. Jika beban makin besar, material akan terdeformasi semakin cepat dan defleksinya akan menjadi semakin besar **(Lynn S. Beedle, 1958)**

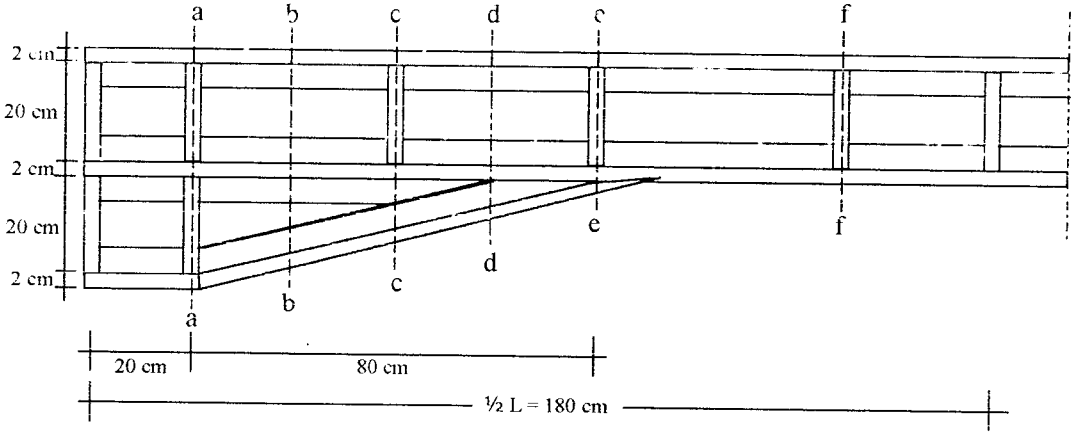
Dalam penelitian apabila data menunjukkan adanya kesalahan yang cukup besar, maka dilakukan Regresi Kuadrat Terkecil. Untuk itu dibuat kurva tunggal yang mempresentasikan trend secara umum dari data. Karena beberapa data mungkin kurang benar, maka kurva tidak dipaksakan untuk melewati setiap titik. Kurva dibuat mengikuti pola dari sekelompok titik. Bentuk yang paling sederhana dari Regresi Kuadrat Terkecil adalah apabila kurva yang mewakili titik percobaan merupakan garis lurus **(Bambang Triatmodjo, 1992)**

Lampiran 3

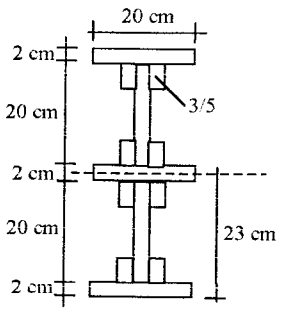
Perhitungan Lendutan dan Kelengkungan secara Teoritis

➢ Perhitungan Momen Inersia (I) untuk Masing-masing Penampang Potongan

Dalam perhitungan ini, balok dibagi menjadi pias-pias dengan nilai I yang berbeda-beda. Selain itu, karena balok simetris, maka I untuk masing-masing potongan hanya dihitung setengah bentang.



- **Potongan a-a**



$\bar{y}$ = 23 cm

Inersia :

$I_{sayap} = 3(1/12.20.2^3)+2(2.20)22^2+2(1.20)0.5^2=38770\ cm^4$

$I_{badan} = 2[1/12.2.20^3+(2.20)11^2]=12346{,}67\ cm^4$

$I_{reng} = 1/4[I_t+3.I_g]$ ⟶ $I_t = 8.I_y+8.F.e^2$

$= 1/4(840+3.2880)$ $= 8[(1/12.5.3^3)+(3.5)(\frac{2+3}{2})^2]$

$= 2370\ cm^4$ $= 840\ cm^4$

$I_g = 1/12.b'^3.h' = 1/12(4.b)^3(4.h)$

$= 1/12(4.3)^3(4.5)$

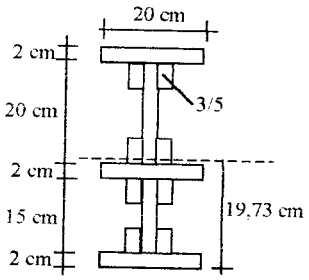
$= 2880\ cm^4$

maka $I_{total} = I_{sayap} + I_{badan} + I_{reng}$

$= 38770 + 12346{,}67 + 2370$

$= 53486{,}67\ cm^4$

- **Potongan b-b**



$$\overline{y} = \frac{(2.20)1+2(3.5)4{,}5+(15.2)9{,}5+2(3.5)14{,}5+(2.20)18+2(3.5)21{,}5+(20.2)29+2(3.5)36{,}5+(2.20)40}{4(2.20)+(2.15)+8(3.5)}$$

$\overline{y} = 19{,}73$ cm

Inersia :

$I_{sayap} = 3(1/12.20.2^3)+(2.20)18{,}73^2+(2.20)1{,}73^2+(2.20)20{,}27^2 = 30627{,}148\ cm^4$

$I_{badan} = 1/12.2.20^3+1/12.2.15^3+(2.19{,}27)9{,}635^2+(2.0{,}73)0{,}365^2+(2.15)10{,}23^2 = 8613{,}407\ cm^4$

$I_{reng} = 1/4[I_t+3.I_g]$ ⟶ $I_t = 8.I_y+8.F.e^2$

$= 1/4(840+3.2880)$ $= 8[(1/12.5.3^3)+(3.5)(\frac{2+3}{2})^2]$

$= 2370\ cm^4$ $= 840\ cm^4$

$I_g = 1/12.b'^3.h' = 1/12(4.b)^3(4.h)$

$= 1/12(4.3)^3(4.5)$

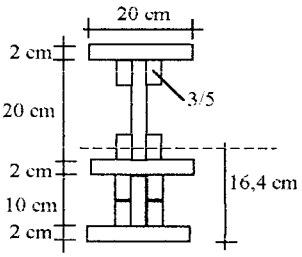
$= 2880\ cm^4$

maka I_{total} $= I_{sayap} + I_{badan} + I_{reng}$

$= 30627,148 + 8613,407 + 2370$

$= 41610,555\ cm^4$

- **Potongan c-c**



$$\overline{y} = \frac{(2.20)1+2(3.5)4,5+(10.2)7+2(3.5)9,5+(2.20)13+2(3.5)16,5+(20.2)24+2(3.5)31,5+(2.20)35}{4(2.20)+(2.10)+8(3.5)}$$

$\overline{y}$ = 16.4 cm

Inersia :

$I_{sayap} = 3(1/12.20.2^3)+(2.20)15,4^2+(2.20)3,4^2+(2.20)18,6^2=23827,2\ cm^4$

$I_{badan} = 1/12.2.20^3+1/12.2.10^3+(2.17,6)8,8^2+(2.2,4)1.2^2+(2.10)9,4^2=6000\ cm^4$

$I_{reng} = 1/4[I_t+3.I_g]$ ⟶ $I_t = 8.I_y+8.F.e^2$

$= 1/4(840+3.2880)$ $= 8[(1/12.5.3^3)+(3.5)(\frac{2+3}{2})^2]$

$= 2370\ cm^4$ $= 840\ cm^4$

$I_g = 1/12.b'^3.h' = 1/12(4.b)^3(4.h)$

$= 1/12(4.3)^3(4.5)$

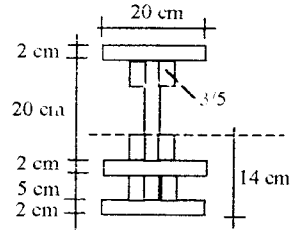
$= 2880\ cm^4$

maka I_{total} $= I_{sayap} + I_{badan} + I_{reng}$

$= 23827,2 + 6000 + 2370$

$= 32197,2\ cm^4$

- **Potongan d-d**



$$\bar{y} = \frac{(2.20)1+2(3.5)4,5+(5.2)4,5+(2.20)8+2(3.5)11,5+(20.2)19+2(3.5)26,5+(2.20)30}{4(2.20)+(2.5)+6(3.5)}$$

