

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Agregat Halus

4.1.1 Pemeriksaan gradasi agregat halus

Tabel 4.1 Pemeriksaan gradasi agregat halus

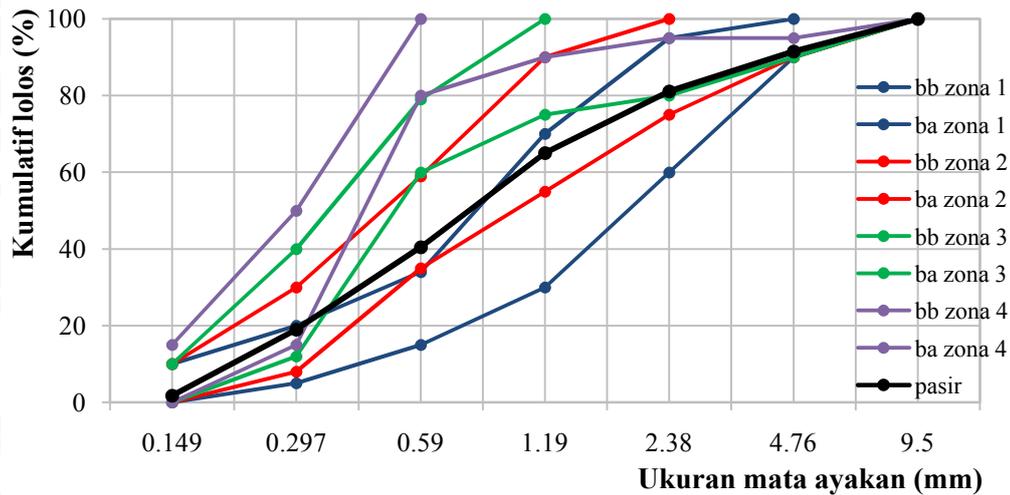
Lubang Saringan		Pasir			
		Tertinggal		Kumulatif	
No	mm	Gram	%	Tertinggal	Lolos
3"	76,6	0	0	0	0
2,5"	63,5	0	0	0	0
2"	50,8	0	0	0	0
1,5"	38,1	0	0	0	0
1"	25,4	0	0	0	0
3/4"	19,1	0	0	0	0
1/2"	12,7	0	0	0	0
3/8"	9,5	0	0	0	100
4	4,76	83,4	8,52	8,52	91,48
8	2,38	101,8	10,40	18,92	81,08
16	1,19	157,4	16,08	34,99	65,01
30	0,59	240,4	24,56	59,55	40,45
50	0,297	210	21,45	81,00	19,00
100	0,149	168,6	17,22	98,22	1,78
200	0,075	14,4	1,47	99,69	0,31
Pan		3	0,31	100,00	0
Σ		979	100		

Modulus kehalusan pasir:

$$\begin{aligned}
 FM_s &= \frac{\Sigma (\% \text{ kumulatif tertinggal ayakan no. } 3/8' \text{ sampai no. } 100)}{100} \\
 &= \frac{8,52 + 18,92 + 34,99 + 59,55 + 81,00 + 98,22}{100} \\
 &= 3,012
 \end{aligned}$$

Pemeriksaan gradasi agregat halus dimaksudkan untuk menentukan pembagian butiran pasir menurut persentase kelolosannya terhadap lubang ayakan dengan diameter tertentu. Dari hasil pemeriksaan yang dilakukan terhadap sampel agregat halus dapat digambarkan gradasi agregat halus sebagai berikut:





Gambar 4.1 Lengkung ayakan agregat halus

Jika dilihat pada **Gambar 4.1** maka agregat halus yang digunakan pada pembuatan benda uji termasuk ke dalam gradasi Zona 2. Dari perhitungan modulus kehalusan pasir didapatkan nilai sebesar 3,012. Hasil tersebut sesuai dengan yang disyaratkan yaitu antara 2,3-3,1.

4.1.2 Pemeriksaan kadar air agregat halus

Tabel 4.2 Pemeriksaan kadar air agregat halus

Nomor contoh	Satuan	A	B
1 Berat talam + contoh basah	(gr)	46,8	66,2
2 Berat talam + contoh kering	(gr)	46,6	66,1
3 Berat air = (1)-(2)	(gr)	0,2	0,1
4 Berat talam	(gr)	31,4	28,2
5 Berat contoh kering = (2)-(4)	(gr)	15,2	37,9
6 Kadar air = (3)/(5)	(%)	1,316	0,264
7 Kadar air rata-rata	(%)	0,790	

Kadar air agregat halus sampel A sebesar 1,316% dan sampel B sebesar 0,264% sehingga didapat kadar air agregat halus rata-rata sebesar 0,790%. Kadar air agregat halus memenuhi syarat untuk digunakan sebagai perencanaan campuran adalah kurang dari 5%. Jadi pasir yang diuji dapat digunakan dalam campuran beton.

4.1.3 Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat halus

Berat jenis pasir adalah perbandingan berat pasir dengan berat air yang mempunyai volume sama dengan pasir. Berat jenis dan penyerapan pasir dapat dihitung dengan langkah sebagai berikut (sampel A):

$$\begin{aligned}
 \text{Berat jenis curah} &= Bk : (B + B_{ssd} - Bt) \\
 (\text{Bulk Specific Gravity}) &= 996,6 : (1389,4 + 1000 - 1962,2) \\
 &= 2,33 \\
 \text{BJ curah jenuh kering permukaan} &= B_{ssd} : (B + B_{ssd} - Bt) \\
 (\text{Bulk Specific Gravity SSD}) &= 1000 : (1389,4 + 1000 - 1962,2) \\
 &= 2,34 \\
 \text{Berat jenis semu} &= Bk : (B + Bk - Bt) \\
 (\text{Apparent Specific Gravity}) &= 996,6 : (1389,4 + 996,6 - 1962,2) \\
 &= 2,35 \\
 \text{Penyerapan air} &= ((B_{ssd} - Bk) : Bk) \times 100 \% \\
 (\text{Arbsoption}) &= ((1000 - 996,6) : 996,6) \times 100 \% \\
 &= 0,341\%
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan sampel B dihitung seperti pada sampel A, sehingga dapat ditabelkan seperti pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4.3 Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan agregat halus

No	Berat SSD (gr)	Berat kering oven (gr)	Berat piknometer + air	Berat piknometer + air + pasir (gr)
	B_{ssd}	Bk	B	Bt
A	1000	996,6	1389,4	1962,2
B	1000	997,5	1389,4	1963,1
Pengujian	Sampel			Rata-rata
	A	B		
Berat jenis curah	2,33	2,34	2,33	
BJ SSD	2,34	2,35	2,34	
Berat jenis semu	2,35	2,35	2,35	
Penyerapan air	0,341%	0,251%	0,295%	

Dari pengujian berat jenis pada agregat halus didapat berat jenis SSD 2,34 maka agregat ini dapat diklasifikasikan sebagai agregat normal karena masih berada antara 2,2 hingga 2,7. Oleh karena itu agregat ini dapat digunakan untuk membuat beton normal. Untuk penyerapan air agregat sebesar 0,295 % menandakan bahwa kemampuan agregat dalam menyerap air dari keadaan kering mutlak hingga jenuh kering permukaan sebesar 0,295% dari berat agregat halus. Penyerapan air ini sesuai dengan yang disyaratkan, yaitu maksimum 3,1%.

4.1.4 Pemeriksaan berat isi agregat halus

Berat isi agregat halus adalah perbandingan antara berat agregat halus dengan volume air. Nilai berat isi didapat dengan mengambil nilai rata-rata dari pemeriksaan berat isi dengan cara *rodded* dan *shoveled*.

Tabel 4.4 Pemeriksaan berat isi agregat halus

No			<i>Rodded</i>		<i>Shovelled</i>	
1	Berat takaran	(gr)	1644,4		1644,4	
2	Berat takaran + air	(gr)	4766,2		4766,2	
3	Berat air = (2)-(1)	(gr)	3121,8		3121,8	
4	Volume air = (3)/(1)	(cc)	1,898		1,898	
			A	B	A	B
5	Berat takaran + benda uji	(gr)	6900	6890	6720	6718,5
6	Berat benda uji = (5)-(1)	(gr)	5255,6	5245,6	5075,6	5074,1
7	Berat isi pasir = (6)/(4)	(gr/cc)	2768,373	2763,106	2673,559	2672,769
8	Berat isi (tiap metode)	(gr/cc)	2765,739		2673,164	
9	Berat isi pasir rata-rata	(gr/cc)	2719,452			

Dari pengujian berat isi agregat halus didapat nilai berat isi untuk berat isi padat sebesar 2765,739 gr/cc dan berat isi lepas sebesar 2673,164 gr/cc . Sehingga didapatkan nilai berat isi pasir rata-rata adalah 2673,559 gr/cc.

4.2 Pengujian Agregat Kasar

4.2.1 Pemeriksaan gradasi agregat kasar

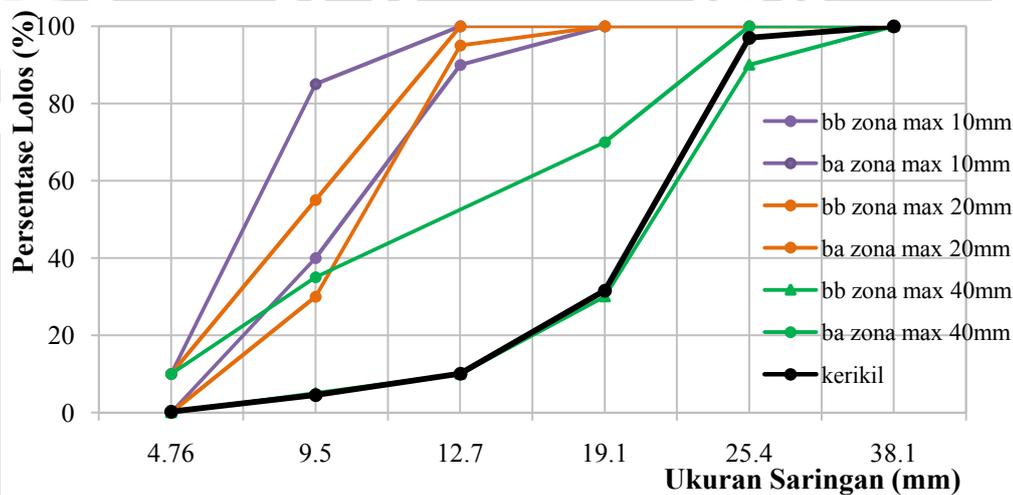
Tabel 4.5 Pemeriksaan gradasi agregat kasar

Lubang Saringan	Kerikil				
	Tertinggal		Kumulatif		
No	mm	gram	%	Tertinggal	Lolos
3"	76,6	0	0	0	100
2,5"	63,5	0	0	0	100
2"	50,8	0	0	0	100
1,5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	146,6	2,95	2,95	97,05
3/4"	19,1	3249,4	65,51	68,47	31,53
1/2"	12,7	1065,6	21,48	89,95	10,05
3/8"	9,5	274,8	5,54	95,49	4,51
4	4,76	212,8	4,29	99,78	0,22
8	2,38	0	0	0	0
16	1,19	0	0	0	0
30	0,59	0	0	0	0
50	0,297	0	0	0	0
100	0,149	0	0	0	0
200	0,075	0	0	0	0
Pan		10,8	0,22	100	0
Σ		979	100		

Modulus kehalusan kerikil:

$$\begin{aligned}
 FM_g &= \frac{\Sigma (\% \text{ kumulatif tertinggal ayakan } 3''+ 1,5''+ 3/4''+ 3/8'' \text{ sampai no.100}) + 600}{100} \\
 &= \frac{68,47 + 95,49 + 99,78 + 600}{100} \\
 &= 8,637
 \end{aligned}$$

Pemeriksaan gradasi agregat halus dimaksudkan untuk menentukan pembagian butiran pasir menurut persentase kelolosannya terhadap lubang ayakan dengan diameter tertentu. Dari hasil pemeriksaan yang dilakukan terhadap sampel agregat halus dapat digambarkan gradasi agregat halus sebagai berikut:



Gambar 4.2 Lengkung ayakan agregat kasar

Modulus kehalusan kerikil diperoleh dengan menjumlahkan persentase kumulatif tertinggal pada ayakan berdiameter 76,6mm, 38,1mm, 19,1mm, 9,5mm, 4,76mm. Kemudian ditambahkan dengan nilai 600 dan semuanya dibagi dengan 100. Angka 600 diperoleh dari ayakan yang tak terpakai dan ukurannya merupakan kelipatan setengah dari ayakan berdiameter 4,76mm yaitu 2,38mm, 1,19mm, 0,59mm, 0,297mm, 0,149mm, 0,0075mm. Modulus kehalusan kerikil adalah 2,637 hasil tersebut sesuai dengan yang disyaratkan yaitu antara 7,49-9,55 (ASTM C35-37). Jika dilihat pada grafik lengkung ayakan kerikil, maka agregat kasar yang digunakan pada pembuatan benda uji termasuk ke dalam gradasi Zona 3 dengan ukuran maksimum agregat kasar sebesar 40mm.

4.2.2 Pemeriksaan kadar air agregat kasar

Tabel 4.6 Pemeriksaan kadar air agregat kasar

	Nomor contoh	Satuan	A	B
1	Berat talam + contoh basah	(gr)	138,6	152
2	Berat talam + contoh kering	(gr)	138	151,2
3	Berat air = (1)-(2)	(gr)	0,6	0,8
4	Berat talam	(gr)	36,8	37
5	Berat contoh kering = (2)-(4)	(gr)	101,2	114,2
6	Kadar air = (3)/(5)	(%)	0,593	0,701
7	Kadar air rata-rata	(%)	0,647	

Kadar air agregat kasar sampel A sebesar 0,593% dan sampel B sebesar 0,701% sehingga didapat kadar air agregat kasar rata-rata sebesar 0,647%. Kadar air agregat kasar memenuhi syarat untuk digunakan sebagai perencanaan campuran adalah kurang dari 5%. Jadi kerikil yang diuji dapat digunakan dalam campuran beton.

4.2.3 Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat kasar

Berat jenis kerikil adalah perbandingan berat kerikil dengan berat air yang mempunyai volume sama dengan kerikil. Berat jenis dan penyerapan agregat kasar dapat dihitung dengan langkah sebagai berikut (sampel A):

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis curah} &= Bk : (Bssd - Ba) \\ (\text{Bulk Specific Gravity}) &= 4913 : (5000 - 3350) \\ &= 2,976 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{BJ curah jenuh kering permukaan} &= Bssd : (Bssd - Ba) \\ (\text{Bulk Specific Gravity SSD}) &= 5000 : (5000 - 3350) \\ &= 3,030 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu} &= Bk : (Bk - Ba) \\ (\text{Apparent Specific Gravity}) &= 4913 : (4913 - 3350) \\ &= 3,143 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan air} &= ((Bssd - Bk) : Bk) \times 100 \% \\ (\text{Arbsoption}) &= ((5000 - 4913) : 4913) \times 100 \% \\ &= 1,771\% \end{aligned}$$

Untuk perhitungan sampel B dihitung seperti pada sampel A, sehingga dapat ditabelkan seperti pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4.7 Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan agregat kasar

No	Berat <i>SSD</i>	Berat kering oven (gr)	Berat air + kerikil (gr)
	(gr) <i>B_{SSD}</i>	<i>B_k</i>	<i>B_a</i>
A	5000	4913	3350
B	5000	4928	3355

Pengujian	Sampel		Rata-rata
	A	B	
Berat jenis curah	2,976	2,996	2,987
BJ <i>SSD</i>	3,030	3,039	3,035
Berat jenis semu	3,143	3,133	3,138
Penyerapan air	1,771%	1,461%	1,616%

Dari pengujian berat jenis pada agregat kasar didapat berat jenis *SSD* 3,035. Untuk penyerapan air agregat kasar sebesar 1,616% menandakan bahwa kemampuan agregat dalam menyerap air dari keadaan kering mutlak hingga jenuh kering permukaan sebesar 1,616% dari berat agregat halus. Penyerapan air ini sesuai dengan yang disyaratkan, yaitu maksimum 1,63%.

4.2.4 Pemeriksaan berat isi agregat kasar

Berat isi agregat kasar adalah perbandingan antara berat agregat kasar dengan volume air. Nilai berat isi didapat dengan mengambil nilai rata-rata dari pemeriksaan berat isi dengan cara *rodded* dan *shoveled*.

Tabel 4.8 Pemeriksaan berat isi agregat kasar

No		<i>Rodded</i>	<i>Shoveled</i>		
1	Berat takaran (gr)	1644,4	1644,4		
2	Berat takaran + air (gr)	4766,2	4766,2		
3	Berat air = (2)-(1) (gr)	3121,8	3121,8		
4	Volume air = (3)/(1) (cc)	1,898	1,898		
		A	B	A	B
5	Berat takaran + benda uji (gr)	6520	6525	6490	6498
6	Berat benda uji = (5)-(1) (gr)	4875,6	4880,6	4845,6	4853,6
7	Berat isi agregat kasar = (6)/(4) (gr/cc)	2568,210	2570,843	2552,407	2556,21
8	Berat isi (tiap metode) (gr/cc)	2569,526		2554,514	
9	Berat isi kerikil rata-rata (gr/cc)	2562,020			

Dari pengujian berat isi agregat kasar didapat nilai berat isi untuk berat isi padat sebesar 2569,526 gr/cc dan berat isi lepas sebesar 2554,514 gr/cc . Sehingga didapatkan nilai berat isi kerikil rata-rata adalah 2562,020 gr/cc.