$\bar{y}$ = 14 cm

Inersia :

$I_{sayap} = 3(1/12.20.2^3)+(2.20)13^2+(2.20)6^2+(2.20)16^2=18480\ cm^4$

$I_{badan} = 1/12.2.20^3+1/12.2.5^3+(2.15)7,5^2+(2.5)2,5^2+(2.5)9,5^2=4006,67\ cm^4$

$I_{reng} = 1/4[I_t+3.I_g]$ ⟶ $I_t = 8.I_y+8.F.e^2$

$= 1/4(840+3.2880)$ $= 8[(1/12.5.3^3)+(3.5)(\frac{2+3}{2})^2]$

$= 2370\ cm^4$ $= 840\ cm^4$

$I_g = 1/12.b'^3.h' = 1/12(4.b)^3(4.h)$

$= 1/12(4.3)^3(4.5)$

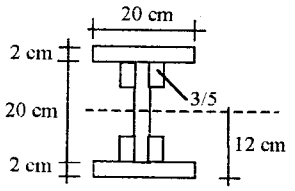
$= 2880\ cm^4$

maka $I_{total} = I_{sayap} + I_{badan} + I_{reng}$

$= 18480 + 4006,67 + 2370$

$= 24856,67\ cm^4$

- **Potongan e-e = f-f**



$\bar{y}$ = 12 cm

Inersia :

$I_{sayap} = 2[(1/12.20.2^3)+(2.20)11^2]=9706.67\ cm^4$

$I_{badan} = 1/12.2.20^3=1333,33\ cm^4$

$I_{reng} = 1/4[I_t+3.I_g]$ ⟶ $I_t = 4.I_y+4.F.e^2$

$= 1/4(420+3.180)$ $= 4[(1/12.5.3^3)+(3.5)(\frac{2+3}{2})^2$

$= 240\ cm^4$ $= 420\ cm^4$

$I_g = 1/12.b'^3.h' = 1/12(2.b)^3(2.h)$

$= 1/12(2.3)^3(2.5)$

$= 180\ cm^4$

maka $I_{total} = I_{sayap} + I_{badan} + I_{reng}$

$= 9706{,}67 + 1333{,}33 + 240$

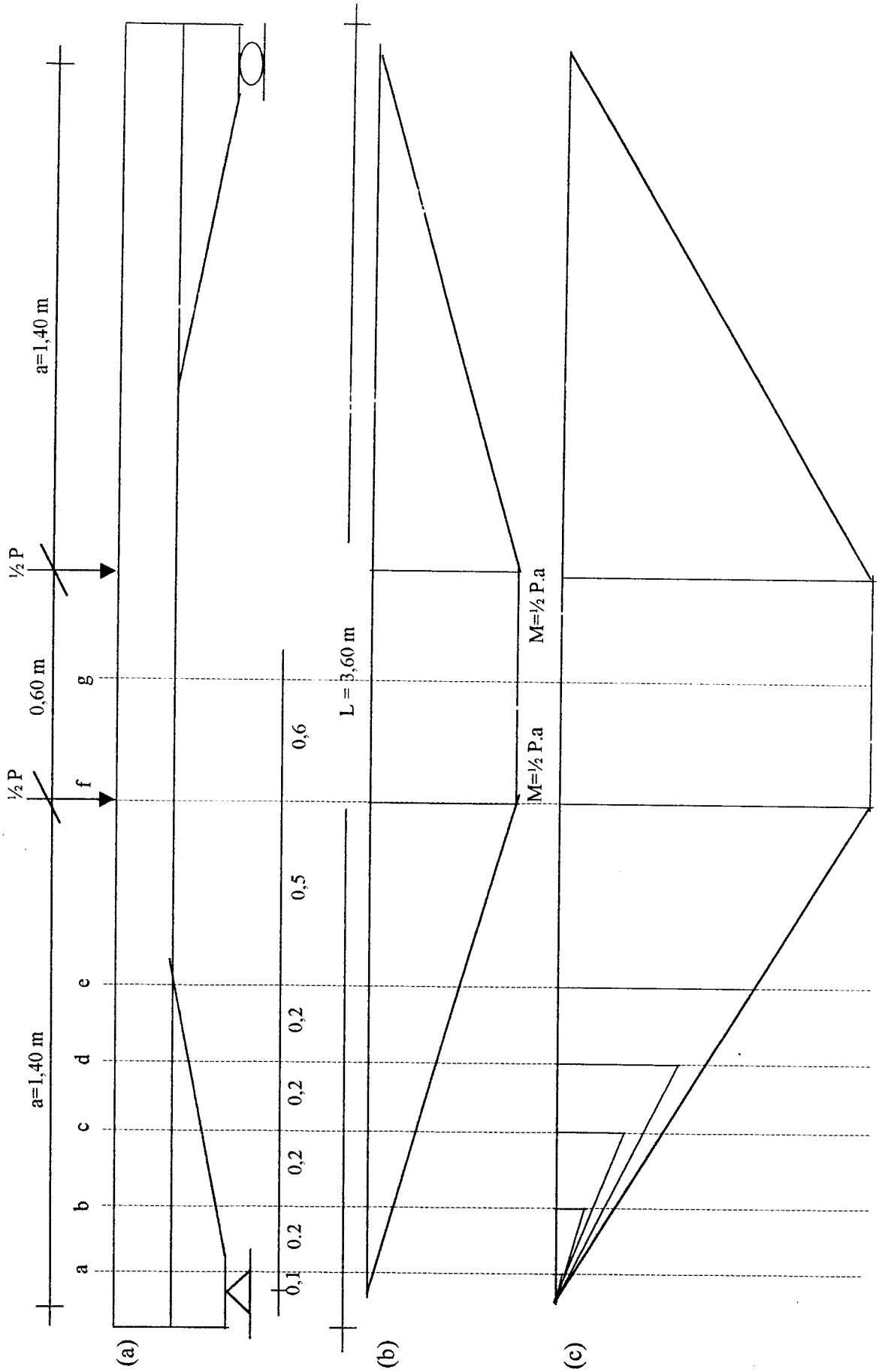
$= 11280\ cm^4$

➢ **Perhitungan diagram momen**

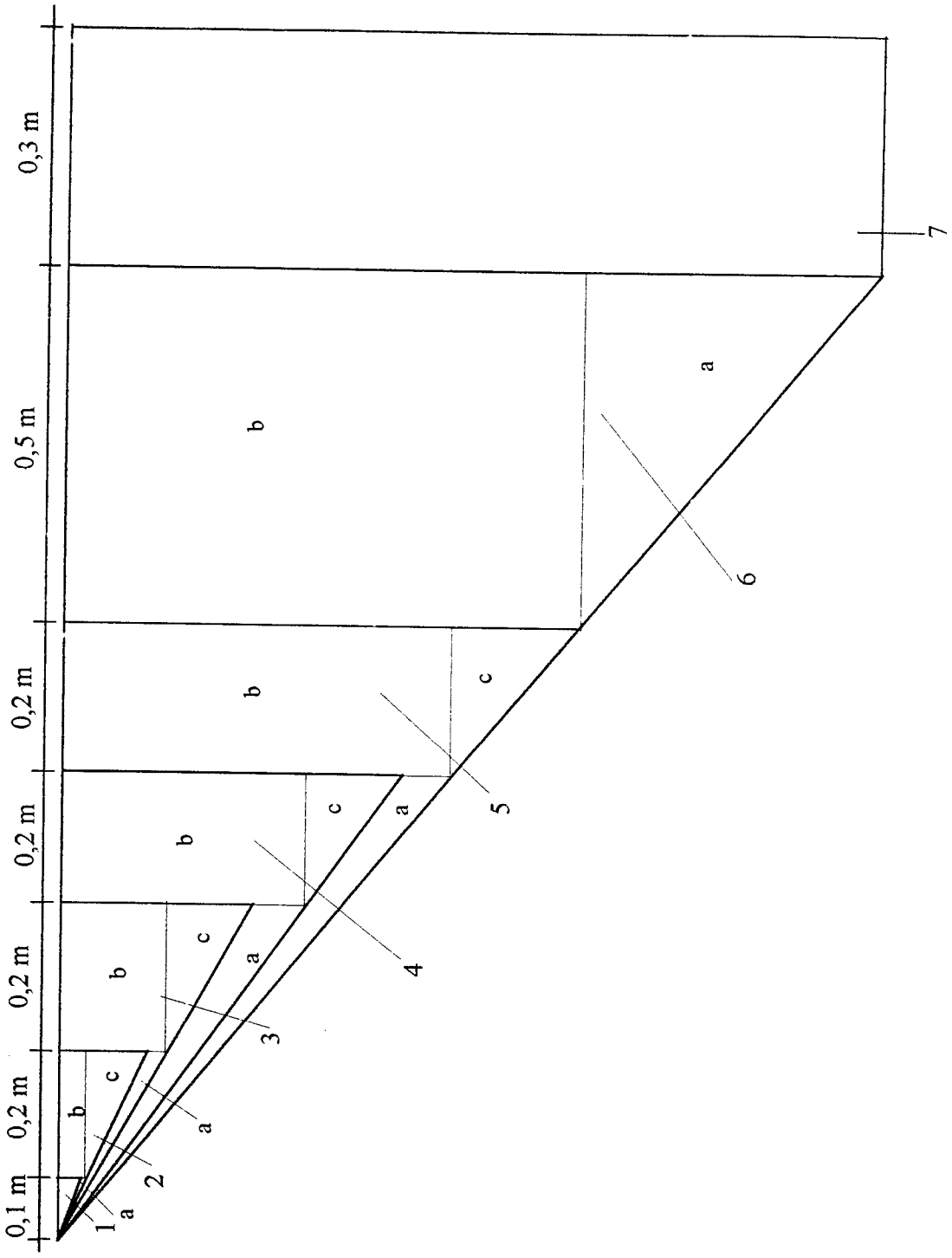
Besar momen untuk balok papan non-prismatis ini dihitung dengan nilai a=1,40 m untuk berbagai nilai P dengan interval 4 KN. Kemudian dibuat diagram momennya seperti pada Gambar (b). Setelah itu, dengan nilai I untuk tiap potongan seperti telah dihitung di atas, dan nilai $E=0{,}6254.10^7\ KN/m^2$, maka dibuat diagram M/EI seperti pada Gambar (c).

➢ **Perhitungan Kelengkungan dan Lendutan Balok**

Berdasar Gambar (c) kemudian dapat dihitung kelengkungan dan lendutan balok, yaitu di tengah bentang. Perhitungan ini dilakukan dengan metode luas momen (*Moment Area Method*), yang perhitungan dan hasilnya disajikan pada tabel-tabel di bawah ini.


a=1,40 m
½ P
0,60 m
½ P
a=1,40 m
a
b
c
d
e
f
g
0,1
0,2
0,2
0,2
0,2
0,5
0,6
(a)
L = 3,60 m
M=½ P.a
M=½ P.a
(b)
(c)

● Gambar luas momen tiap pias untuk balok ½ bentang



◐ Tabel perhitungan secara teoritis untuk P=4 KN

Titik	Momen (M) KN.m	Momen Inersia (I) 10^{-4} m^4	EI 10^4 KN.m^2	Kelengkungan (ϕ=M/EI) 10^{-4}/m	Pias	Luas pias (Φ) 10^{-4}	Jarak (x) m	Lendutan (Δ=Φ.x) 10^{-4} m
a	0.2	5.349	0.335	1.1957	1	0.0598	1.633	0.0977
b	0.6	4.161	0.260	4.6113	2.a	0.0171	1.633	0.0279
					b	0.3074	1.500	0.4611
					c	0.3074	1.467	0.4509
c	1.0	3.220	0.201	9.9315	3.a	0.2021	1.500	0.3032
					b	1.1918	1.300	1.5493
					c	0.3973	1.267	0.5032
d	1.4	2.486	0.155	18.0094	4.a	0.7331	1.367	1.0019
					b	2.5728	1.100	2.8301
					c	0.5146	1.067	0.5489
e	1.8	1.128	0.071	51.0312	5.a	7.5885	1.233	9.3592
					b	7.9382	0.900	7.1444
					c	1.1340	0.867	0.9828
f	2.8	1.128	0.071	79.3818	6.a	7.0877	0.467	3.3076
					b	25.5156	0.550	14.0336
g	2.8	1.128	0.071	79.3818	7	23.8145	0.150	3.5722
Kelengkungan (ϕ) 10^{-4}/m				243.5428	Lendutan (Δ) 10^{-4} m			92.3474

◐ Tabel perhitungan secara teoritis untuk P=8 KN

Titik	Momen (M) KN.m	Momen Inersia (I) 10^{-4} m^4	EI 10^4 KN.m^2	Kelengkungan (ϕ=M/EI) 10^{-4}/m	Pias	Luas pias (Φ) 10^{-4}	Jarak (x) m	Lendutan (Δ=Φ.x) 10^{-4} m
a	0.4	5.349	0.335	2.3914	1	0.1196	1.633	0.1953
b	1.2	4.161	0.260	9.2226	2.a	0.0341	1.633	0.0558
					b	0.6148	1.500	0.9223
					c	0.6148	1.467	0.9018
c	2.0	3.220	0.201	19.8631	3.a	0.4043	1.500	0.6064
					b	2.3836	1.300	3.0987
					c	0.7945	1.267	1.0064
d	2.8	2.486	0.155	36.0188	4.a	1.4662	1.367	2.0037
					b	5.1455	1.100	5.6601
					c	1.0291	1.067	1.0977
e	3.6	1.128	0.071	102.0623	5.a	15.1771	1.233	18.7184
					b	15.8764	0.900	14.2887
					c	2.2681	0.867	1.9656
f	5.6	1.128	0.071	158.7636	6.a	14.1753	0.467	6.6152
					b	51.0312	0.550	28.0671
g	5.6	1.128	0.071	158.7636	7	47.6291	0.150	7.1444
Kelengkungan (ϕ) 10^{-4}/m				289.8966	Lendutan (Δ) 10^{-4} m			184.6950

◐ Tabel perhitungan secara teoritis untuk P=12 KN

Titik	Momen (M) KN.m	Momen Inersia (I) 10^{-4} m^4	EI 10^4 KN.m^2	Kelengkungan (ϕ=M/EI) 10^{-4}/m	Pias	Luas pias (Φ) 10^{-4}	Jarak (x) m	Lendutan (Δ=Φ.x) 10^{-4} m
a	0.6	5.349	0.335	3.5872	1	0.1794	1.633	0.2930
b	1.8	4.161	0.260	13.8340	2.a	0.0512	1.633	0.0836
					b	0.9223	1.500	1.3834
					c	0.9223	1.467	1.3527
c	3.0	3.220	0.201	29.7946	3.a	0.6064	1.500	0.9096
					b	3.5754	1.300	4.6480
					c	1.1918	1.267	1.5096
d	4.2	2.486	0.155	54.0282	4.a	2.1993	1.367	3.0056
					b	7.7183	1.100	8.4902
					c	1.5437	1.067	1.6466
e	5.4	1.128	0.071	153.0935	5.a	22.7656	1.233	28.0775
					b	23.8145	0.900	21.4331
					c	3.4021	0.867	2.9485
f	8.4	1.128	0.071	238.1455	6.a	21.2630	0.467	9.9227
					b	76.5468	0.550	42.1007
g	8.4	1.128	0.071	238.1455	7	71.4436	0.150	10.7165
Kelengkungan (ϕ) 10^{-4}/m				730.6283	Lendutan (Δ) 10^{-4} m			277.0426