4.3 Pengujian Piropilit Sebagai Pengganti Agregat Halus

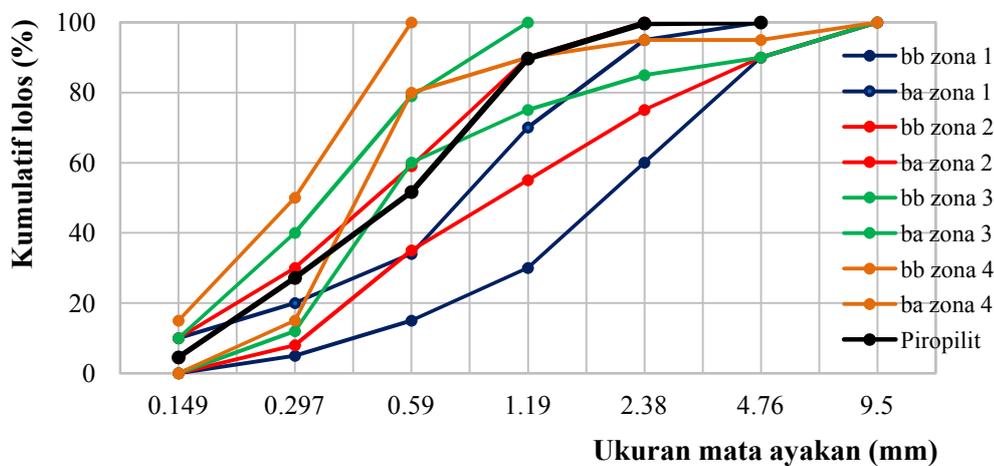
4.3.1 Pemeriksaan gradasi piropilit

Tabel 4.9 Pemeriksaan gradasi piropilit

Lubang Saringan		Piropilit			
		Tertinggal		Kumulatif	
No	mm	gram	%	Tertinggal	Lolos
3"	76,6	0	0	0	0
2,5"	63,5	0	0	0	0
2"	50,8	0	0	0	0
1,5"	38,1	0	0	0	0
1"	25,4	0	0	0	0
3/4"	19,1	0	0	0	0
1/2"	12,7	0	0	0	0
3/8"	9,5	0	0	0	0
4	4,76	0	0	0	100
8	2,38	3,4	0,31	0,31	99,69
16	1,19	40,6	3,67	3,98	96,02
30	0,59	370,6	33,50	37,47	62,53
50	0,297	190,8	17,25	54,72	45,28
100	0,149	351,2	31,74	86,46	13,54
200	0,075	142,8	12,91	99,37	0,63
Pan		7	0,63	100	0
Σ		1106,4	100		

Modulus kehalusan piropilit:

$$\begin{aligned}
 FM_p &= \frac{\Sigma (\% \text{ kumulatif tertinggal ayakan no. } 3/8'' \text{ sampai no. } 100)}{100} \\
 &= \frac{0,31 + 3,98 + 37,47 + 54,72 + 86,46}{100} \\
 &= 1,829
 \end{aligned}$$



Gambar 4.3 Lengkung ayakan piropilit

Jika dilihat pada grafik lengkung ayakan piropilit, maka piropilit yang digunakan pada pembuatan benda uji termasuk ke dalam gradasi Zona 3. Dari modulus kehalusan piropilit adalah 1,829.

4.3.2 Pemeriksaan kadar air piropilit

Tabel 4.10 Pemeriksaan kadar air piropilit

Nomor contoh	Satuan	A	B
1 Berat talam + contoh basah	(gr)	129,6	132,0
2 Berat talam + contoh kering	(gr)	129,0	131,2
3 Berat air = (1)-(2)	(gr)	0,6	0,8
4 Berat talam	(gr)	29,6	32,0
5 Berat contoh kering = (2)-(4)	(gr)	99,4	0,806
6 Kadar air = (3)/(5)	(%)	0,603	0,806
7 Kadar air rata-rata	(%)	0,705	

Kadar air piropilit sampel A sebesar 0,603% dan sampel B sebesar 0,806% sehingga didapat kadar air piropilit rata-rata sebesar 0,705%.

4.3.3 Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan piropilit

Berat jenis piropilit adalah perbandingan berat piropilit dengan berat air yang mempunyai volume sama dengan piropilit. Berat jenis dan penyerapan piropilit dapat dihitung dengan langkah sebagai berikut (sampel A):

$$\begin{aligned}
 \text{Berat jenis curah} &= Bk : (B + Bssd - Bt) \\
 (\text{Bulk Specific Gravity}) &= 497,4 : (1349,6 + 500 - 1649,8) \\
 &= 2,489 \\
 \text{BJ curah jenuh kering permukaan} &= Bssd : (B + Bssd - Bt) \\
 (\text{Bulk Specific Gravity SSD}) &= 500 : (1349,6 + 500 - 1649,8) \\
 &= 2,503 \\
 \text{Berat jenis semu} &= Bk : (B + Bk - Bt) \\
 (\text{Apparent Specific Gravity}) &= 497,4 : (1349,6 + 497,4 - 1649,8) \\
 &= 2,522 \\
 \text{Penyerapan air} &= ((Bssd - Bk) : Bk) \times 100 \% \\
 (\text{Arbsoption}) &= ((500 - 497,4) : 497,4) \times 100 \% \\
 &= 0,523\%
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan sampel B dihitung seperti pada sampel A, sehingga dapat ditabelkan seperti pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4.11 Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan piropilit

No	Berat <i>SSD</i> (gr)	Berat kering oven (gr)	Berat piknometer + air	Berat piknometer + air + piropilit (gr)
	<i>B_{ssd}</i>	<i>B_k</i>	<i>B</i>	<i>B_t</i>
A	500	497,4	1349,6	1649,8
B	500	497,6	1349,6	1648,0

Penguujian	Sampel		Rata-rata
	A	B	
Berat jenis curah BJ <i>SSD</i>	2,489	2,468	2,478
Berat jenis semu	2,522	2,498	2,510
Penyerapan air	0,523%	0,482%	0,503%

Dari pengujian berat jenis pada piropilit didapat berat jenis *SSD* 22,492. Untuk penyerapan air piropilit sebesar 0,503% menandakan bahwa kemampuan piropilit dalam menyerap air dari keadaan kering mutlak hingga jenuh kering permukaan sebesar 0,503% dari berat piropilit.

4.3.4 Pemeriksaan berat isi piropilit

Berat isi agregat halus adalah perbandingan antara berat agregat halus dengan volume air. Nilai berat isi didapat dengan mengambil nilai rata-rata dari pemeriksaan berat isi dengan cara *rodded* dan *shoveled*.

Tabel 4.12 Pemeriksaan berat isi piropilit

No		<i>Rodded</i>	<i>Shoveled</i>		
1	Berat takaran (gr)	1643,2	1643,2		
2	Berat takaran + air (gr)	4790,6	4790,6		
3	Berat air = (2)-(1) (gr)	3147,4	3147,4		
4	Volume air = (3)/(1) (cc)	1,915	1,915		
		A	B	A	B
5	Berat takaran + benda uji (gr)	6280	6260	5860	5900
6	Berat benda uji = (5)-(1) (gr)	4636,8	4616,8	4216,8	4256,8
7	Berat isi piropilit = (6)/(4) (gr/cc)	2420,789	2410,347	2201,514	2222,397
8	Berat isi piropilit rata-rata (tiap metode) (gr/cc)	2415,568		2211,956	
9	Berat isi piropilit rata-rata (gr/cc)	2313,762			

Dari pengujian berat isi piropilit didapat nilai berat isi untuk berat isi padat sebesar 2415,568 gr/cc dan berat isi lepas sebesar 2211,956 gr/cc . Sehingga didapatkan nilai berat isi pasir rata-rata adalah 2313,762 gr/cc.

4.4 Mix Design

Perencanaan campuran (*mix design*) beton normal dapat dilakukan dengan langkah seperti pada **Tabel 4.13**.

Tabel 4.13 Formulir perencanaan beton normal

No.	Uraian	Tabel/grafik	Nilai
1	Kuat tekan yang disyaratkan	Ditetapkan	22,5
2	Deviasi standar	Diketahui	7 Mpa
3	Nilai tambah (margin)	Ditetapkan	12 Mpa
4	Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan	(1) + (3)	34,5
5	Jenis semen	Ditetapkan	Normal (Tipe I)
6	Jenis agregat kasar	Ditetapkan	Batu pecah
6	Jenis agregat halus	Ditetapkan	Pasir
7	Faktor air semen bebas	Tabel 2, Grafik 1	0,53
8	Faktor air semen maksimum	Ditetapkan	0,6
9	Slump	Ditetapkan	60-180 mm
10	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan	40 mm
11	Kadar air bebas	TABEL 6	205 kg/m ³
12	Jumlah semen	(11) : (8)	386,792 kg/m ³
13	Jumlah semen maksimum	Ditetapkan	-
14	Jumlah semen minimum	Ditetapkan	275 kg/m ³
15	FAS yang disesuaikan	-	-
16	Susunan besar butir agregat halus	Grafik 3 - 6	Zona 2
17	Persentase agregat halus	Grafik 13 - 15	35,0%
18	Berat jenis relatif agregat	Diketahui	2,967 kg/m ³
19	Berat isi beton	Grafik 16	2540 kg/m ³
20	Kadar agregat gabungan	(19) - (11) - (12)	1948,208 kg/m ³
21	Kadar agregat halus	(17) * (20)	681,873 kg/m ³

Perhitungan kebutuhan untuk campuran uji tiap 1 m³ (teoritis):

- a. Semen = 386,972 kg
- b. Air = 205 kg
- c. Agregat halus = 681,335 kg
- d. Agregat kasar = 1266,335 kg

Perhitungan kebutuhan untuk campuran uji 0,05 m³ (teoritis):

- a. Semen = 0,05 x 386,972 = 19,340 kg
- b. Air = 0,05 x 205 = 10,250 kg
- c. Agregat halus = 0,05 x 681,335 = 34,094 kg
- d. Agregat kasar = 0,05 x 1266,335 = 63,317 kg

Perhitungan kebutuhan untuk campuran uji tiap 1 m³ (aktual):

$$\begin{aligned}
 \text{a. Air} &= B - \left(\frac{C_k - C_a}{100} \times C \right) - \left(\frac{D_k - D_a}{100} \times D \right) \\
 &= 205 - \left(\frac{(0,790 - 0,295)}{100} \times 681,873 \right) - \left(\frac{(0,647 - 1,616)}{100} \times 1266,335 \right) \\
 &= 213,896 \\
 \text{b. Agregat halus} &= C + \left(\frac{C_k - C_a}{100} \times C \right) \\
 &= 682,873 + \left(\frac{(0,790 - 0,295)}{100} \times 681,873 \right) \\
 &= 685,248 \\
 \text{c. Agregat kasar} &= D + \left(\frac{D_k - D_a}{100} \times D \right) \\
 &= 682,873 + \left(\frac{(0,647 - 1,616)}{100} \times 1266,335 \right) \\
 &= 1254,064
 \end{aligned}$$

dengan:

- B = Jumlah air (kg/m³)
- C = Jumlah agregat halus (kg/m³)
- D = Jumlah agregat kasar (kg/m³)
- C_a = Absorpsi air pada agregat halus (%)
- D_a = Absorpsi air pada agregat kasar (%)
- C_k = Kandungan air pada agregat halus (%)
- D_k = Kandungan air pada agregat kasar (%)

Kontrol campuran beton

- a. Sebelum koreksi = 386,792 + 205 + 681,873 + 1266,335 = 2540 kg/m³
- b. Setelah koreksi = 386,792 + 213,896 + 685,248 + 1254,064 = 2540 kg/m³

Dari perhitungan kebutuhan bahan campuran dalam pembuatan beton tersebut dapat disajikan seperti pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14 Kebutuhan bahan pembuatan beton

Banyaknya bahan	Semen (kg)	Air (kg)	Agregat halus (kg)	Agregat kasar (kg)
Tiap m ³ dengan ketelitian 5 kg (teoritis)	386,792	205	681,873	1266,335
Tiap campuran uji 0,05 m ³ (teoritis)	19,340	10,250	34,094	63,317

Tabel 4.14 Kebutuhan bahan pembuatan beton (lanjutan)

Banyaknya bahan	Semen (kg)	Air (kg)	Agregat halus (kg)	Agregat kasar (kg)
Tiap m ³ dengan ketelitian 5 kg (aktual)	386,792	213,896	685,248	1254,064
Tiap campuran uji 0,05 m ³ (aktual)	19,340	10,695	34,262	62,703
Proporsi (teoritis)	1	0,530	1,763	3,274
Proporsi (aktual)	1	0,553	2,004	3,667

Jadi dalam pembuatan benda uji digunakan perbandingan campuran dalam satuan berat sebagai berikut:

Semen : Pasir : Kerikil : Air
1 : 2,004 : 3,667 : 0,553

4.5 Analisis Kebutuhan Material Pembuatan Benda Uji

a. Pembuatan benda uji 1 silinder dengan angka keamanan 15%

$$\begin{aligned}
 \text{Volume silinder} &= \frac{1}{4} \pi d^2 t \\
 &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 15^2 \times 30 \\
 &= 5298,75 \text{ cm}^3 \\
 &= 0,0053 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Kebutuhan material tiap 1 silinder + 15% angka kemanan (115%)

$$\begin{aligned}
 \text{Semen} &= 115\% \times 0,0053 \times 386,792 = 2,357 \text{ kg} \\
 \text{Pasir} &= 115\% \times 0,0053 \times 685,248 = 4,177 \text{ kg} \\
 \text{Kerikil} &= 115\% \times 0,0053 \times 1254,064 = 7,644 \text{ kg} \\
 \text{Air} &= 115\% \times 0,0053 \times 213,896 = 1,304 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

b. Pembuatan benda uji 1 balok dengan angka keamanan 15%

$$\begin{aligned}
 \text{Volume balok} &= b \times h \times L \\
 &= 10 \times 15 \times 75 \\
 &= 11250 \text{ cm}^3 \\
 &= 0,01125 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Kebutuhan material tiap 1 silinder + 15% angka kemanan (115%)

$$\begin{aligned}
 \text{Semen} &= 115\% \times 0,01125 \times 386,792 = 5,004 \text{ kg} \\
 \text{Pasir} &= 115\% \times 0,01125 \times 685,248 = 8,865 \text{ kg} \\
 \text{Kerikil} &= 115\% \times 0,01125 \times 1254,064 = 16,224 \text{ kg} \\
 \text{Air} &= 115\% \times 0,01125 \times 213,896 = 2,767 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan kebutuhan material untuk tiap pembuatan benda uji berupa 1 silinder dan 1 buah balok dengan angka keamanan 15%, dapat ditentukan kebutuhan material untuk keseluruhan benda uji. Berdasar perhitungan tersebut dapat diketahui jumlah berat piropilit yang digunakan sebagai pengganti agregat halus untuk tiap variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Banyaknya kebutuhan material yang diperlukan untuk pembuatan benda uji disajikan pada **Tabel 4.15** sampai **Tabel 4.19**.

Tabel 4.15 Kebutuhan bahan pembuatan benda uji dengan 0% piropilit

Benda uji	Semen (kg)	Pasir (kg)	Piropilit (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)
1 silinder 15/30 cm	2,357	4,177	0	7,644	1,304
1 balok 10/15 x 75 cm	5,004	8,865	0	16,224	2,767
Total 3 silinder 15/30 cm	7,071	12,531	0	22,932	3,912
Total 3 balok 10/15 x 75 cm	15,012	26,595	0	48,672	8,301

Tabel 4.16 Kebutuhan bahan pembuatan benda uji dengan 5% piropilit

Benda uji	Semen (kg)	Pasir (kg)	Piropilit (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)
1 silinder 15/30 cm	2,357	3,968	0,209	7,644	1,304
1 balok 10/15 x 75 cm	5,004	8,422	0,443	16,224	2,767
Total 3 silinder 15/30 cm	7,071	11,904	0,627	22,932	3,912
Total 3 balok 10/15 x 75 cm	15,012	25,265	1,330	48,672	8,301

Tabel 4.17 Kebutuhan bahan pembuatan benda uji dengan 10% piropilit

Benda uji	Semen (kg)	Pasir (kg)	Piropilit (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)
1 silinder 15/30 cm	2,357	3,759	0,418	7,644	1,304
1 balok 10/15 x 75 cm	5,004	7,979	0,887	16,224	2,767
Total 3 silinder 15/30 cm	7,071	11,278	1,253	22,932	3,912
Total 3 balok 10/15 x 75 cm	15,012	23,936	2,660	48,672	8,301

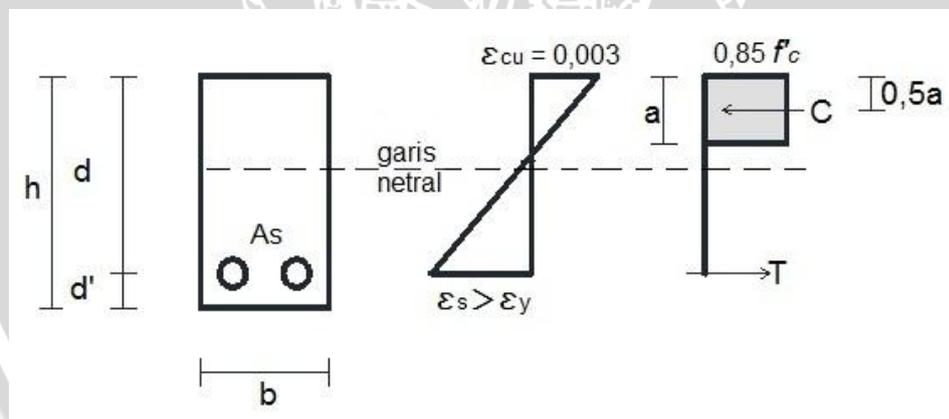
Tabel 4.18 Kebutuhan bahan pembuatan benda uji dengan 15% piropilit

Benda uji	Semen (kg)	Pasir (kg)	Piropilit (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)
1 silinder 15/30 cm	2,357	3,550	0,627	7,644	1,304
1 balok 10/15 x 75 cm	5,004	7,535	1,330	16,224	2,767
Total 3 silinder 15/30 cm	7,071	10,651	1,880	22,932	3,912
Total 3 balok 10/15 x 75 cm	15,012	22,606	3,989	48,672	8,301

Tabel 4.19 Kebutuhan bahan pembuatan benda uji dengan 20% piropilit

Benda uji	Semen (kg)	Pasir (kg)	Piropilit (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)
1 silinder 15/30 cm	2,357	3,342	0,835	7,644	1,304
1 balok 10/15 x 75 cm	5,004	7,092	1,773	16,224	2,767
Total 3 silinder 15/30 cm	7,071	10,025	2,506	22,932	3,912
Total 3 balok 10/15 x 75 cm	15,012	21,276	5,319	48,672	8,301

4.6 Analisis Penampang dan Lendutan Balok Beton Normal

**Gambar 4.4** Penampang balok tulangan tunggal

Diketahui:

$$b = 100 \text{ mm}$$

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$d' = 30 \text{ mm}$$

$$L = 600 \text{ mm (jarak antar tumpuan)}$$

$$f'_c = 22,5 \text{ MPa}$$

$$f_y = 240 \text{ MPa}$$

$$\varnothing = 9 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$A_s = 2 \times 0,25 \times 3,14 \times 9^2 \\ = 127,29 \text{ mm}^2$$

a. Perhitungan rasio tulangan

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$$

$$= \frac{1,4}{240}$$

$$= 0,0058$$

$$\rho_{max} = 0,75 \rho_b$$

$$= 0,75 \times \frac{(0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c) \cdot 600}{f_y \cdot (600 + f_y)}$$

$$= 0,75 \times \frac{(0,85 \cdot 0,85 \cdot 22,5) \cdot 600}{240 (600 + 240)}$$

$$= 0,0363$$

$$\rho_{act} = \frac{A_s}{b \cdot d}$$

$$= \frac{127,29}{100 \cdot 120}$$

$$= 0,0106$$

Syarat rasio tulangan terhadap luasan penampang $\rho_{min} < \rho_{act} < \rho_{max}$. Dari perhitungan didapatkan $0,0058 < 0,0106 < 0,0363$, yang berarti telah memenuhi syarat.