◐ Tabel perhitungan secara teoritis untuk P=16 KN

Titik	Momen (M) KN.m	Momen Inersia (I) 10^{-4} m^4	EI 10^4 KN.m^2	Kelengkungan (ϕ=M/EI) 10^{-4}/m	Pias	Luas pias (Φ) 10^{-4}	Jarak (x) m	Lendutan (Δ=Φ.x) 10^{-4} m
a	0.8	5.349	0.335	4.7829	1	0.2391	1.633	0.3906
b	2.4	4.161	0.260	18.4453	2	0.0683	1.633	0.1115
						1.2297	1.500	1.8445
						1.2297	1.467	1.8035
c	4.0	3.220	0.201	39.7261	3	0.8086	1.500	1.2128
						4.7671	1.300	6.1973
						1.5890	1.267	2.0128
d	5.6	2.486	0.155	72.0376	4	2.9323	1.367	4.0075
						10.2911	1.100	11.3202
						2.0582	1.067	2.1954
e	7.2	1.128	0.071	204.1247	5	30.3541	1.233	37.4368
						31.7527	0.900	28.5775
						4.5361	0.867	3.9313
f	11.2	1.128	0.071	317.5273	6	28.3506	0.467	13.2303
						102.0624	0.550	56.1343
g	11.2	1.128	0.071	317.5273	7	95.2582	0.150	14.2887
Kelengkungan (ϕ) 10^{-4}/m				974.1711	Lendutan (Δ) 10^{-4} m			369.3902

✂ *Lampiran 4*

Tabel hasil uji sampel 1 (h/H=0,5)

P (KN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (KN.m)	ϕ (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
1.00	1.35	1.72	1.26	0.700	0.009
2.00	2.42	3.07	2.62	1.400	0.012
3.00	4.40	5.15	4.62	2.100	0.014
4.00	6.33	7.27	6.73	2.800	0.016
5.00	8.55	9.51	8.66	3.500	0.020
6.00	9.89	11.39	10.64	4.200	0.025
7.00	12.92	14.54	13.85	4.900	0.026
8.00	15.88	17.50	16.16	5.600	0.033
9.00	17.55	19.59	18.12	6.300	0.039
10.00	20.28	22.46	20.80	7.000	0.043
11.00	22.43	24.13	21.83	7.700	0.044
12.00	24.64	26.50	23.93	8.400	0.049
13.00	27.00	29.29	26.16	9.100	0.060
14.00	28.08	31.56	29.32	9.800	0.064
15.00	31.92	34.65	30.76	10.500	0.074
16.00	32.94	36.36	33.06	11.200	0.075
15.25	37.00	41.00	35.00	10.675	0.111
16.00	42.00	46.00	39.00	11.200	0.122
16.00	49.00	56.00	50.00	11.200	0.144
16.00	59.00	66.00	58.00	11.200	0.167

✂ *Lampiran 5*

Tabel hasil uji sampel 2 (h/H=0,5)

P (KN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (KN.m)	ϕ (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
1.00	1.45	1.94	1.57	0.700	0.010
2.00	2.74	3.14	2.50	1.400	0.012
3.00	4.56	5.40	4.86	2.100	0.015
4.00	6.97	7.51	6.33	2.800	0.019
5.00	8.33	9.26	8.20	3.500	0.022
6.00	10.98	11.27	9.52	4.200	0.023
7.00	12.90	13.75	12.53	4.900	0.023
8.00	16.28	17.37	15.86	5.600	0.029
9.00	17.98	19.50	17.75	6.300	0.036
10.00	20.22	21.90	19.98	7.000	0.040
11.00	23.93	24.99	22.31	7.700	0.042
12.00	24.68	26.19	23.08	8.400	0.051
13.00	28.32	30.77	27.86	9.100	0.060
14.00	30.34	32.92	29.61	9.800	0.065
15.00	31.94	34.82	31.27	10.500	0.071
13.94	35.00	39.00	34.00	9.758	0.100
14.75	38.00	42.00	36.00	10.325	0.111
15.00	44.00	48.00	41.00	10.500	0.122
15.00	49.00	53.00	45.00	10.500	0.133
15.00	58.00	63.00	54.00	10.500	0.156

✂ *Lampiran 6*

Tabel hasil uji sampel 3 (h/H=0,43)

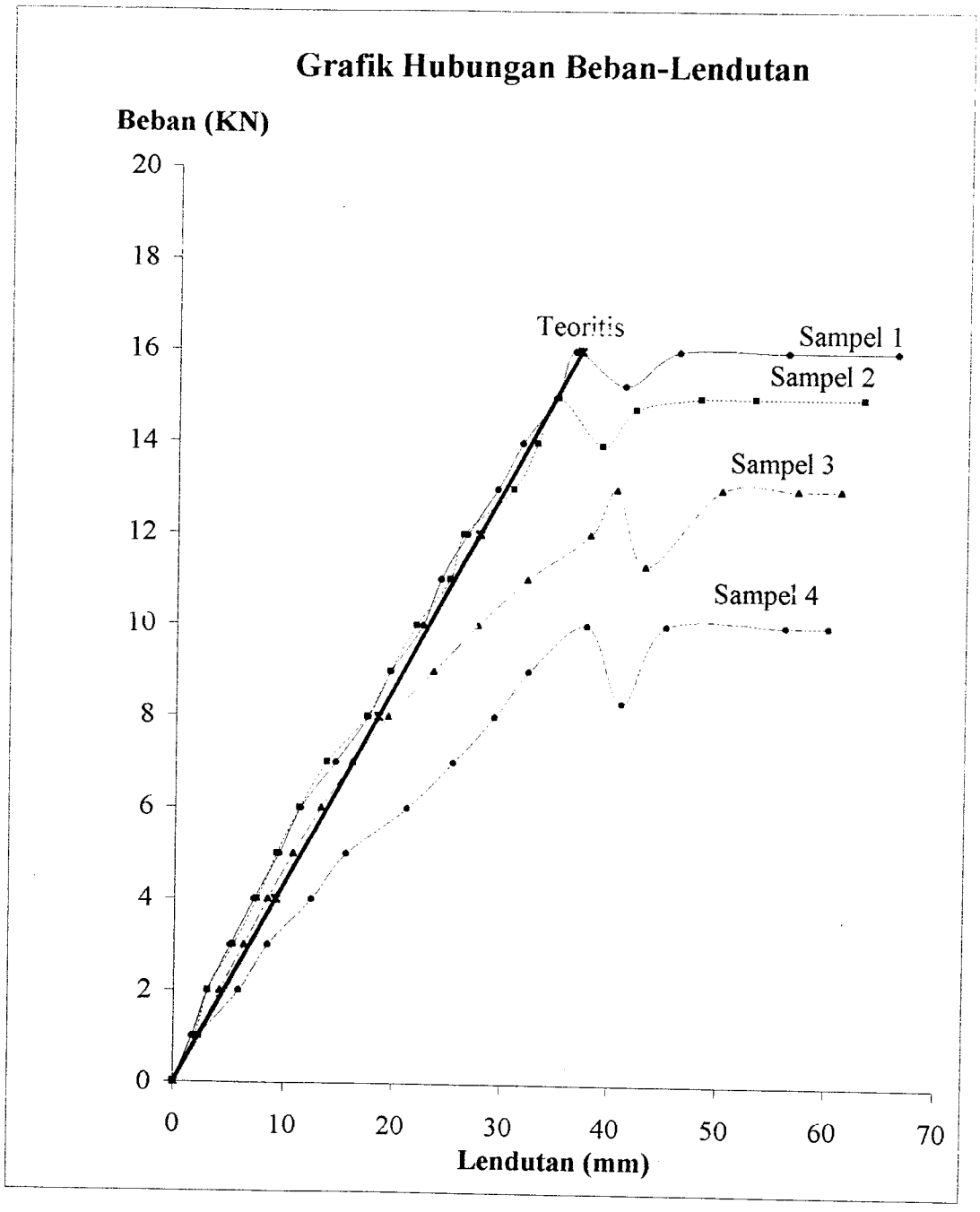
P (KN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (KN.m)	ϕ (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
1.00	1.93	2.29	1.67	0.700	0.011
2.00	3.10	4.20	3.82	1.400	0.016
3.00	5.41	6.38	5.12	2.100	0.025
4.00	7.15	8.49	7.23	2.800	0.029
5.00	9.28	10.78	9.55	3.500	0.030
6.00	11.62	13.27	12.01	4.200	0.032
7.00	14.05	16.07	14.55	4.900	0.039
8.00	17.25	19.34	17.69	5.600	0.042
9.00	20.85	23.52	21.82	6.300	0.049
10.00	24.97	27.58	25.32	7.000	0.054
11.00	29.55	32.16	29.54	7.700	0.058
12.00	35.67	37.97	34.82	8.400	0.061
13.00	37.80	40.33	36.83	9.100	0.067
11.30	40.00	43.00	39.00	7.910	0.078
13.00	47.00	50.00	45.00	9.100	0.089
13.00	52.00	57.00	51.00	9.100	0.122
13.00	55.00	61.00	54.00	9.100	0.144

Lampiran 7

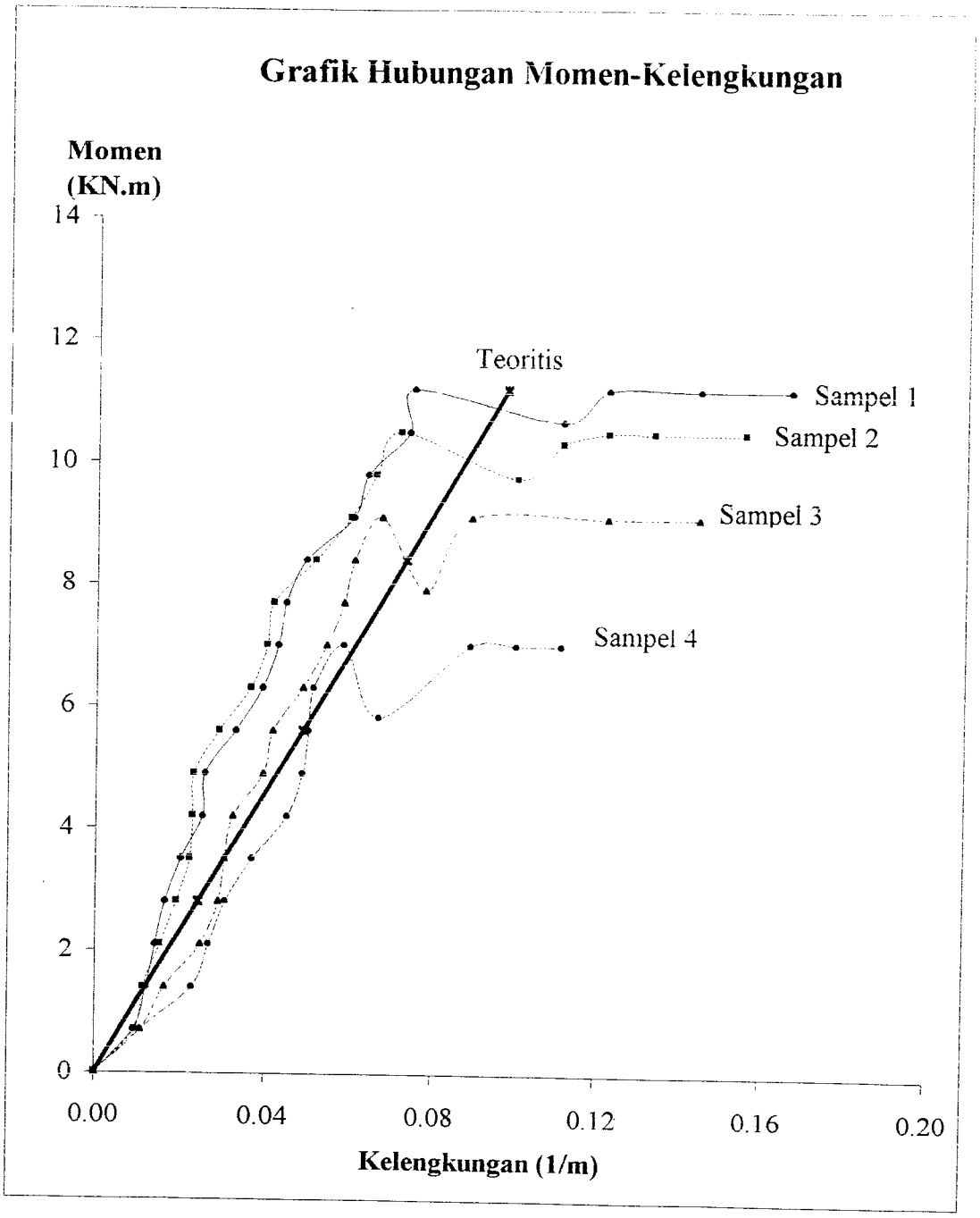
Tabel hasil uji sampel 4 (h/H=0,43)

P (KN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (KN.m)	ϕ (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
1.00	1.75	2.35	1.96	0.700	0.011
2.00	4.72	5.94	5.10	1.400	0.023
3.00	7.30	8.56	7.42	2.100	0.027
4.00	10.97	12.47	11.22	2.800	0.031
5.00	13.48	15.60	14.40	3.500	0.037
6.00	18.90	21.20	19.45	4.200	0.045
7.00	22.89	25.46	23.65	4.900	0.049
8.00	26.80	29.20	27.10	5.600	0.050
9.00	29.90	32.35	30.20	6.300	0.051
10.00	34.43	37.78	35.90	7.000	0.058
8.32	37.00	41.00	39.00	5.824	0.067
10.00	40.00	45.00	42.00	7.000	0.089
10.00	51.00	56.00	52.00	7.000	0.100
10.00	54.00	60.00	56.00	7.000	0.111