b. Cek tipe keruntuhan

Dalam perencanaan balok beton biasa digunakan asumsi bahwa balok mengalami keruntuhan lentur tarik atau dalam kondisi tulangan kurang (*Under Reinforced*). Oleh karena itu desain balok harus memenuhi syarat keruntuhan *Under Reinforced* yaitu $\varepsilon_s > \varepsilon_y$.

$$\Sigma H = 0$$

$$C = T$$

$$0,85 f'_c \cdot b \cdot a = A_s \cdot f_y$$

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c . b} \\
 &= \frac{127,29 . 240}{0,85 . 22,5 . 100} \\
 &= \frac{100,57 . 240}{0,85 . 22,5 . 100} \\
 &= 15,973 \text{ mm} \\
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{15,973}{0,85} \\
 &= 18,792 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

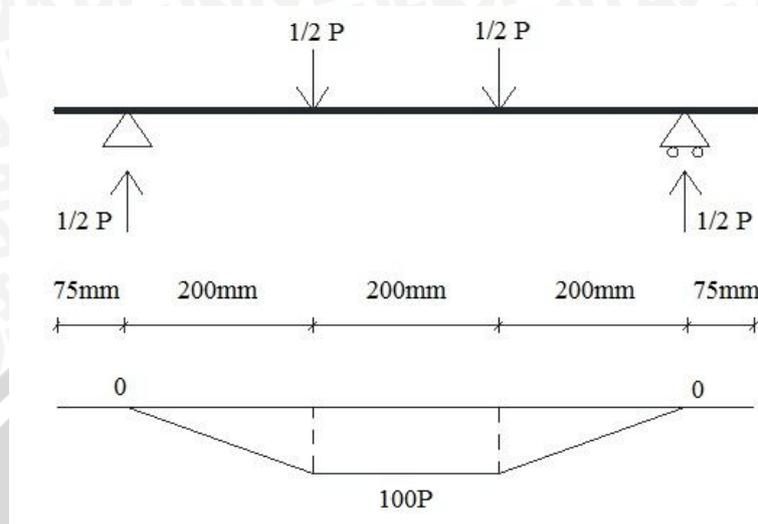
$$\begin{aligned}
 \frac{0,003}{c} &= \frac{\varepsilon_s}{d-c} \\
 \varepsilon_s &= \frac{0,003}{c} \times (d-c) \\
 &= \frac{0,003}{14,848} \times (120-18,792) \\
 &= 0,016 \\
 \varepsilon_y &= \frac{f_y}{E} \\
 &= \frac{240}{2 . 10^5} \\
 &= 0,0012
 \end{aligned}$$

Syarat keruntuhan *Under Reinforced* yaitu $\varepsilon_s > \varepsilon_y$. Dari perhitungan didapatkan $0,016 < 0,0012$ yang berarti telah memenuhi syarat.

c. Perhitungan momen nominal balok

$$\begin{aligned}
 M_n &= T (d-0,5a) \\
 &= A_s f_y (d-0,5a) \\
 &= 127,29 . 240 . (120 - 0,5 . 15,973) \\
 &= 3421850,737 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan P_{max} yang dapat ditahan oleh balok akibat pembebanan 2 titik simetri $L/3$



Gambar 4.5 Bidang momen akibat 4 point bending test

$$M_n = 100 P$$

$$3421850,737 = 100 P$$

$$P_{max} = 34218,507 \text{ N}$$

- e. Perhitungan lendutan tengah bentang balok

Perhitungan lendutan pada kemampuan layan digunakan beban P dengan nilai

70% dari P_{max} .

$$P = 70\% \cdot 34218,507$$

$$= 23952,955 \text{ N}$$

Perhitungan garis netral daerah tekan terhadap serat tarik daerah tekan:

$$y = \frac{nA_s}{b} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{2bd'}{nA_s}\right) - 1} \right]$$

$$= \frac{127,29}{100} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{2 \cdot 100 \cdot 120}{127,29}\right) - 1} \right]$$

$$= 16,252 \text{ mm}$$

Perhitungan momen inersia penampang retak transformasi:

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \frac{1}{3} b y^3 + n A_s (d-y)^2 \\ &= \frac{1}{3} \cdot 100 \cdot 16,252^3 + 127,29 (120-16,252)^2 \\ &= 1513145,234 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Perhitungan modulus retak beton:

$$\begin{aligned} f_r &= 0,7 \sqrt{f'_c} \\ &= 0,7 \sqrt{22,5} \\ &= 3,32 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan momen pada saat timbul retak pertama kali:

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{1}{12} b h^3 \\ &= \frac{1}{12} 100 \cdot 150^3 \\ &= 28125000 \text{ mm}^4 \\ M_{cr} &= \frac{f_r I_g}{y_t} \\ &= \frac{3,32 \cdot 28125000}{75} \\ &= 1245146,829 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Perhitungan momen inersia efektif:

$$\begin{aligned} I_e &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right\} I_{cr} \\ &= \left(\frac{1245146,829}{3421850,737} \right)^3 28125000 + \left\{ 1 - \left(\frac{1245146,829}{3421850,737} \right)^3 \right\} 1513145,234 \\ &= 2795338,999 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Perhitungan modulus elastisitas:

$$\begin{aligned} E &= 4700 \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \sqrt{22,5} \\ &= 22294,058 \end{aligned}$$

Perhitungan lendutan seketika balok pada taraf II:

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{0,5 \cdot P \cdot a}{24EI_e} (3L^2 - 4a^2) \\ &= \frac{0,5 \cdot 23952,955 \cdot 200}{24 \cdot 22294,058 \cdot 2795338,999} (3 \cdot 600^2 - 4 \cdot 200^2) \\ &= 0,147 \text{ mm}\end{aligned}$$

Perhitungan lendutan seketika balok pada taraf III:

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{0,5 \cdot P_{max} \cdot a}{24EI_{cr}} (3L^2 - 4a^2) \\ &= \frac{0,5 \cdot 34218,507 \cdot 200}{24 \cdot 22294,058 \cdot 1513145,234} (3 \cdot 600^2 - 4 \cdot 200^2) \\ &= 3,888 \text{ mm}\end{aligned}$$

4.7 Pengujian Kuat Tekan

4.7.1 Hasil pengujian kuat tekan

Tabel 4.20 Pengujian kuat tekan

Benda uji		Berat	A	Volume	Berat isi	P_{max}	f'_{ci}	f'_{cr}
Piropilit	Kode	Kg	cm ²	cm ³	kg/cm ³	kN	MPa (N/mm ²)	Mpa (N/mm ²)
0%	S-0A	12,42	176,79	5303,57	0,00234	467	26,416	
	S-0B	12,32	176,79	5303,57	0,00232	526	29,754	28,848
	S-0C	12,48	176,79	5303,57	0,00235	537	30,376	
5%	S-5A	12,7	176,79	5303,57	0,00239	334	18,893	
	S-5B	12,84	176,79	5303,57	0,00242	275	15,556	17,253
	S-5C	12,7	176,79	5303,57	0,00239	306	17,309	
10%	S-10A	12,76	176,79	5303,57	0,00241	404	22,853	
	S-10B	12,8	176,79	5303,57	0,00241	396	22,400	22,739
	S-10C	12,72	176,79	5303,57	0,00240	406	22,966	
15%	S-15A	12,68	176,79	5303,57	0,00239	364	20,590	
	S-15B	12,58	176,79	5303,57	0,00237	365	20,646	21,627
	S-15C	12,82	176,79	5303,57	0,00242	418	23,644	
20%	S-20A	12,98	176,79	5303,57	0,00245	445	25,172	
	S-20B	12,76	176,79	5303,57	0,00241	427	24,154	22,815
	S-20C	12,82	176,79	5303,57	0,00242	338	19,119	

Contoh perhitungan:

Kode benda uji S-0A, diketahui:

$$d = 15\text{cm}$$

$$t = 30\text{cm}$$

$$\text{Berat} = 12,42 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas penampang } (A) &= \frac{1}{4} \pi d^2 \\ &= \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 15^2 \\ &= 176,79 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume } (V) &= A \cdot t \\ &= 176,79 \cdot 30 \\ &= 5303,57 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat isi} &= \text{Berat} / V \\ &= 12,42 / 5303,57 \\ &= 0,00234 \text{ kg/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat tekan, } f'_{ci} &= P_{max} / A \\ &= 467 / 176,79 \\ &= 264,162 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 26,416 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama seperti contoh perhitungan didapatkan nilai f'_{ci} untuk masing-masing benda uji.

4.7.2 Uji statistik kuat tekan

Contoh perhitungan dilakukan pada benda uji silinder beton dengan variasi piropilit 0% sebagai berikut:

Tegangan hancur rata-rata

$$\begin{aligned} f'_{cr} &= \frac{\sum f'_{ci}}{n} \\ &= \frac{26,416 + 29,754 + 30,376}{3} \\ &= 28,848 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Nilai setandar deviasi

$$S = \sqrt{\frac{\sum(f'_{ci} - \bar{f}'_{ci})^2}{(n-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{(26,416-28,848)^2 + (29,754-28,848)^2 + (30,376-28,848)^2}{(3-1)}}$$

$$= 2,129 \text{ MPa}$$

Nilai setandar deviasi

$$M = 1,64.S$$

$$= 1,64 \cdot 2,129$$

$$= 3,492 \text{ MPa}$$

Tegangan tekan

$$f'_c = f'_{cr} - M$$

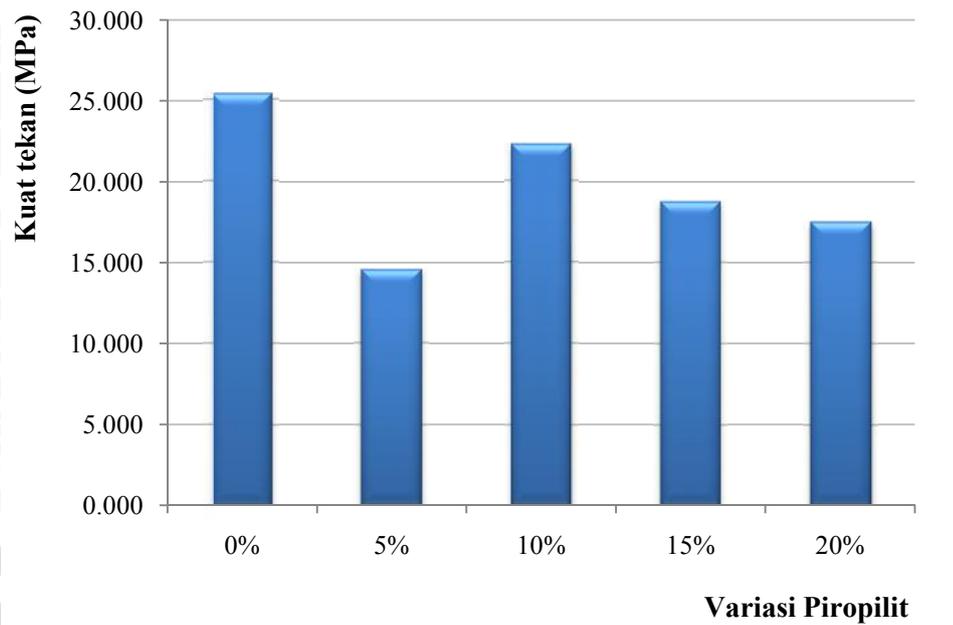
$$= 28,848 - 3,492$$

$$= 25,356 \text{ MPa}$$

Jadi dari pengujian kuat tekan terhadap 3 benda uji silinder beton dengan variasi piropilit 0% didapatkan nilai kekuatan karakteristik beton $f'_c = 25,356 \text{ MPa}$. Untuk perhitungan f'_c benda uji lainnya dapat ditampilkan dalam **Tabel 4.21**.

Tabel 4.21 Uji statistik kuat tekan

Benda uji		f'_{ci}	f'_{cr}	S	M	f'_c
Piropilit	Kode	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
0%	S-0A	26,416				
	S-0B	29,754	28,848	2,129	3,492	25,356
	S-0C	30,376				
5%	S-5A	18,893				
	S-5B	15,556	17,253	1,669	2,738	14,515
	S-5C	17,309				
10%	S-10A	22,853				
	S-10B	22,400	22,739	0,299	0,491	22,249
	S-10C	22,966				
15%	S-15A	20,590				
	S-15B	20,646	21,627	1,747	2,866	18,761
	S-15C	23,644				
20%	S-20A	25,172				
	S-20B	24,154	22,815	3,241	5,315	17,500
	S-20C	19,119				



Gambar 4.6 Perbandingan kuat tekan beton

Berdasar **Tabel 4.20** dan **Gambar 4.6** dapat terlihat bahwa pada beton dengan 0% piropilit, kuat tekannya telah sesuai dengan perencanaan yaitu 25,356 MPa. Sedangkan pada substitusi pasir dengan piropilit, kuat tekan beton cenderung lebih rendah dibanding dengan beton tanpa piropilit. Pada variasi 5% piropilit kuat tekan betonnya hanya 14,515 MPa. Sedangkan pada beton dengan variasi 10% piropilit, memiliki kuat tekan beton yang hampir memenuhi target yaitu sebesar 22,249 MPa. Penggantian 15% pasir dengan piropilit pada beton, menghasilkan penurunan kuat tekan sebesar 29,009% dari beton normal. Sedangkan pada penggantian pasir dengan piropilit sebanyak 20% menghasilkan beton dengan kuat tekan sebesar 17,500 MPa atau menurun sebesar 30,983%. Dari hasil pengujian dan analisis tersebut didapatkan bahwa penurunan kekuatan terkecil terjadi pada beton dengan variasi piropilit 10% yaitu sebesar 12,254%. Sedangkan penurunan kekuatan terbesar terjadi pada beton dengan variasi piropilit 5% yaitu sebesar 42,75%. Berdasar perbandingan kuat tekan beton tersebut dengan bertambahnya persentase piropilit menyebabkan semakin turunnya kuat tekan beton. Pada beton 5% seharusnya memiliki mutu beton yang lebih besar dari beton 10%. Namun dari hasil yang didapatkan, beton 5% piropilit memiliki kuat tekan yang rendah dibanding dengan beton 10%.



Gambar 4.7 Pemisahan agregat pada beton setelah dilakukan uji tekan

Dari hasil uji tekan terlihat bahwa kuat tekan beton pada variasi 0% piropilit telah sesuai dengan kuat tekan yang direncanakan. Namun dengan adanya penggantian sebagian agregat halus dengan material piropilit menyebabkan penurunan kuat tekan. Kuat tekan pada beton piropilit cenderung turun dari beton normal diakibatkan ikatan antar material pada beton terjadi secara tidak sempurna. Hal tersebut diperkuat dengan terpisahnya agregat-agregat kasar pada benda uji silinder yang telah dilakukan uji tekan. Agregat pada benda uji silinder yang telah dilakukan uji tekan, dapat dengan mudah dipecah atau dipisahkan. Pemisahan agregat tersebut seperti terlihat pada **Gambar 4.7**.

Pengikatan yang tidak sempurna pada beton dengan campuran piropilit terjadi akibat air yang diperlukan semen untuk bereaksi secara sempurna ikut diserap oleh piropilit. Pada hasil perencanaan beton normal dengan kuat tekan 22,5MPa, didapatkan perbandingan berat antara semen dan air yaitu sebesar 1:0,553. Perbandingan tersebut menyatakan bahwa untuk setiap 1 kg semen diperlukan air seberat 0,553 kg, agar semen dapat bereaksi sempurna sebagai pengikat diantara agregat dalam beton. Namun dengan adanya penambahan piropilit, dimungkinkan kandungan silika (SiO_2) dalam piropilit ikut menyerap air. Meskipun hasil uji kekekalan bentuk pada piropilit yang dicampur dengan kapur dan air menyatakan

bahwa piropilit tidak dapat digunakan sebagai bahan pengikat menggantikan semen, namun masih dimungkinkan terjadi reaksi kimia antara piropilit dengan air.

Dalam pembuatan benda uji baik dengan variasi piropilit 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% tetap digunakan perbandingan semen dan air seberat 1 : 0,553. Dengan *mix design* yang tetap dan penambahan piropilit mengakibatkan jumlah air yang digunakan untuk semen agar bereaksi sempurna menjadi berkurang. Jika semula tiap 1 kg semen bereaksi dengan air seberat 0,553 kg, setelah ditambahkan piropilit jumlah air yang bereaksi dengan semen akan berkurang. Hal tersebut mengakibatkan tidak semua semen yang digunakan dalam beton dapat bereaksi dan mengikat agregat secara sempurna. Pengikatan agregat yang tidak sempurna tersebut berpengaruh pada kuat tekan beton piropilit yang lebih rendah dibanding beton normal.

4.8 Pengujian Lentutan

Pengujian lentutan dilakukan terhadap balok beton bertulangan tunggal. Balok yang diuji adalah balok beton dengan variasi penambahan piropilit 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Balok Pengujian dilakukan dengan menggunakan sistem *Four Point Bending Test*. Dari data pengujian lentutan dilakukan uji regresi untuk mengetahui pengaruh beban terhadap lentutan balok.

Analisa regresi merupakan salah satu uji statistika yang memiliki dua jenis pilihan model yaitu linear dan non linear dalam parameteranya. Model linear memiliki dua sifat yaitu regresi sederhana dan regresi berganda dengan kurva yang dihasilkan membentuk garis lurus, sedangkan untuk model non linear dalam parameteranya bersifat kuadratik dan kubik dengan kurva yang dihasilkan membentuk garis lengkung. Pada pengujian lentutan balok ini digunakan regresi linier sederhana sehingga digunakan persamaan $y = a_1x + a_2$.