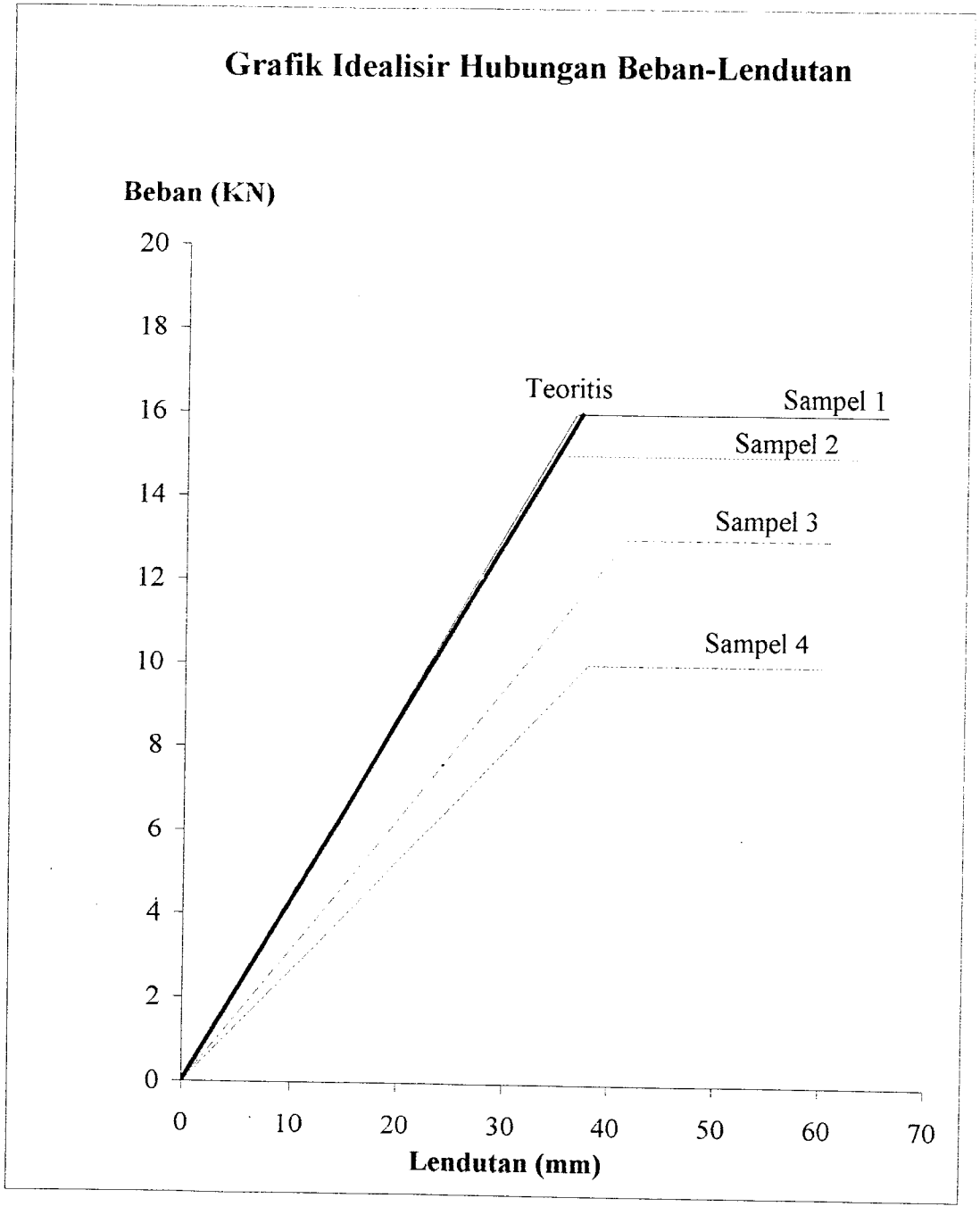
✂ *Lampiran 8*


Grafik Hubungan Beban-Lendutan
Beban (KN)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Teoritis
Sampel 1
Sampel 2
Sampel 3
Sampel 4
0
10
20
30
40
50
60
70
Lendutan (mm)

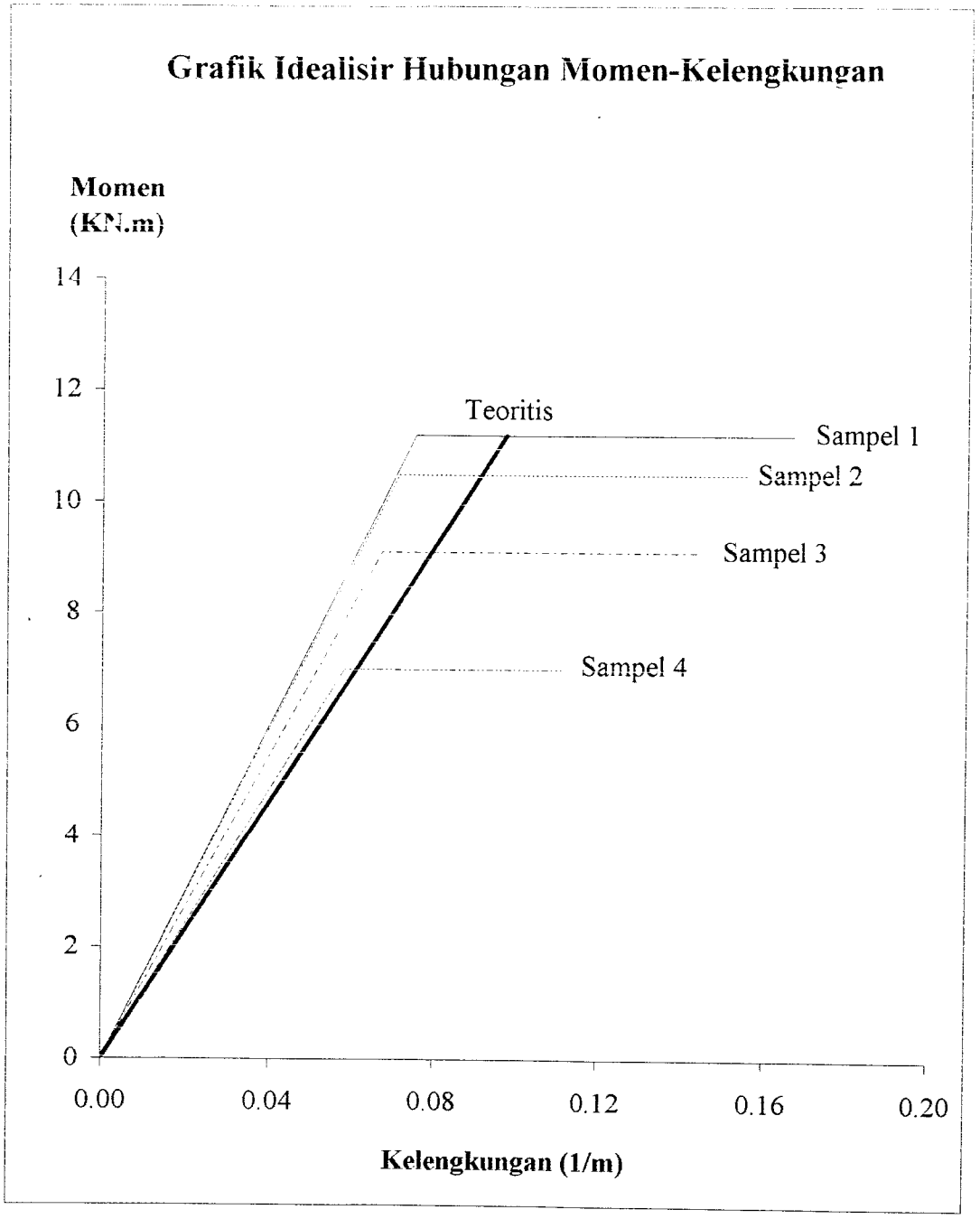
✂ *Lampiran 9*


Grafik Hubungan Momen-Kelengkungan
Momen (KN.m)
14
12
10
8
6
4
2
0
Teoritis
Sampel 1
Sampel 2
Sampel 3
Sampel 4
0.00
0.04
0.08
0.12
0.16
0.20
Kelengkungan (1/m)

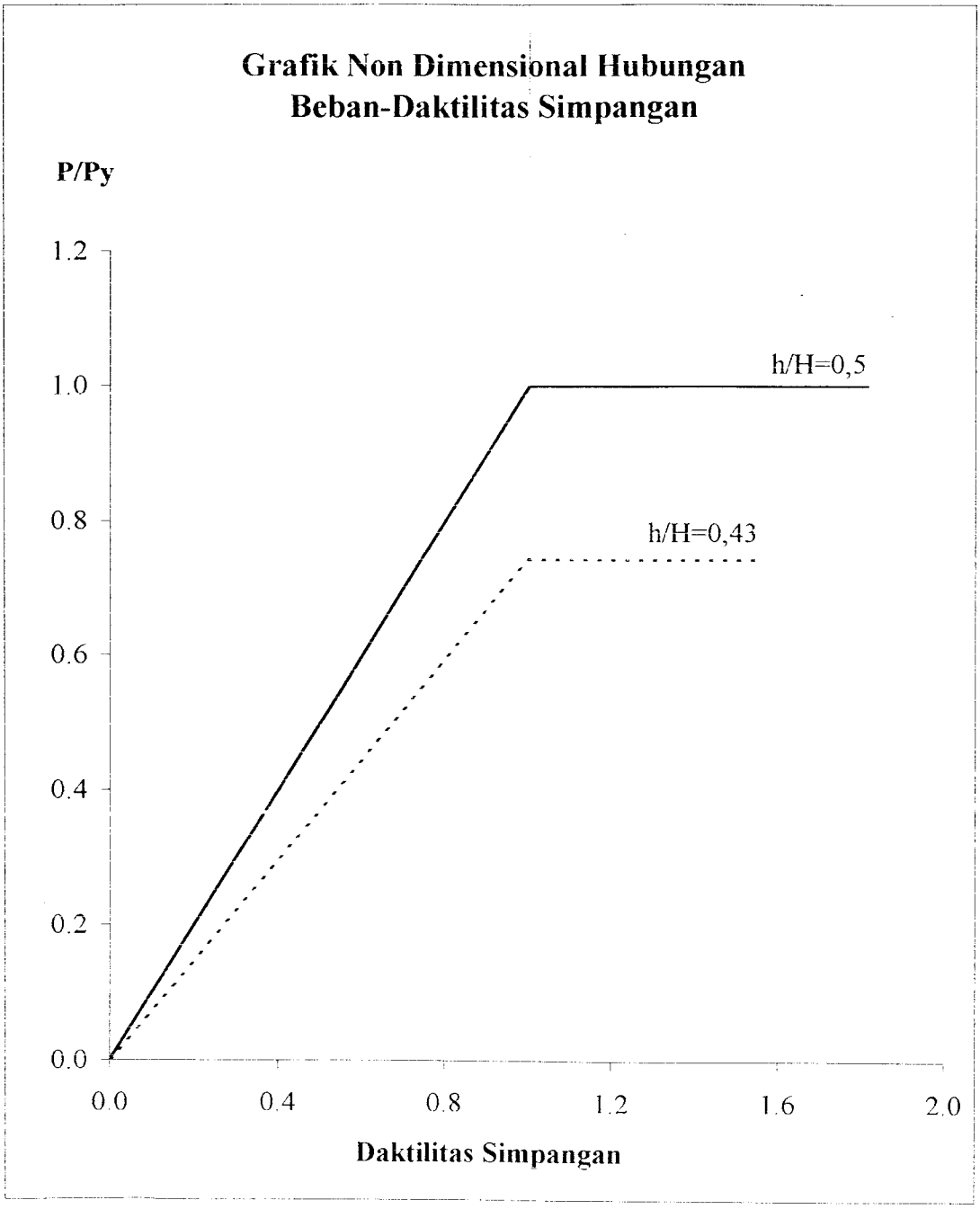
✂ *Lampiran 10*


Grafik Idealisir Hubungan Beban-Lendutan
Beban (KN)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Teoritis
Sampel 1
Sampel 2
Sampel 3
Sampel 4
0
10
20
30
40
50
60
70
Lendutan (mm)

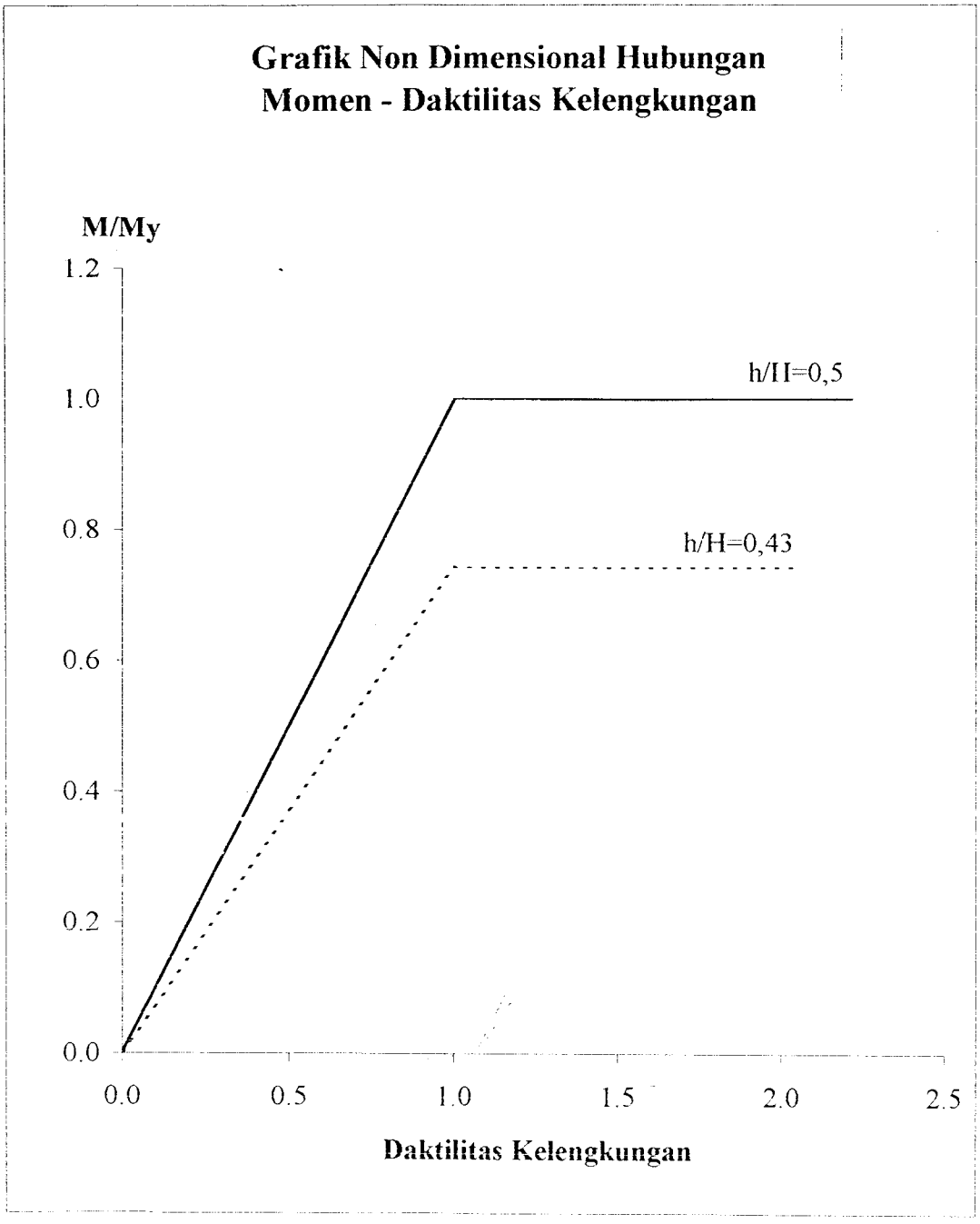
✂ *Lampiran 11*


Grafik Idealisir Hubungan Momen-Kelengkungan
Momen
(KN.m)
14
12
10
8
6
4
2
0
Teoritis
Sampel 1
Sampel 2
Sampel 3
Sampel 4
0.00
0.04
0.08
0.12
0.16
0.20
Kelengkungan (1/m)

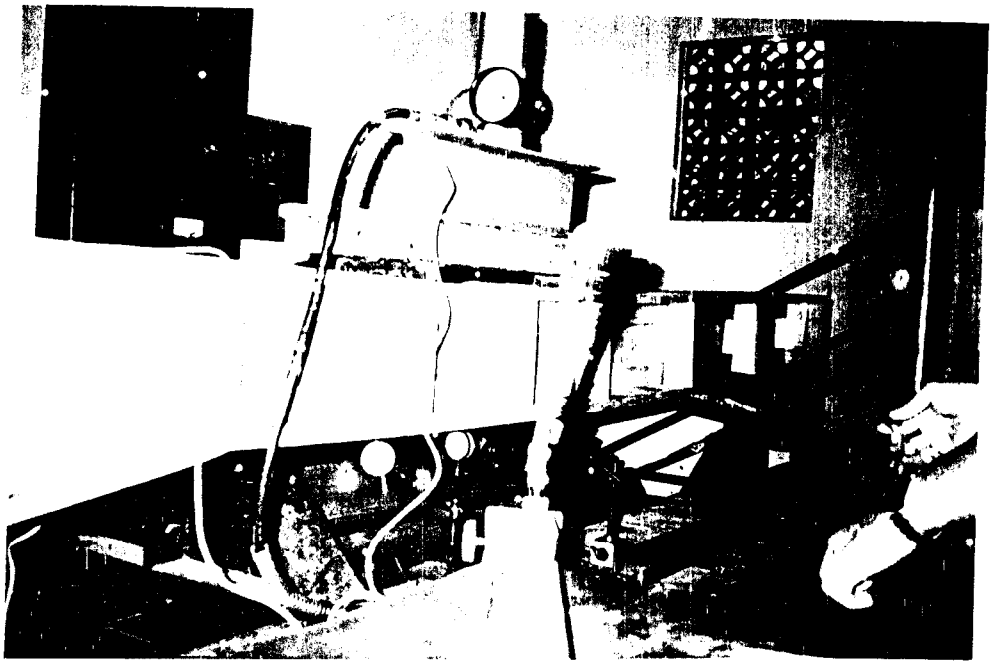
✂ *Lampiran 12*


Grafik Non Dimensional Hubungan
Beban-Daktilitas Simpangan
P/Py
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
h/H=0,5
h/H=0,43
0.0
0.4
0.8
1.2
1.6
2.0
Daktilitas Simpangan