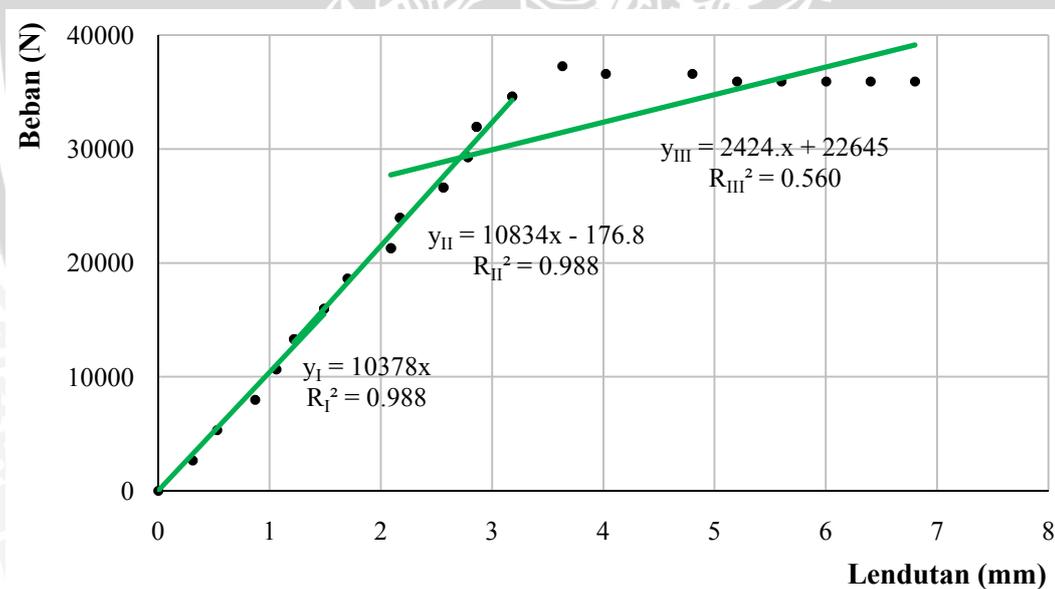
Regresi linier dilakukan terhadap hasil pengujian lentutan yang dibagi berdasarkan bentuk kurva trilinear hubungan beban-lentutan. Regresi pertama dilakukan pada daerah I yaitu ketika balok bersifat elastik penuh atau belum mengalami retak saat dilakukan pembebanan. Regresi kedua dilakukan pada daerah II yaitu pada saat balok mengalami retak terkontrol yang masih dapat diterima atau disebut sebagai taraf *serviceability*. Daerah ini terjadi pada saat balok mengalami retak pertama hingga balok menerima beban sebesar 70% dari beban maksimum. Nilai tersebut digunakan berdasarkan pendapat Nawy bahwa dengan beban mendekati 70% dari tegangan hancur, material beton telah kehilangan banyak kekuatan. Regresi ketiga

dilakukan pada saat balok bersifat plastis yang ditandai dengan terjadinya retak yang cukup banyak dan lebar disepanjang bentang. Berdasarkan analisis regresi dapat juga ditentukan nilai R^2 sebagai nilai korelasi yang menyatakan tingkat keeratan hubungan antara variabel y dan x .

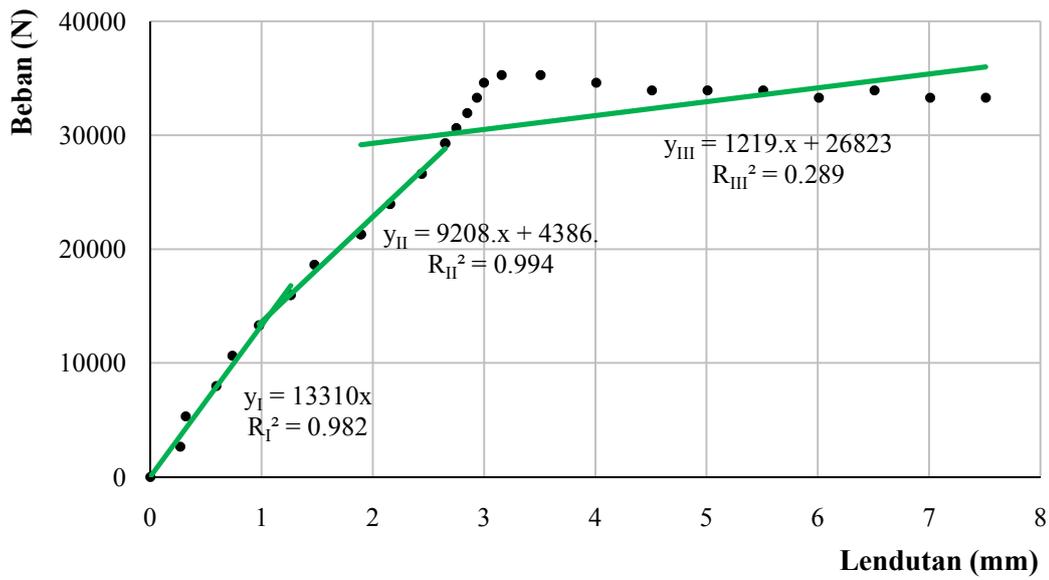
Dari data pengujian lendutan laboratorium dari setiap benda uji dapat digambarkan grafik hubungan beban dan lendutan. Untuk setiap variasi piropilit dilakukan pengujian lendutan sebanyak 3 benda uji. Dari hasil pengujian terhadap 3 benda uji tersebut dapat digambarkan grafik hubungan beban dan lendutan gabungan. Grafik gabungan ini didapat dengan menghitung nilai rata-rata dari ketiga benda uji pada setiap pembebanan yang dilakukan.

4.8.1 Pengujian balok beton variasi 0% piropilit

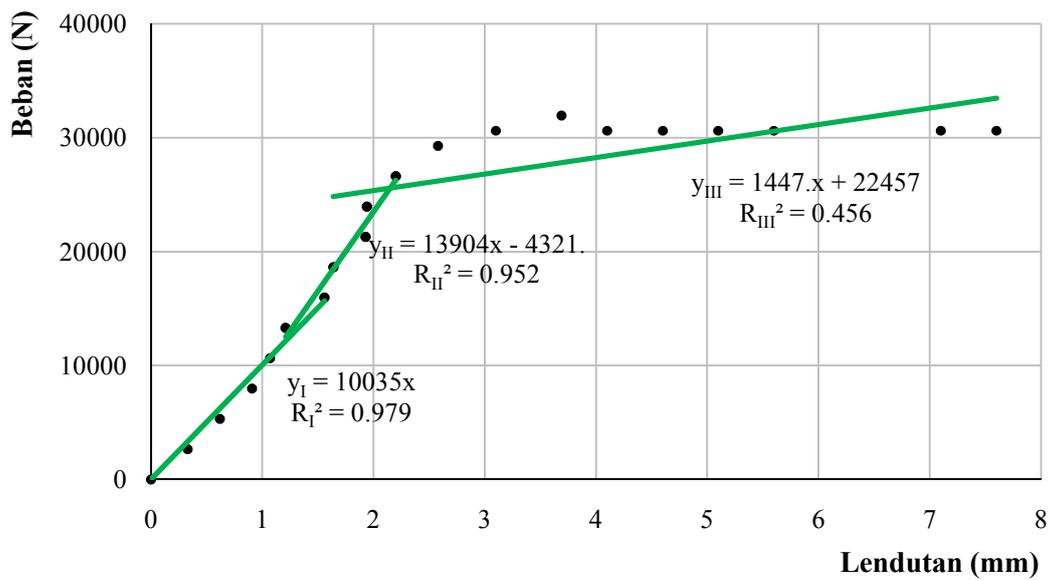
Benda uji balok beton dengan 0% piropilit terdiri dari 3 buah benda uji yang diberi kode sebagai B-0A, B-0B, dan B-0C. Dari pengujian yang dilakukan terhadap 3 benda uji tersebut dapat dibuat grafik hubungan beban dan lendutan seperti pada **Gambar 4.8 – 4.11**.



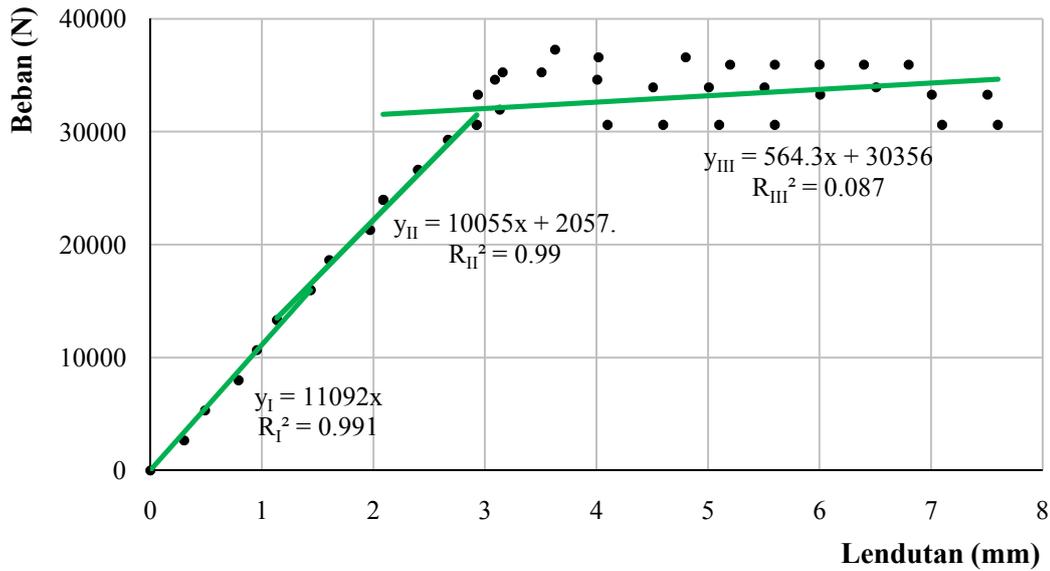
Gambar 4.8 Hubungan beban-lendutan benda uji B-0A



Gambar 4.9 Hubungan beban-lendutan benda uji B-0B



Gambar 4.10 Hubungan beban-lendutan benda uji B-0C

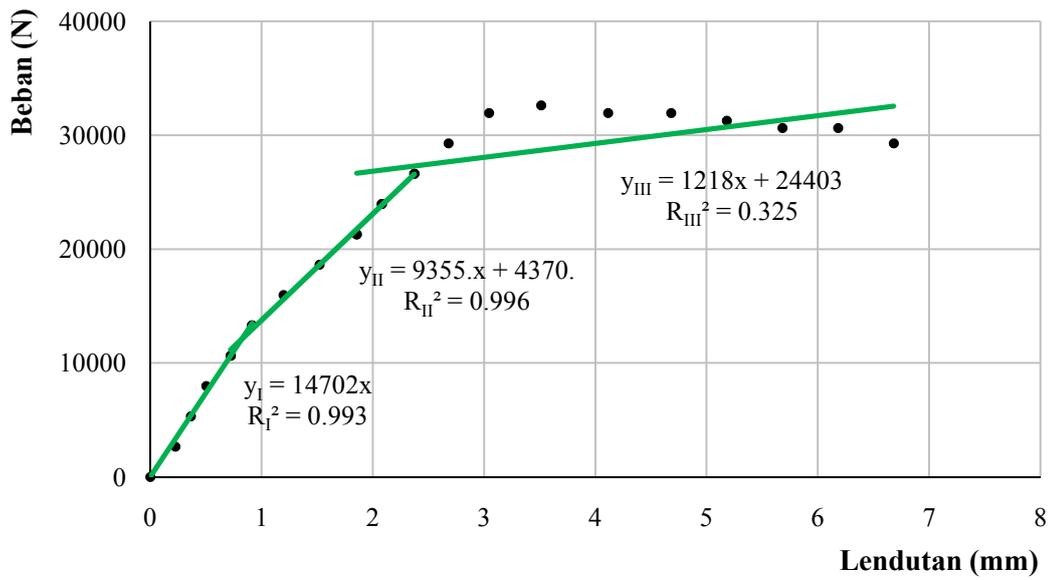


Gambar 4.11 Hubungan beban-lendutan gabungan balok 0% piropilit

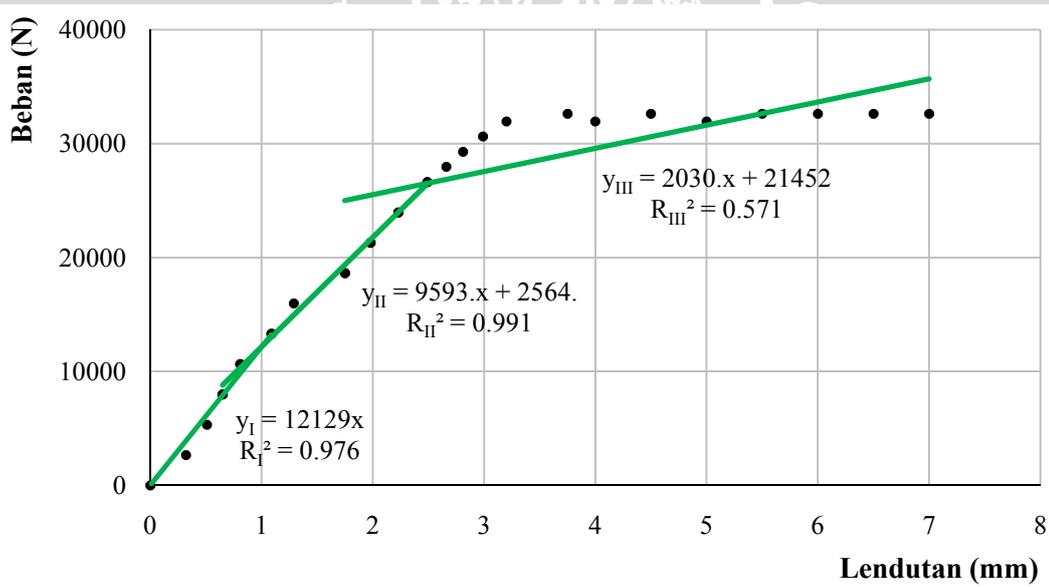
Dari grafik hubungan beban-lendutan didapatkan persamaan regresi dan koefisien korelasi dari setiap benda uji dan gabungan benda uji. Pada benda uji B-0A persamaan regresinya $y_I = 10378x$; $y_{II} = 10834x + 176,8$; dan $y_{III} = 2424x + 22645$. Benda uji B-0B persamaan regresinya $y_I = 13310x$; $y_{II} = 9208x + 4386$; dan $y_{III} = 1219x + 26283$. Sedangkan benda uji B-0C didapatkan persamaan regresinya $y_I = 10035x$; $y_{II} = 13904x + 4321$; $y_{III} = 1447x + 22457$. Dari grafik hubungan beban-lendutan gabungan balok 0% piropilit diperoleh persamaan regresi $y_I = 11092x$; $y_{II} = 10055x + 2057$; $y_{III} = 564,3x + 30356$.

4.8.2 Pengujian balok beton variasi 5% piropilit

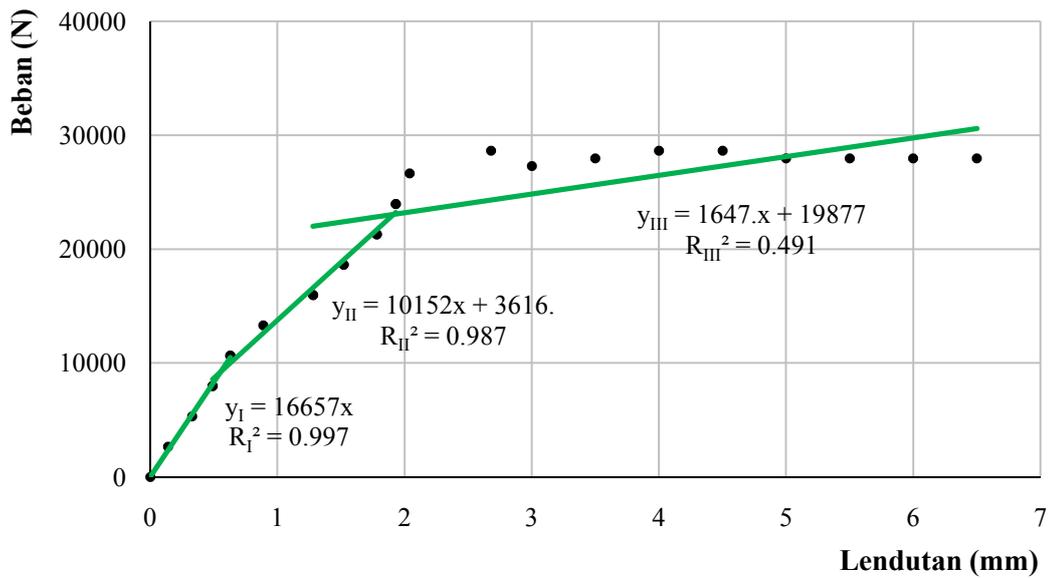
Benda uji balok beton dengan 5% piropilit terdiri dari 3 buah benda uji yang diberi kode sebagai B-5A, B-5B, dan B-5C. Dari pengujian yang dilakukan terhadap 3 benda uji tersebut dapat dibuat grafik hubungan beban dan lendutan seperti pada **Gambar 4.12 – 4.15**.