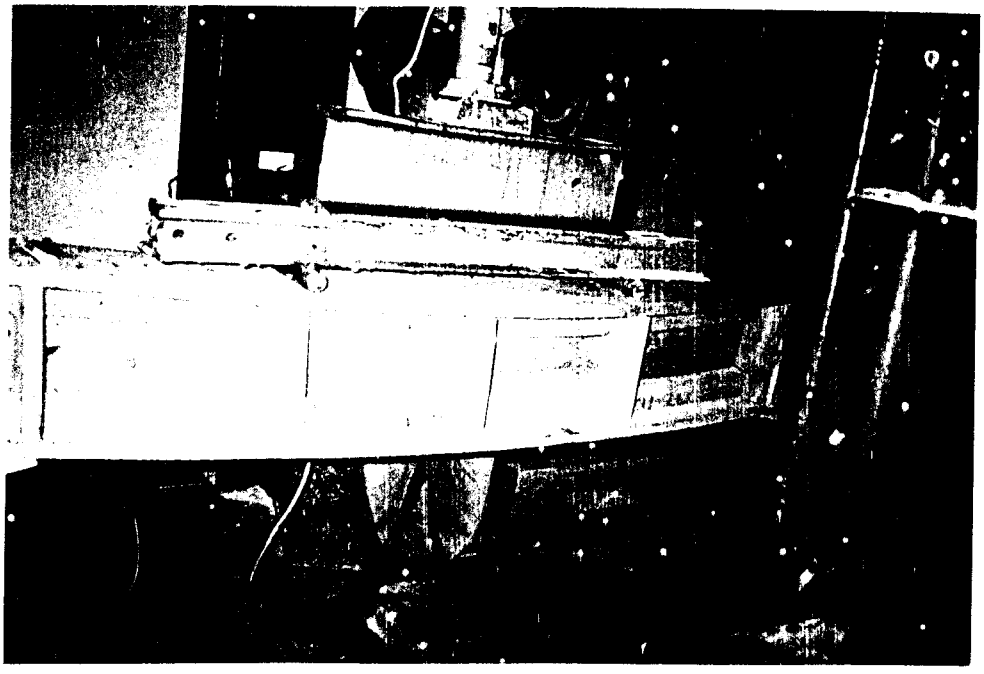
✂ *Lampiran 13*


Grafik Non Dimensional Hubungan
Momen - Daktilitas Kelengkungan
M/My
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
h/H=0,5
h/H=0,43
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
Daktilitas Kelengkungan

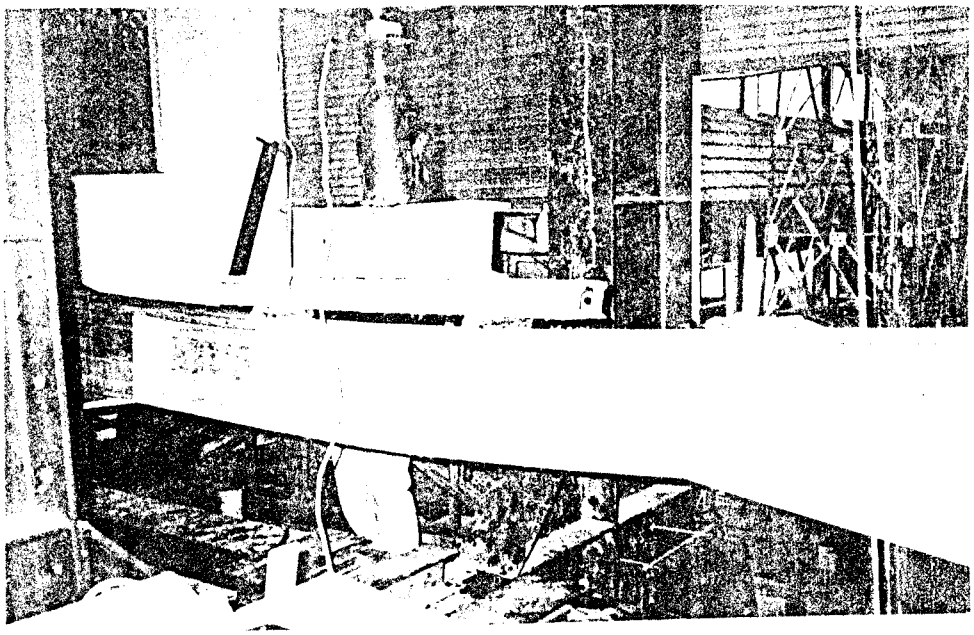
Lampiran 14



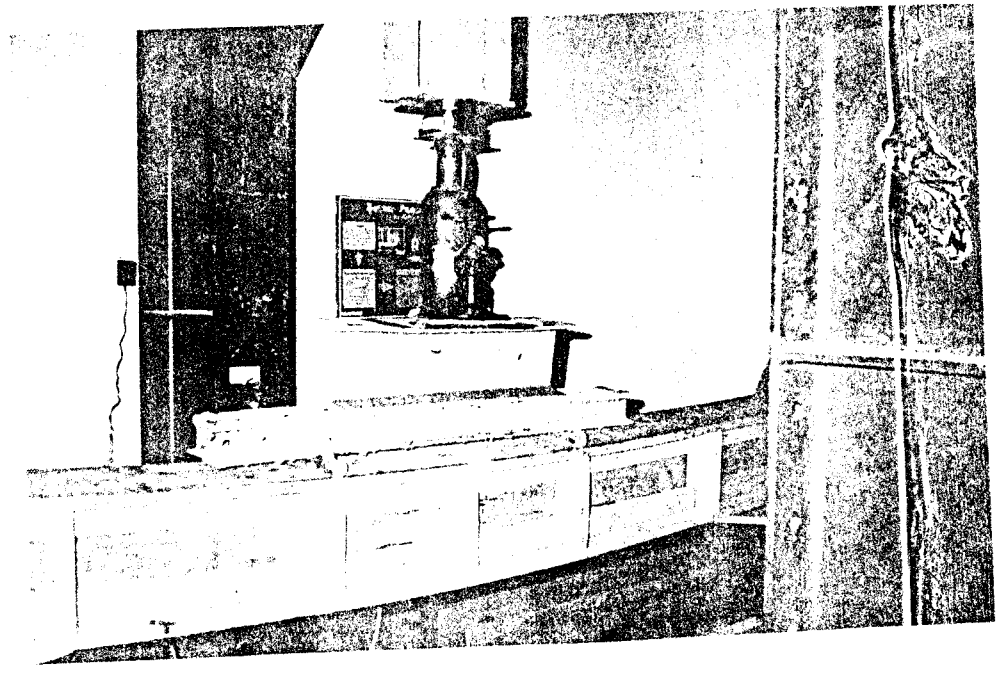
Gambar pengujian balok sampel 1



Gambar pengujian balok sampel 2



Gambar pengujian balok sampel 3



Gambar pengujian balok sampel 4