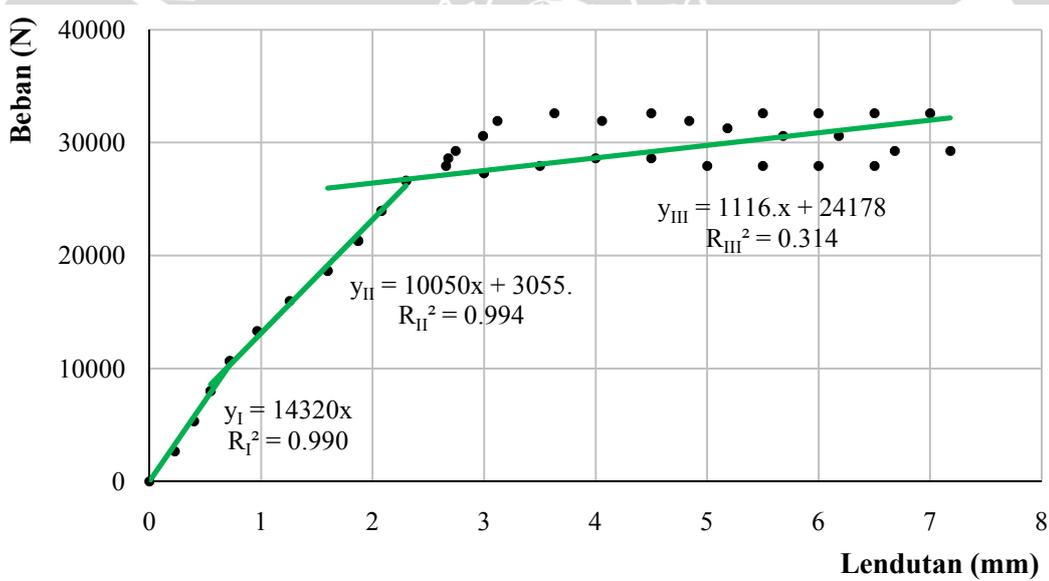
Gambar 4.12 Hubungan beban-lendutan benda uji B-5A



Gambar 4.13 Hubungan beban-lendutan benda uji B-5B



Gambar 4.14 Hubungan beban-lendutan benda uji B-5C

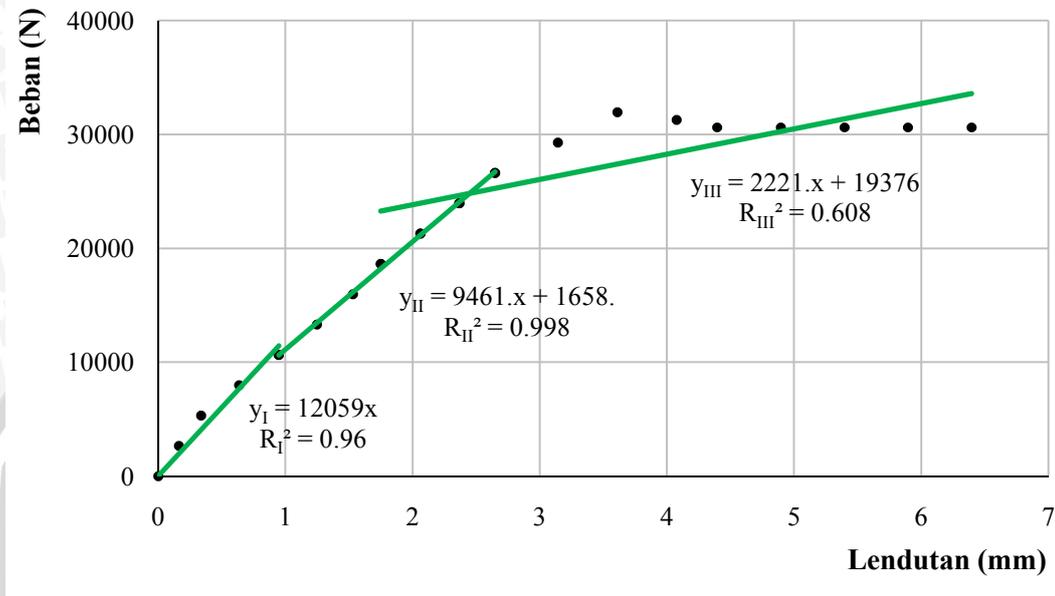


Gambar 4.15 Hubungan beban-lendutan gabungan balok 5% piropilit

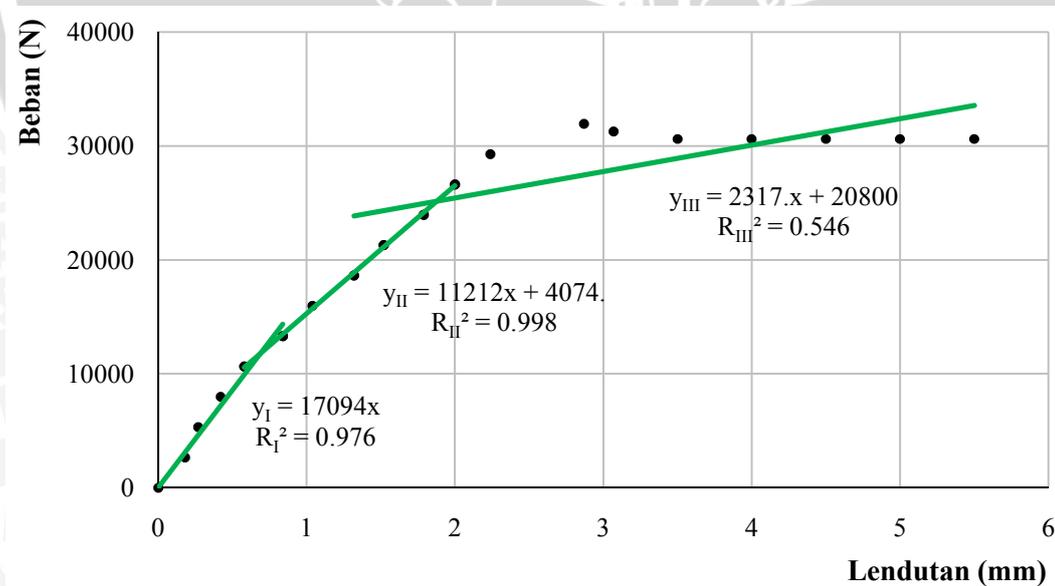
Dari grafik hubungan beban-lendutan didapatkan persamaan regresi dan koefisien korelasi dari setiap benda uji dan gabungan benda uji. Pada benda uji B-5A persamaan regresinya $y_I = 14702x$; $y_{II} = 9355x + 4370$; dan $y_{III} = 1218x + 24403$. Benda uji B-5B persamaan regresinya $y_I = 12129x$; $y_{II} = 9593x + 2564$; dan $y_{III} = 2030x + 21452$. Sedangkan benda uji B-5C didapatkan persamaan regresinya $y_I = 16657x$; $y_{II} = 10152x + 3616$; $y_{III} = 1647x + 19877$. Dari grafik hubungan beban-lendutan gabungan balok 5% piropilit diperoleh persamaan regresi $y_I = 14320x$; $y_{II} = 10050x + 3055$; $y_{III} = 1116x + 24178$.

4.8.3 Pengujian balok beton variasi 10% piropilit

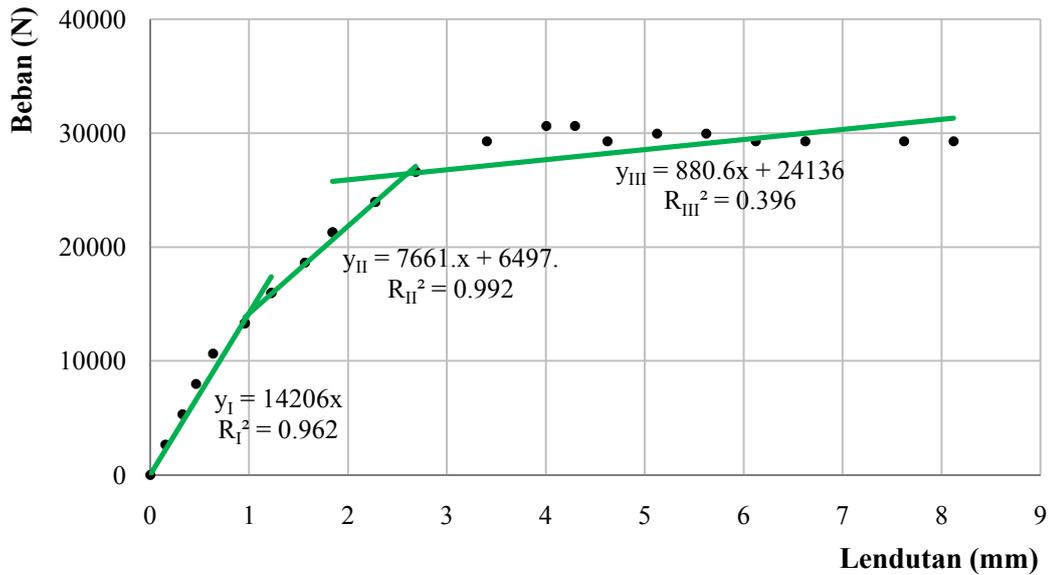
Benda uji balok beton dengan 10% piropilit terdiri dari 3 buah benda uji yang diberi kode sebagai B-10A, B-10B, dan B-10C. Dari pengujian yang dilakukan terhadap 3 benda uji tersebut dapat dibuat grafik hubungan beban dan lendutan seperti pada Gambar 4.16 – 4.19.



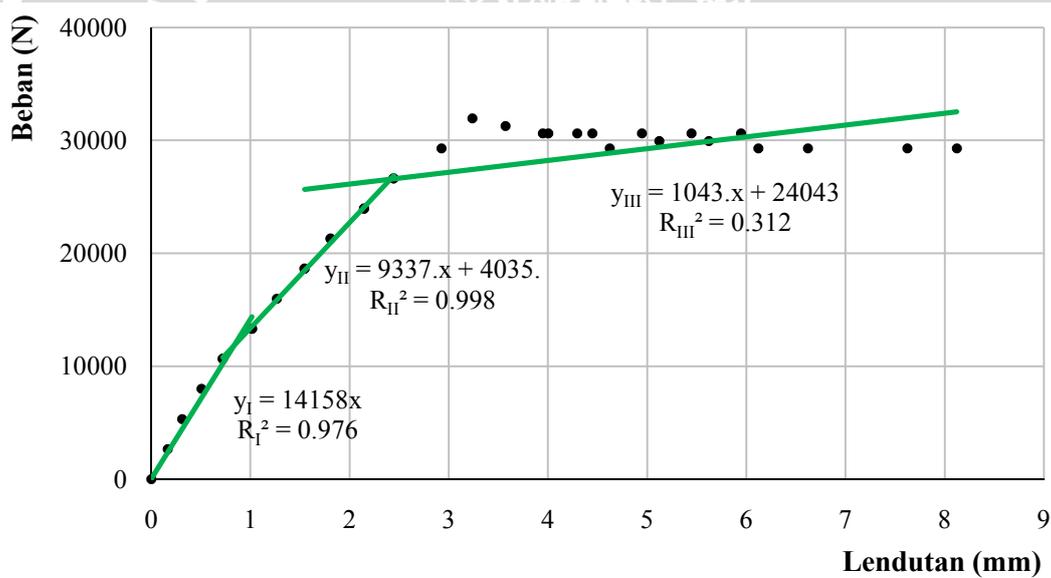
Gambar 4.16 Hubungan beban-lendutan benda uji B-10A



Gambar 4.17 Hubungan beban-lendutan benda uji B-10B



Gambar 4.18 Hubungan beban-lendutan benda uji B-10C



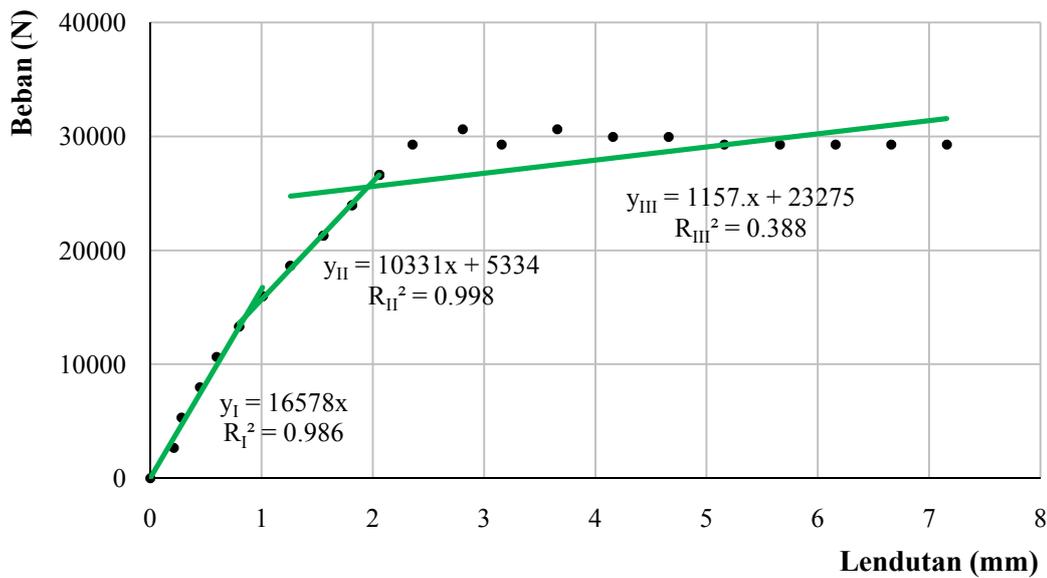
Gambar 4.19 Hubungan beban-lendutan gabungan balok 10% piropilit

Dari grafik hubungan beban-lendutan didapatkan persamaan regresi dan koefisien korelasi dari setiap benda uji dan gabungan benda uji. Pada benda uji B-10A persamaan regresinya $y_I = 12059x$; $y_{II} = 9461x + 1658$; dan $y_{III} = 2221x + 19276$. Benda uji B-10B persamaan regresinya $y_I = 17094x$; $y_{II} = 11212x + 4074$; dan $y_{III} = 2317x + 20800$. Sedangkan benda uji B-10C didapatkan persamaan regresinya $y_I = 14206x$; $y_{II} = 7661x + 6497$; $y_{III} = 880,6 + 24136$. Dari grafik hubungan beban-

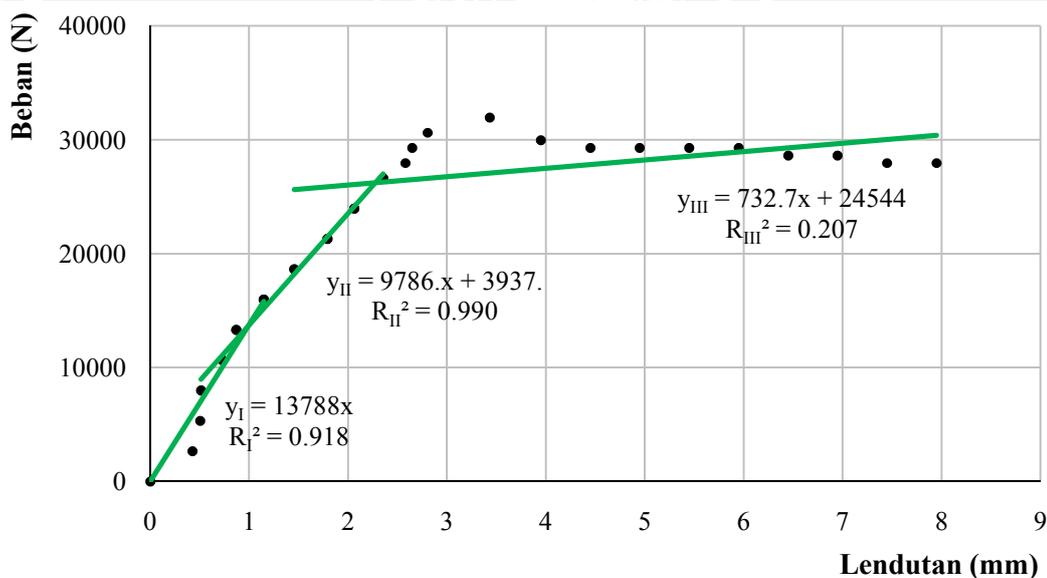
lendutan gabungan balok 10% piropilit diperoleh persamaan regresi $y_I = 14158x$; $y_{II} = 9337x + 4035$; $y_{III} = 1043x + 24043$.

4.8.4 Pengujian balok beton variasi 15% piropilit

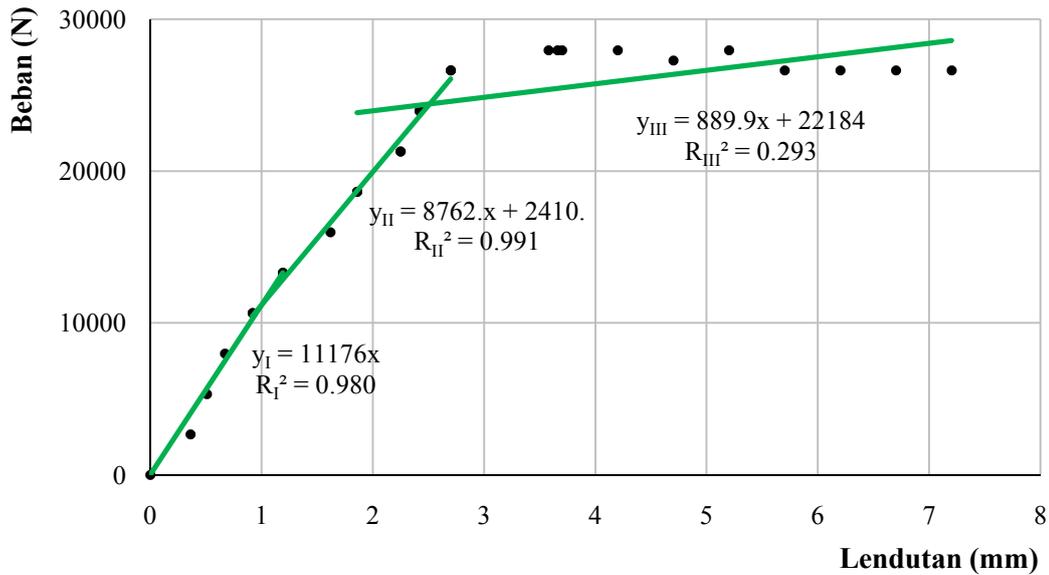
Benda uji balok beton dengan 15% piropilit terdiri dari 3 buah benda uji yang diberi kode sebagai B-15A, B-15B, dan B-15C. Dari pengujian yang dilakukan terhadap 3 benda uji tersebut dapat dibuat grafik hubungan beban dan lendutan seperti pada Gambar 4.20 – 4.23.



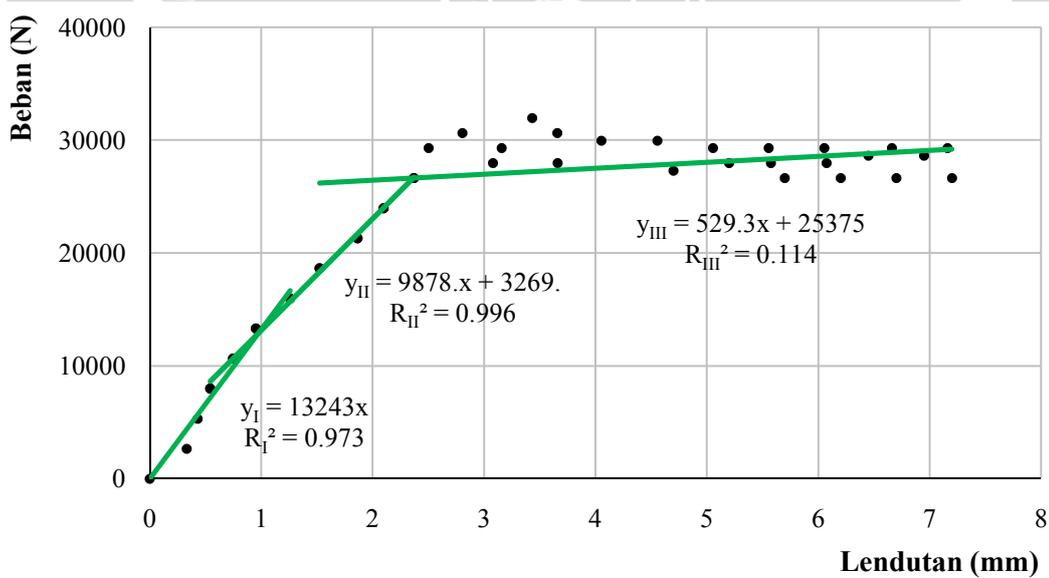
Gambar 4.20 Hubungan beban-lendutan benda uji B-15A



Gambar 4.21 Hubungan beban-lendutan benda uji B-15B



Gambar 4.22 Hubungan beban-lendutan benda uji B-15C



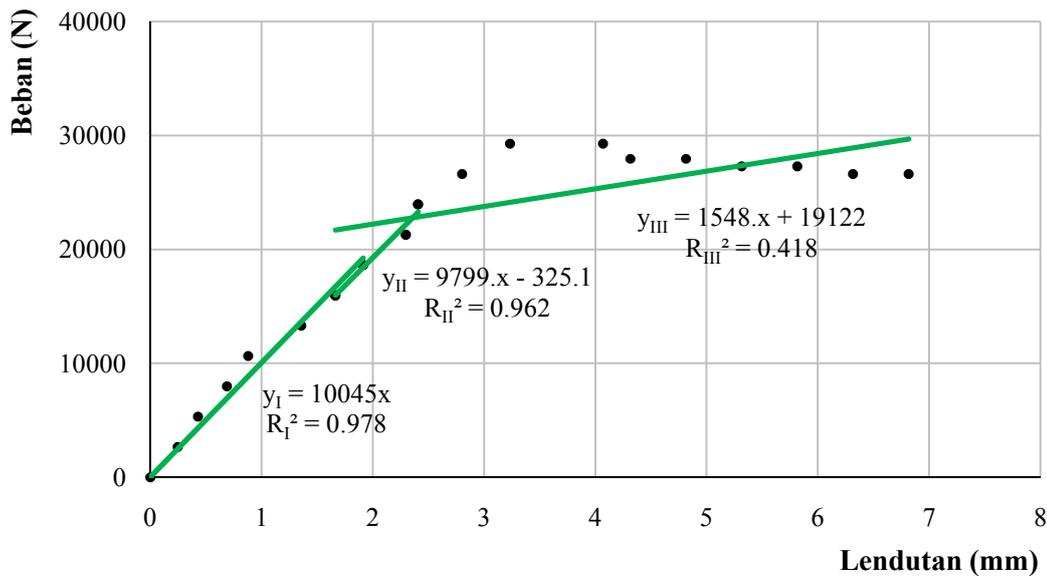
Gambar 4.23 Hubungan beban-lendutan gabungan balok 15% piropilit

Dari grafik hubungan beban-lendutan didapatkan persamaan regresi dan koefisien korelasi dari setiap benda uji dan gabungan benda uji. Pada benda uji B-15A persamaan regresinya $y_I = 16578x$; $y_{II} = 10331x + 5334$; dan $y_{III} = 1157x + 23275$. Benda uji B-15B persamaan regresinya $y_I = 13788x$; $y_{II} = 9786x + 3937$; dan $y_{III} = 732,7x + 24544$. Sedangkan benda uji B-15C didapatkan persamaan regresinya $y_I = 11176x$; $y_{II} = 8762x + 2410$; $y_{III} = 889,9x + 22184$. Dari grafik hubungan beban-

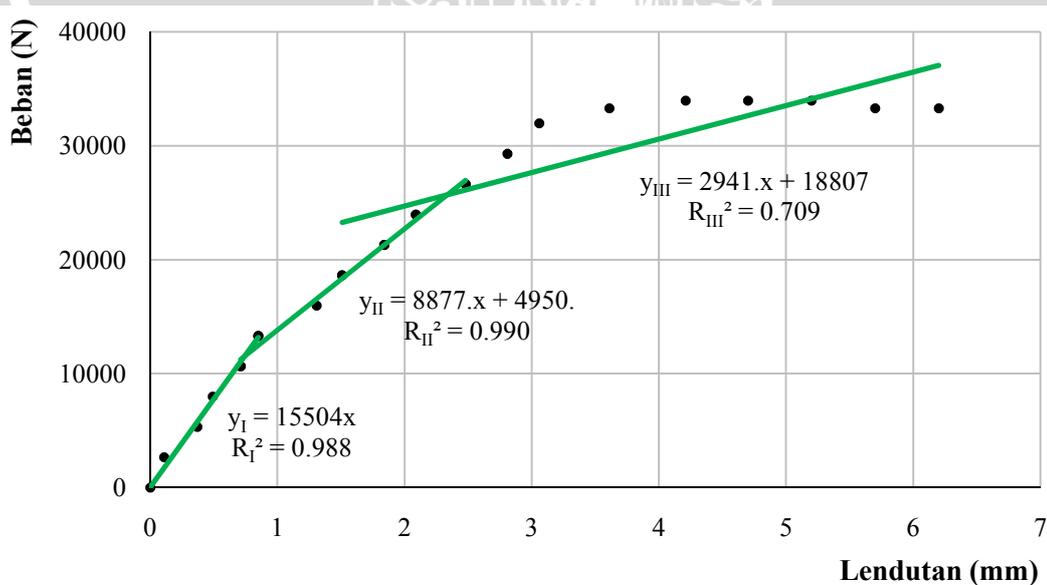
lendutan gabungan balok 15% piropilit diperoleh persamaan regresi $y_I = 13243x$; $y_{II} = 9878x + 3269$; $y_{III} = 529,3x + 25375$.

4.8.5 Pengujian balok beton variasi 20% piropilit

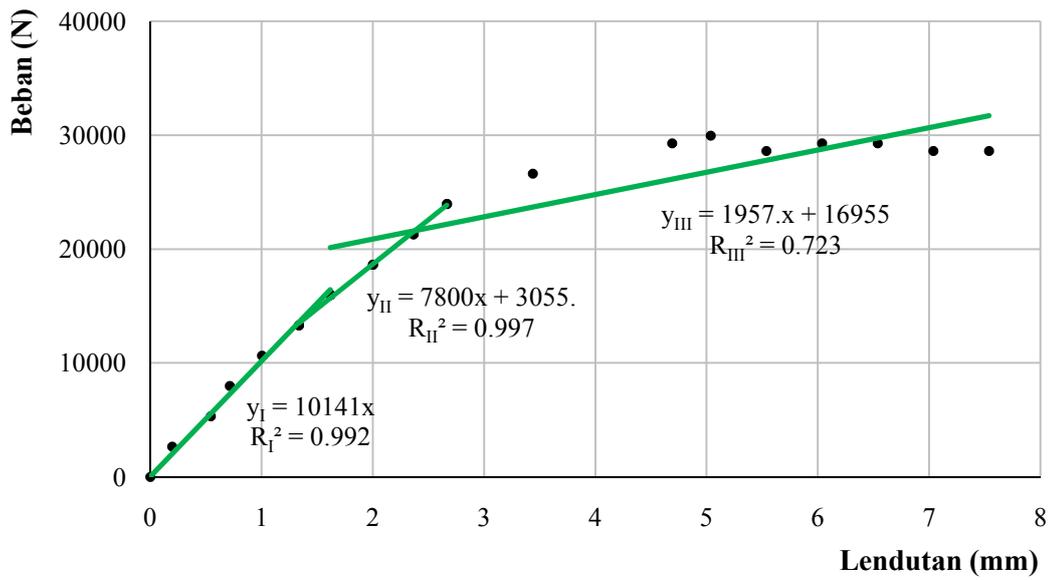
Benda uji balok beton dengan 20% piropilit terdiri dari 3 buah benda uji yang diberi kode sebagai B-20A, B-20B, dan B-20C. Dari pengujian yang dilakukan dapat dibuat grafik hubungan beban dan lendutan seperti pada **Gambar 4.24-4.27**.



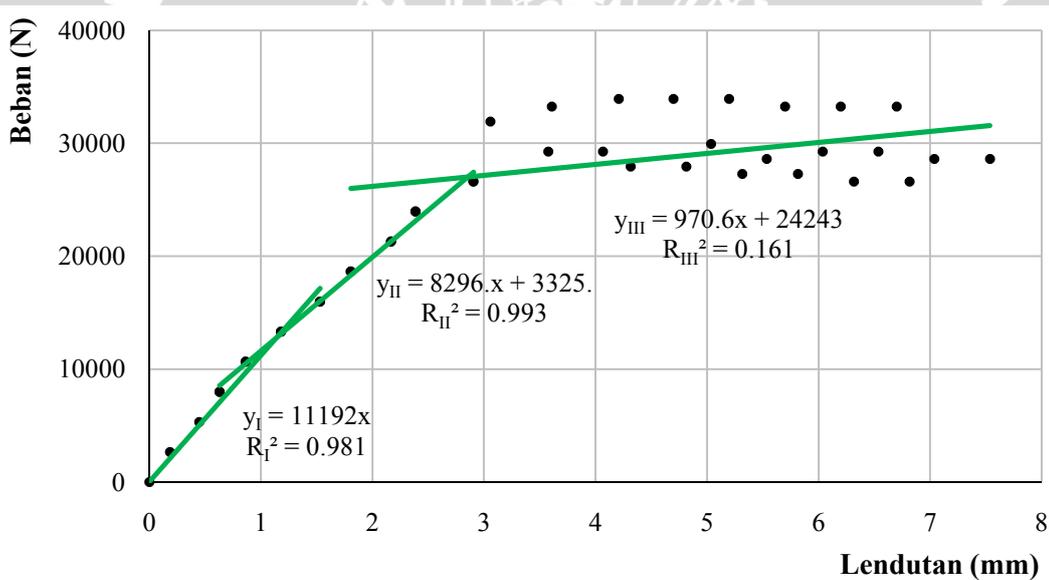
Gambar 4.24 Hubungan beban-lendutan benda uji B-20A



Gambar 4.25 Hubungan beban-lendutan benda uji B-20B



Gambar 4.26 Hubungan beban-lendutan benda uji B-20C



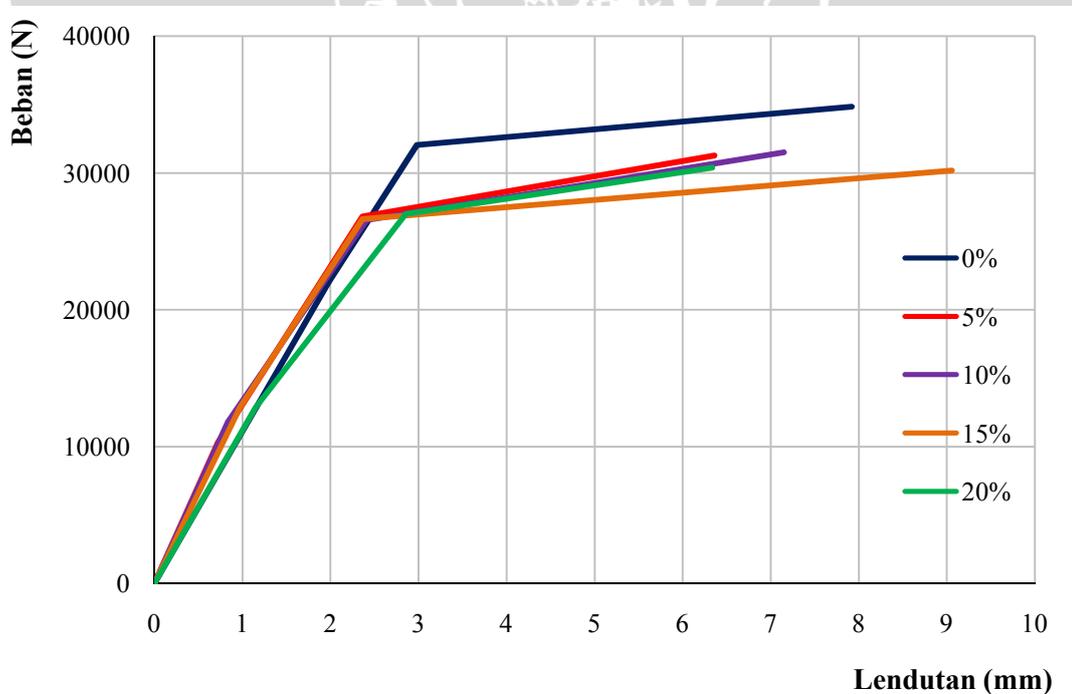
Gambar 4.27 Hubungan beban-lendutan gabungan balok 20% piropilit

Dari grafik hubungan beban-lendutan didapatkan persamaan regresi dan koefisien korelasi dari setiap benda uji dan gabungan benda uji. Pada benda uji B-20A persamaan regresinya $y_I = 10045x$; $y_{II} = 9799x + 325,1$; dan $y_{III} = 1548x + 19122$. Benda uji B-20B persamaan regresinya $y_I = 15504x$; $y_{II} = 8877x + 4950$; dan $y_{III} = 2941x + 18807$. Sedangkan benda uji B-20C didapatkan persamaan regresinya $y_I = 10141x$; $y_{II} = 7800x + 3055$; $y_{III} = 1957x + 16955$. Dari grafik hubungan beban-

lendutan gabungan balok 20% piropilit diperoleh persamaan regresi $y_I = 11192x$; $y_{II} = 8296x + 3325$; $y_{III} = 970,6x + 24243$.

4.8.6 Perbandingan balok beton variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%

Untuk membandingkan besarnya lendutan antara balok pada setiap variasi piropilit, digunakan persamaan regresi dari hubungan beban-lendutan gabungan dari masing-masing persentase piropilit. Untuk balok dengan variasi 0% piropilit digunakan persamaan regresi $y_I = 11092x$; $y_{II} = 10055x + 2057$; $y_{III} = 564,3x + 30356$. Persamaan regresi untuk balok dengan 5% piropilit adalah $y_I = 14320x$; $y_{II} = 10050x + 3055$; $y_{III} = 1116x + 24178$. Persamaan regresi untuk balok dengan 10% piropilit adalah $y_I = 14158x$; $y_{II} = 9337x + 4035$; $y_{III} = 1043x + 24043$. Persamaan regresi $y_I = 13243x$; $y_{II} = 9878x + 3269$; $y_{III} = 529,3x + 2537$ digunakan pada balok dengan variasi piropilit 15%. Sedangkan pada balok dengan 20% piropilit digunakan persamaan regresi $y_I = 11192x$; $y_{II} = 8296x + 3325$; $y_{III} = 970,6x + 24243$. Dari setiap persamaan regresi tersebut variabel x merupakan besarnya lendutan dan variabel y merupakan nilai beban yang dikerjakan pada balok. Berdasar persamaan regresi pada masing-masing variasi piropilit, dapat digambarkan hubungan beban-lendutan gabungan seperti pada **Gambar 4.28**.



Gambar 4.28 Hubungan beban-lendutan gabungan

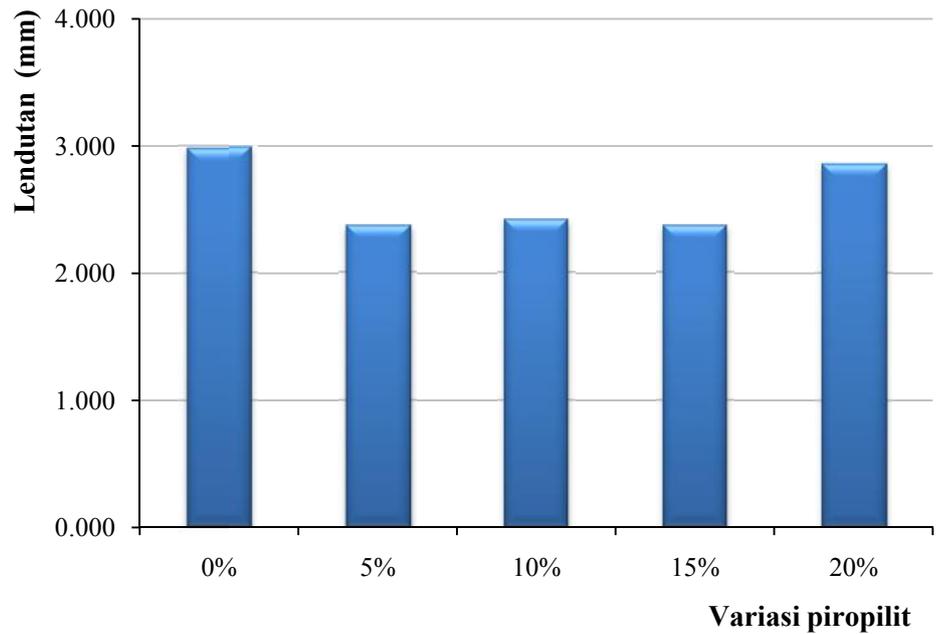
Gambar 4.28 menyatakan perbandingan hubungan baban-lendutan dari balok beton dengan variasi piropilit 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Dari gambar tersebut terlihat bahwa untuk pembebanan dengan nilai yang sama pada daerah *serviceability* (26559,065N), balok dengan 5% piropilit terjadi lendutan yang lebih rendah dari balok lain. Sedangkan lendutan terbesar untuk beban yang sama terjadi pada balok dengan 20% piropilit. Namun kemampuan layan terbesar terjadi pada balok 0%, karena pada gambar tersebut terlihat bahwa balok dengan persentase piropilit 0% mempunyai daerah kemampuan layan dengan puncak yang lebih besar dibanding dengan balok dengan variasi persentase lainnya.

Besarnya beban dan lendutan yang terjadi pada puncak daerah kemampuan layan berdasar grafik tersebut dapat merupakan nilai beban dan lendutan pada titik perpotongan dari grafik daerah II dan III. Nilai beban dan lendutan pada daerah II disajikan sebagai **Tabel 4.22**.

Tabel 4.22 Lendutan pada puncak daerah *serviceability*

Variasi Piropilit	P (N)	δ (mm)
0%	32038,602	2,982
5%	26816,610	2,364
10%	26559,065	2,412
15%	26626,582	2,364
20%	27014,587	2,856

Nilai beban dan lendutan maksimum untuk tiap variasi piropilit dapat terlihat pada **Tabel 4.22** di atas. Dari tabel tersebut dapat diketahui beban maksimum pada daerah II (*serviceability*) balok beton dengan variasi piropilit 0% adalah 32038,602 N dengan lendutannya adalah 2,982 mm. Pada balok beton dengan 5% piropilit bebannya adalah 26816,610 N dengan lendutan sebesar 2,364 mm. Untuk balok dengan 10% piropilit beban yang ditahan adalah 26559,065 N dengan lendutan sebesar 2,412 mm. Sedangkan balok dengan 15% piropilit beban rata-ratanya sebesar 26626,582 N dan lendutan yang terjadi sebesar 2,364 mm. Pada balok dengan 20% piropilit sebagai pengganti agragat halus didapatkan nilai beban sebesar 27014,587 N dengan lendutan maksimum rata-rata 2,856 mm.



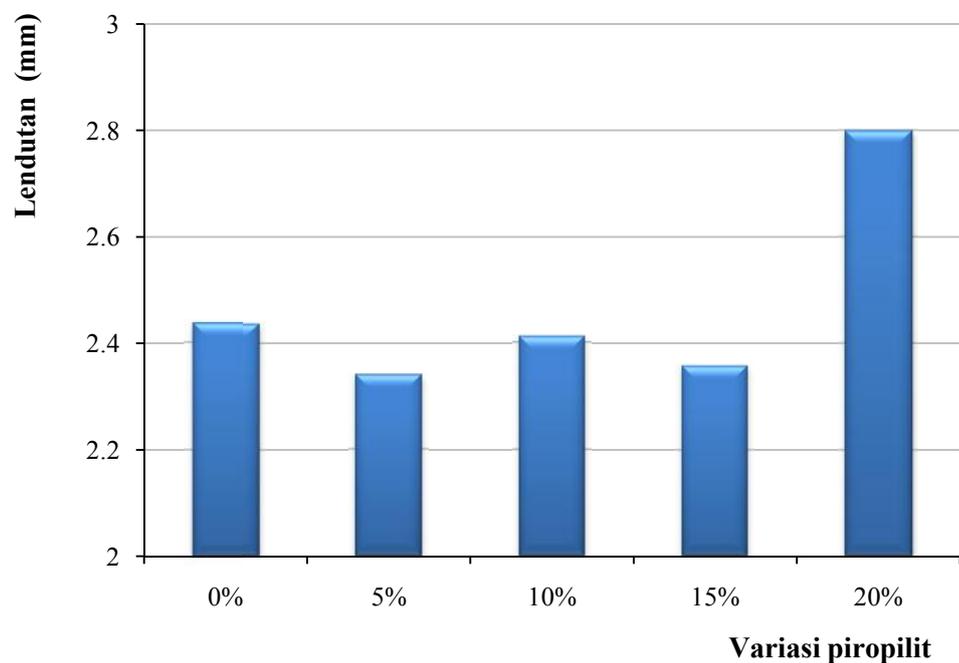
Gambar 4.29 Perbandingan lendutan eksperimen pada beban maksimum daerah *serviceability*

Berdasar **Gambar 4.29** terlihat bahwa terdapat perbedaan besarnya lendutan maksimum pada daerah *serviceability* dari setiap variasi piropilit. Perbedaan lendutan tersebut diakibatkan karena adanya perbedaan mutu beton dalam tiap variasi piropilit. Beton dengan piropilit memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibanding dengan beton tanpa piropilit. Hal ini disebabkan semen yang digunakan pada beton tidak seluruhnya dapat bereaksi. Reaksi yang tidak sempurna pada semen berpengaruh pada kurangnya daya ikat semen tersebut terhadap agregat penyusun beton. Selain itu, pasta semen juga mempengaruhi lekatan agregat terhadap permukaan tulangan. Berkurangnya daya lekat antara beton dan tulangan akan mengakibatkan kuat tarik yang lemah pada balok beton bertulang. Hal tersebut juga akan berpengaruh pada besarnya kuat lentur yang mampu ditahan oleh balok. Dengan mutu beton yang berbeda dan kuat lentur yang berbeda pula, mengakibatkan adanya perbedaan lendutan yang terjadi pada balok.

Untuk memperjelas perbandingan lendutan yang terjadi antar tiap variasi piropilit dapat dilakukan dengan membandingkan lendutan pada area *serviceability* dengan beban yang sama. Beban yang digunakan sebagai acuan pembandingan sebesar 26559,065 N karena pada beban tersebut terdapat balok yang telah mencapai kekuatan maksimum.

Tabel 4.23 Lentutan pada daerah *serviceability* dengan beban yang sama (26559,065N)

Variasi Piropilit	P (N)	δ (mm)
0%		2,437
5%		2,339
10%	26559,065	2,412
15%		2,358
20%		2,800



Gambar 4.30 Perbandingan lendutan eksperimen pada daerah *serviceability* dengan beban yang sama (26559,065N)

Sesuai dengan pernyataan sebelumnya bahwa untuk beban yang sama pada daerah *serviceability* lendutan paling kecil terjadi pada balok dengan variasi piropilit 5% dan lendutan terbesar terjadi pada balok dengan 20% piropilit.

4.9 Perhitungan Lendutan Teoritis

Lendutan secara teoritis dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 hingga persamaan 2.15. Pada perhitungan lendutan digunakan data yang diperoleh dari desain penampang berupa dimensi dan penulangan. Data kuat tekan yang digunakan merupakan hasil dari pengujian kuat tekan terhadap benda uji berupa silinder. Beban

yang dikerjakan pada perhitungan lendutan adalah beban pengujian untuk tiap variasi piropilit. Berikut disajikan contoh perhitungan lendutan secara teoritis untuk benda uji balok dengan 0% piropilit.

Diketahui:

$$b = 100 \text{ mm}$$

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$d' = 30 \text{ cm}$$

$$L = 600 \text{ mm (jarak antar tumpuan)}$$

$$c = 750 \text{ mm (panjang kantilever)}$$

$$f'_c = 25,356 \text{ MPa}$$

$$f_y = 240 \text{ MPa}$$

$$\varnothing = 9 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$A_s = 2 \times 0,25 \times 3,14 \times 9^2 = 127,29 \text{ mm}^2$$

$$q = 275 \text{ N} / 750 \text{ mm} = 0,367 \text{ N/mm}$$

$$P_1 = 22002,518 \text{ N (beban pada daerah I)}$$

$$P_2 = 32038,602 \text{ N (beban pada daerah II)}$$

$$P_3 = 34827,833 \text{ N (beban pada daerah III)}$$

Perhitungan modulus elastisitas beton:

$$\begin{aligned} E &= 4700 \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \sqrt{25,356} \\ &= 23666,729 \end{aligned}$$

Perhitungan garis netral daerah tekan terhadap serat tarik daerah tekan:

$$\begin{aligned} y &= \frac{nA_s}{b} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{2bd'}{nA_s}\right) - 1} \right] \\ &= \frac{127,29}{100} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{2 \cdot 100 \cdot 120}{127,29}\right) - 1} \right] \\ &= 16,252 \text{ mm} \end{aligned}$$

Perhitungan modulus retak beton:

$$f_r = 0,7 \sqrt{f'_c}$$

$$= 0,7 \sqrt{25,356}$$

$$= 3,525 \text{ N/mm}^2$$

Perhitungan momen inersia penampang retak transformasi:

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b y^3 + n A_s (d-y)^2$$

$$= \frac{1}{3} \cdot 100 \cdot 16,252^3 + 127,29 (120-16,252)^2$$

$$= 1513145,234 \text{ mm}^4$$

Perhitungan momen pada saat timbul retak pertama kali:

$$I_g = \frac{1}{12} b h^3$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 100 \cdot 150^3$$

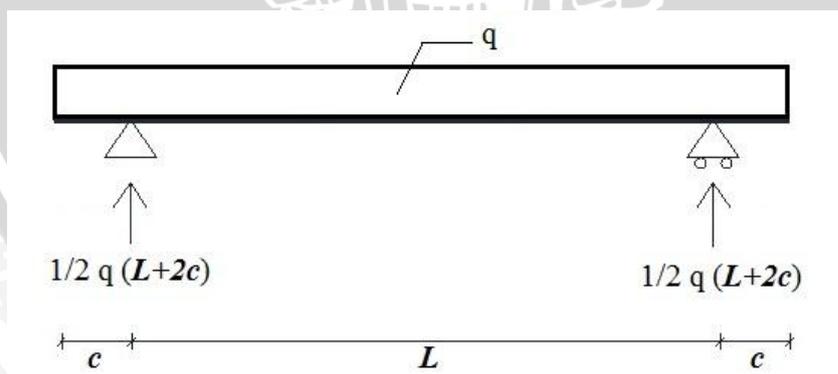
$$= 28125000 \text{ mm}^4$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

$$= \frac{3,525 \cdot 28125000}{75}$$

$$= 1321811,967 \text{ Nmm}$$

- Akibat berat sendiri balok



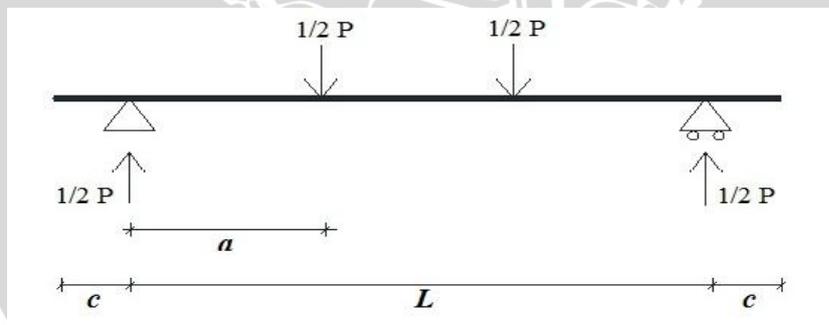
Gambar 4.31 Pembebanan merata akibat berat sendiri balok

$$\begin{aligned}
 M_a &= \frac{q(L+2c)}{2} \cdot \frac{L}{2} - \frac{q}{2} \left(\frac{L}{2} + c \right)^2 \\
 &= \frac{0,367(600+2.75)}{2} \cdot \frac{600}{2} - \frac{0,367}{2} \left(\frac{600}{2} + 75 \right)^2 \\
 &= 15648,75 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

Nilai momen akibat berat sendiri lebih kecil dari nilai momen retak $M_a < M_{cr}$ berarti pada balok tidak terjadi retak. Jadi untuk perhitungan lendutan digunakan nilai momen inersia penampang utuh I_g . Karena berat sendiri balok tidak berubah selama terjadi perubahan beban luar, maka nilai lendutan balok akibat berat sendiri bersifat konstan.

$$\begin{aligned}
 \delta_D &= \frac{q(L+2c)^3}{24EI} \left[\frac{5}{16} - \frac{5c}{2(L+2c)} + 6 \left(\frac{c}{L+2c} \right)^2 - 4 \left(\frac{c}{L+2c} \right)^3 - \left(\frac{c}{L+2c} \right)^4 \right] \\
 &= \frac{0,367(750)^3}{24 \cdot 23666,729 \cdot 28125000} \left[\frac{5}{16} - \frac{5 \cdot 75}{2(750)} + 6 \left(\frac{75}{750} \right)^2 - 4 \left(\frac{75}{750} \right)^3 - \left(\frac{75}{750} \right)^4 \right] \\
 &= 1,146 \times 10^{-6} \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Akibat beban kerja



Gambar 4.32 Pembebanan terpusat akibat beban kerja

$$\begin{aligned}
 M_a &= \frac{1}{2} \cdot P(200) \\
 &= 3203860,2 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

Nilai momen akibat beban kerja lebih besar dari nilai momen retak $M_a > M_{cr}$ berarti pada balok terjadi retak. Jadi untuk perhitungan lendutan digunakan nilai momen inersia penampang dengan memperhitungkan pengaruh retak pada beton. Perhitungan momen inersia efektif:

$$\begin{aligned}
 I_e &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left\{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right\} I_{cr} \\
 &= \left(\frac{1321811,967}{3203860,2}\right)^3 28125000 + \left\{1 - \left(\frac{1321811,967}{3203860,2}\right)^3\right\} 1513145,234 \\
 &= 3381948,183 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Perhitungan lendutan seketika balok pada daerah I:

$$\begin{aligned}
 \delta_L &= \frac{0,5 \cdot P_1 \cdot a}{24EI_g} (3L^2 - 4a^2) \\
 &= \frac{0,5 \cdot 22002,518 \cdot 200}{24 \cdot 23666,729 \cdot 28125000} (3 \cdot 600^2 - 4 \cdot 200^2) \\
 &= 0,127 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\delta_I = \delta_L + \delta_D = 0,127 \text{ mm}$$

Perhitungan lendutan seketika balok pada daerah II:

$$\begin{aligned}
 \delta_L &= \frac{0,5 \cdot P_2 \cdot a}{24EI_e} (3L^2 - 4a^2) \\
 &= \frac{0,5 \cdot 32038,602 \cdot 200}{24 \cdot 23666,729 \cdot 3381948,183} (3 \cdot 600^2 - 4 \cdot 200^2) \\
 &= 1,534 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\delta_{II} = \delta_L + \delta_D = 1,534 \text{ mm}$$

Perhitungan lendutan seketika balok pada daerah III:

$$\begin{aligned}
 \delta_L &= \frac{0,5 \cdot P_3 \cdot a}{24EI_{cr}} (3L^2 - 4a^2) \\
 &= \frac{0,5 \cdot 334827,833 \cdot 200}{24 \cdot 23666,729 \cdot 1513145,234} (3 \cdot 600^2 - 4 \cdot 200^2) \\
 &= 3,728 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\delta_{III} = \delta_L + \delta_D = 3,728 \text{ mm}$$

Dengan cara perhitungan yang sama, didapatkan nilai lendutan teoritis untuk tiap variasi piropilit seperti pada **Tabel 4.24**.

Tabel 4.24 Hasil perhitungan lendutan teoritis

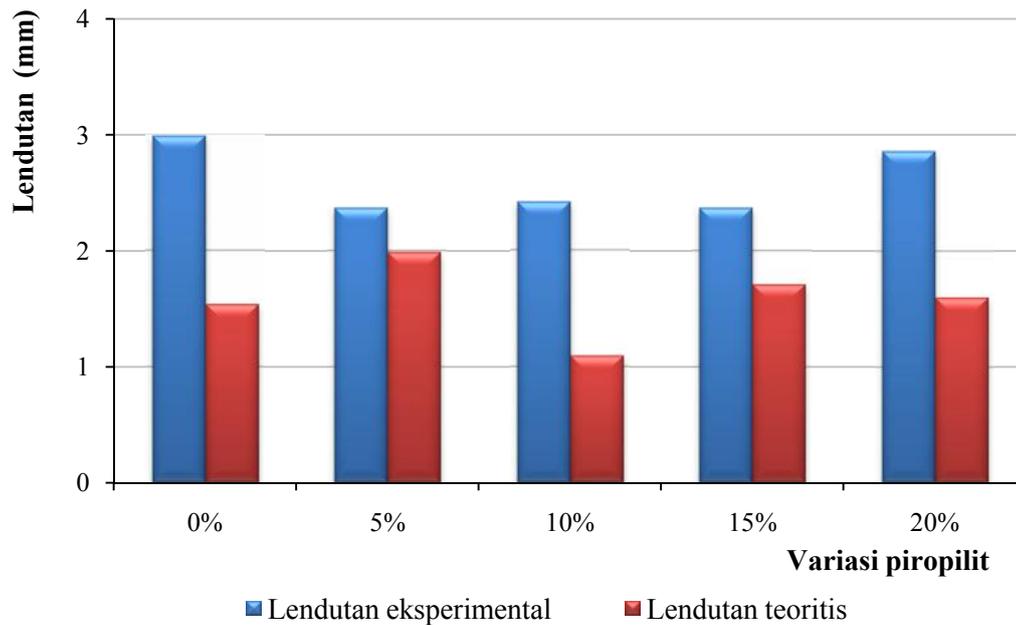
Variasi Piropilit	δ_I (mm)	δ_{II} (mm)	δ_{III} (mm)
0%	0,127	1,534	3,728
5%	0,078	1,984	4,425
10%	0,073	1,091	3,600
15%	0,086	1,707	3,754
20%	0,089	1,596	3,916

4.10 Perbandingan Lendutan Eksperimental dan Teoritis

Nilai lendutan maksimum eksperimental merupakan besarnya lendutan maksimum rata-rata pada daerah *serviceability* untuk variasi balok tertentu yang didapatkan dari hasil penelitian laboratorium dan telah diolah datanya. Sedangkan nilai lendutan teoritis merupakan nilai yang didapat dengan analisis menggunakan persamaan lendutan sebagaimana ditulis dalam kajian pustaka. Sesuai dengan pembahasan sebelumnya perbedaan nilai lendutan balok pada tiap variasi piropilit merupakan pengaruh dari mutu beton dan besarnya beban maksimum yang mampu ditahan balok. Perbandingan besarnya lendutan maksimum dari hasil penelitian dan teoritis dapat ditampilkan seperti pada **Tabel 4.25**. Berdasar tabel tersebut selanjutnya digambarkan diagram untuk lebih memperjelas perbandingan antara lendutan hasil penelitian dan teoritis.

Tabel 4.25 Perbandingan lendutan maksimum eksperimental dan teoritis pada puncak daerah *serviceability*

Variasi piropilit	P (N)	f'_c (MPa)	E (MPa)	$\delta_{eksperimen}$ (mm)	$\delta_{teoritis}$ (mm)	KR (%)
0%	32038,602	25,356	23666,729	2,982	1,534	48,558
5%	26816,610	14,515	17909,405	2,364	1,984	16,0745
10%	26559,065	22,249	22169,856	2,412	1,091	54,768
15%	26626,582	18,761	20357,023	2,364	1,707	27,792
20%	27014,587	17,500	19661,511	2,856	1,596	44,118



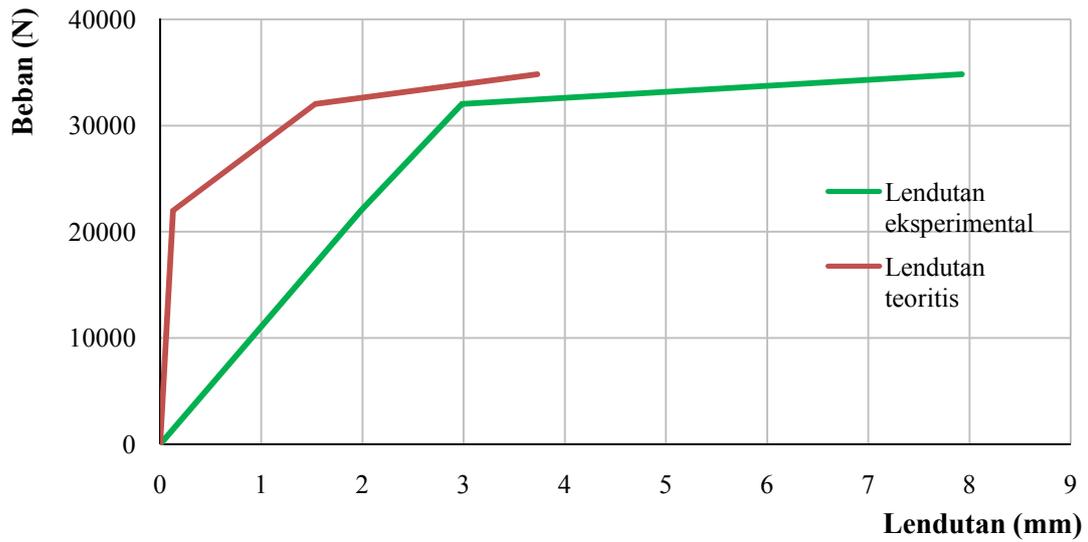
Gambar 4.33 Perbandingan lendutan maksimum eksperimental dan teoritis pada daerah *serviceability*

Dari gambar tersebut terlihat bahwa terdapat perbedaan antara lendutan hasil laboratorium dan lendutan hasil perhitungan teoritis. Perbedaan nilai lendutan yang tertinggi terjadi pada balok dengan variasi piropilit 10% yaitu sebesar 54,768%. Sedangkan perbedaan antara lendutan laboratorium dan teoritis paling rendah terjadi pada balok dengan variasi 5% piropilit yaitu sebesar 16,0754%.

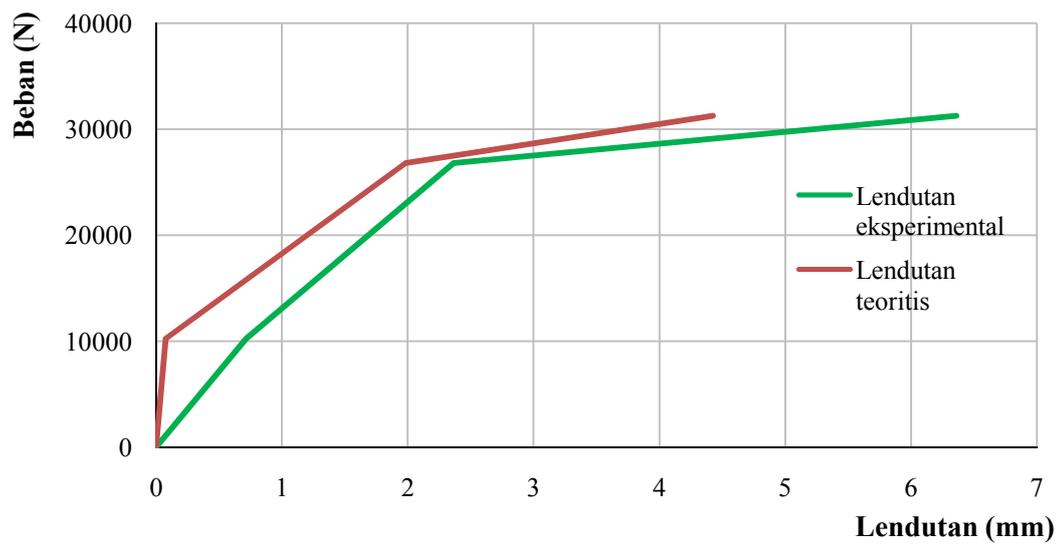
Untuk mengetahui perbandingan lendutan yang terjadi pada balok dari hasil eksperimen dan perhitungan teoritis, dapat dibandingkan berdasar grafik hubungan beban-lendutannya. Perbandingan nilai lendutan untuk tiap taraf retak ditunjukkan pada **Tabel 4.26**. berdasar tabel tersebut dapat dibuat grafik perbandingan hubungan beban-lendutan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.34-4.38**.

Tabel 4.26 Perbandingan lendutan hasil eksperimen dan perhitungan teoritis

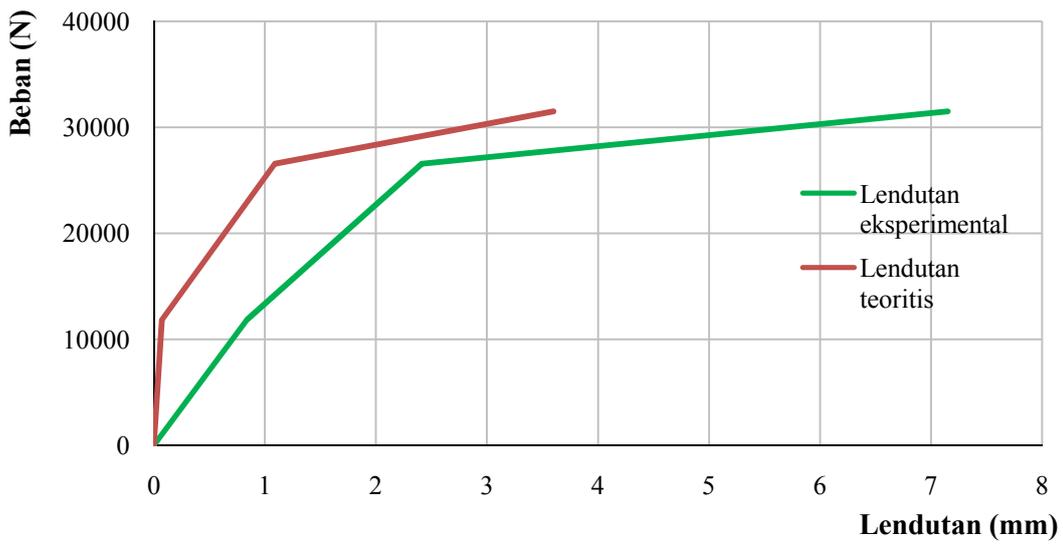
Variasi Piropilit	δ_I (mm)		δ_{II} (mm)		δ_{III} (mm)	
	eksperimen	teoritis	eksperimen	teoritis	eksperimen	teoritis
0%	1,983	0,127	2,982	1,534	7,924	3,728
5%	0,715	0,078	2,364	1,984	6,362	4,425
10%	0,837	0,073	2,412	1,091	7,151	3,600
15%	0,971	0,086	2,364	1,707	9,058	3,754
20%	1,148	0,089	2,856	1,596	6,335	3,916



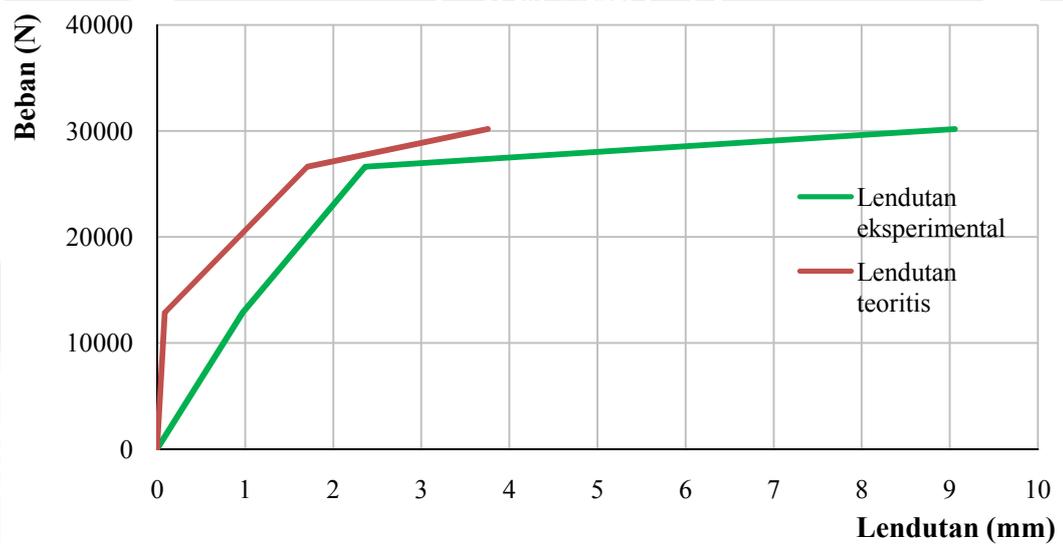
Gambar 4.34 Perbandingan hubungan beban-lendutan eksperimental dan teoritis balok 0% piropilit



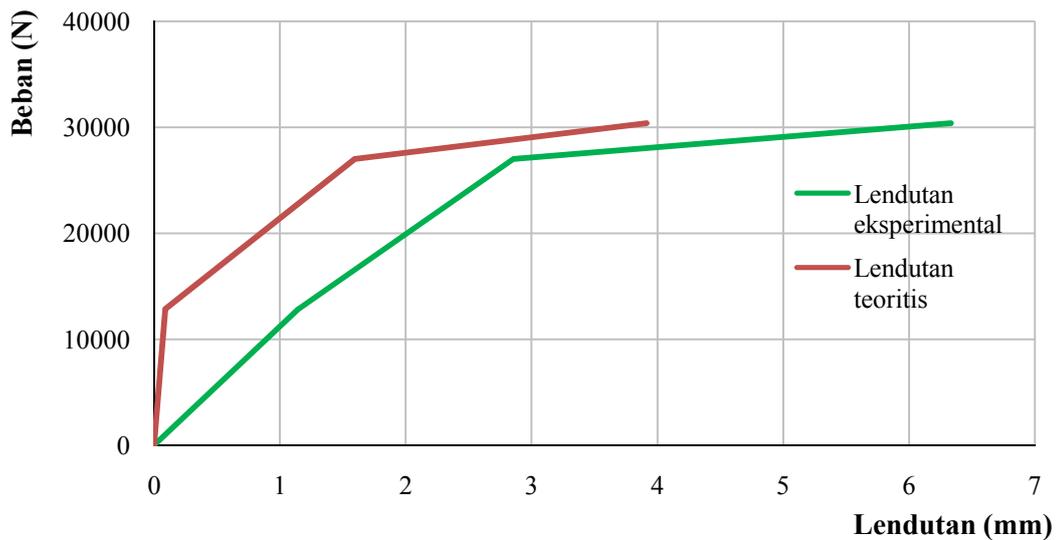
Gambar 4.35 Perbandingan hubungan beban-lendutan eksperimental dan teoritis balok 5% piropilit



Gambar 4.36 Perbandingan hubungan beban-lendutan eksperimental dan teoritis balok 10% piropilit



Gambar 4.37 Perbandingan hubungan beban-lendutan eksperimental dan teoritis balok 15% piropilit

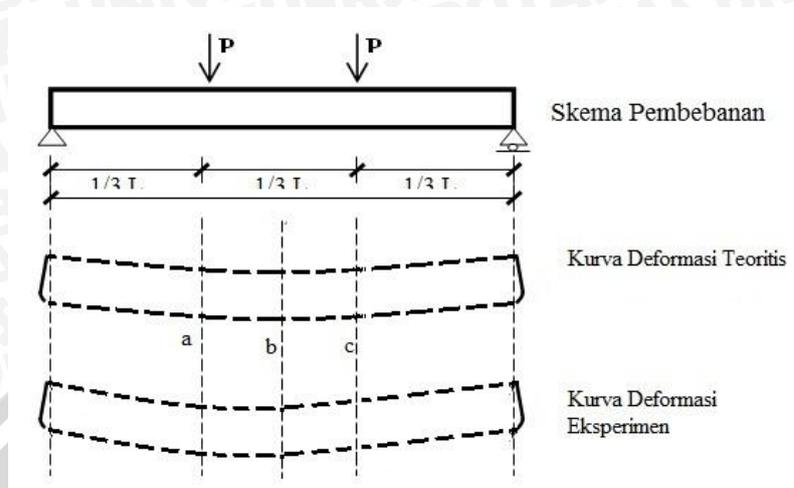


Gambar 4.38 Perbandingan hubungan beban-lendutan eksperimental dan teoritis balok 20% piropilit

Berdasar gambar perbandingan beban-lendutan antara hasil eksperimen dengan perhitungan teoritis terlihat bahwa terdapat perbedaan daerah-daerah lendutan. Perbedaan tersebut terjadi pada daerah I sebelum terjadi retak, daerah II sebagai area kemampuan layan/*serviceability*, dan daerah III pasca *serviceability*. Pada daerah I, terlihat bahwa lendutan yang hasil teoritis lebih rendah dibanding lendutan hasil eksperimen. Hal tersebut juga terjadi pada daerah kemampuan layan. Daerah ini ditandai dengan terjadinya retak awal pada beton dan berakhir pada lendutan dengan beban mendekati 70% dari beban maksimum. Pada lendutan teoritis perpindahan daerah lendutan antara daerah II dan III terjadi pada beban yang lebih rendah dari hasil eksperimen. Dengan beban yang lebih rendah tersebut juga mempengaruhi lendutan yang lebih rendah pula bila dibanding dengan lendutan eksperimental. Jadi dapat dinyatakan bahwa untuk beban yang sama pada daerah *serviceability* lendutan hasil teoritis lebih rendah dibanding dengan lendutan hasil percobaan laboratorium.

Perbedaan yang terjadi antara lendutan laboratorium dengan hasil perhitungan teoritis dipengaruhi berbagai hal. Salah satu yang mempengaruhinya adalah *setting up* peralatan dan cara pengujian lendutan yang dilakukan. Secara teori lendutan yang terjadi pada balok dengan sistem pembebanan *4 point bending test* akan membentuk kurva lendutan yang simetri dengan lendutan maksimum pada tengah bentang. Namun pada kondisi sebenarnya dapat dimungkinkan terjadinya lendutan yang tidak simetri, akibat adanya pergeseran horizontal pada ujung tumpuan. Dengan kondisi tersebut akan mengakibatkan adanya perbedaan lendutan pada sisi kanan dan kiri balok.

Seharusnya pada pengukuran lendutan tengah bentang, juga harus memperhitungkan adanya perbedaan lendutan tersebut.



Gambar 4.39 Perbandingan kurva deformasi teoritis dan eksperimen

Untuk menghasilkan lendutan eksperimen dan teoritis yang tidak terlalu besar perbedaannya, dapat dilakukan dengan pengukuran lendutan pada tiga titik yaitu tengah bentang (b), sisi kanan (a), dan kiri dari balok (c). Lendutan pada tengah bentang dapat dihitung dengan mengurangi lendutan hasil pengukuran pada titik b dengan rata-rata pengukuran lendutan pada titik a dan c.

4.11 Uji Statistik Lendutan

Analisis statistik pada lendutan analisis juga bertujuan untuk membandingkan lendutan yang terjadi pada setiap variasi piropilit. Pada analisis statistik ini terdapat satu variabel penentu yang selanjutnya disebut sebagai group A. Variabel Group A terdapat lima jenis yaitu variasi persentase piropilit 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Pada analisis ini digunakan uji *ANOVA* (*Analysis of Variance*) satu jalur.

4.11.1 Lendutan maksimum *serviceability*

Penyelesaian *ANOVA* untuk membandingkan lendutan puncak *serviceability* digunakan hipotesis sebagai berikut:

H_a : Terdapat perbedaan yang signifikan pada lendutan akibat adanya variasi persentase piropilit sebagai pengganti agregat halus.

H_0 : Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada lendutan akibat adanya variasi persentase piropilit sebagai pengganti agregat halus.

Tabel 4.27 Data uji statistik lendutan maksimum *serviceability*

	0%			5%			10%			15%			20%			Total
	x	x ²	(x-x _r) ²	X	x ²	(x-x _r) ²	x	x ²	(x-x _r) ²	x	x ²	(x-x _r) ²	x	x ²	(x-x _r) ²	
	2,714	7,366	0,0244	2,267	5,139	0,0017	2,447	5,988	0,0190	1,945	3,783	0,0896	2,278	5,189	0,002739	
	2,809	7,890	0,0632	2,497	6,235	0,0738	1,880	3,534	0,1843	2,276	5,180	0,0010	2,334	5,448	1,34.10 ⁻⁵	
	2,150	4,623	0,1662	1,912	3,656	0,0982	2,601	6,765	0,0851	2,512	6,310	0,0716	2,379	5,660	0,0024	
Statistik																
n	3			3			3			3			3		15	
$\sum x_i$	7,673			6,676			6,928			6,733			6,991		35,001	
$\sum x_i^2$		19,879			15,030			16,287			15,273			16,296	82,766	
Xrata	2,558			2,225			2,309			2,244			2,330			
varian			0,1269			0,08686			0,14417			0,08112			0,00256	

Dari tabel data uji statistik lendutan maksimum, dilakukan uji *ANOVA* dengan perhitungan sebagai berikut:

Jumlah kuadrat total (JK_A) :

$$\begin{aligned} JK_A &= \sum \frac{(\sum X_i^2)}{n_i} - \frac{(\sum X_T)^2}{N} \\ &= \left(\frac{7,673^2}{3} + \frac{6,676^2}{3} + \frac{6,928^2}{3} + \frac{6,733^2}{3} + \frac{6,991^2}{3} \right) - \frac{35,001^2}{15} \\ &= 81,883 - 81,671 \\ &= 0,211 \end{aligned}$$

Jumlah kuadrat dalam antar group (JK_D) :

$$\begin{aligned} JK_D &= \sum X_i^2 - \sum \frac{(\sum X_i^2)}{n_i} \\ &= 82,766 - 81,883 \\ &= 0,883 \end{aligned}$$

Derajat bebas:

$$db_A = A - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$db_D = N - A = 15 - 5 = 10$$

Kuadrat rerata antar grup:

$$KR_A = \frac{JK_A}{db_A} = \frac{0,211}{4} = 0,053$$

$$KR_D = \frac{JK_D}{db_D} = \frac{0,883}{10} = 0,088$$

F_{hitung} masing-masing grup:

$$F_{A hitung} = \frac{KR_A}{KR_D} = \frac{0,053}{0,088} = 0,599$$

F_{tabel} dengan taraf signifikansi 0,05:

$$F_{A tabel} = F_{A(0,05)(4,10)} = 3,48$$

Berdasar F_{hitung} dan F_{tabel} dapat ditentukan bahwa:

$$F_{A hitung} < F_{A tabel}$$

Dari uji *ANOVA* didapatkan $F_A \text{ hitung} < F_A \text{ tabel}$ atau $0,599 < 3,48$ dengan taraf signifikansi 0,05. Karena $F_A \text{ hitung}$ kurang dari $F_A \text{ tabel}$ maka H_0 diterima dan H_a ditolak. Artinya tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada lendutan akibat adanya variasi persentase piropilit sebagai pengganti agregat halus.

4.11.2 Lendutan daerah *serviceability* dengan beban yang sama

Penyelesaian *ANOVA* untuk membandingkan lendutan daerah *serviceability* dengan beban yang sama yaitu 21610,420 N digunakan hipotesis sebagai berikut:

H_a : Terdapat perbedaan yang signifikan pada lendutan akibat adanya variasi persentase piropilit sebagai pengganti agregat halus.

H_0 : Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada lendutan akibat adanya variasi persentase piropilit sebagai pengganti agregat halus.



Tabel 4.28 Data uji statistik lendutan daerah *serviceability* dengan beban yang sama

Statistik	0%			5%			10%			15%			20%			Total
	x	x ²	(x-x _r) ²	x	x ²	(x-x _r) ²	x	x ²	(x-x _r) ²	x	x ²	(x-x _r) ²	x	x ²	(x-x _r) ²	
	2,011	4,044	0,0091	1,715	2,940	0,0120	2,109	4,447	0,0515	1,575	2,482	0,0796	2,172	4,718	0,000874	
	1,871	3,499	0,0020	1,985	3,942	0,0260	1,564	2,446	0,1010	1,806	3,262	0,0027	1,877	3,522	0,0707	
	1,865	3,478	0,0026	1,773	3,142	0,0027	1,973	3,892	0,0083	2,191	4,802	0,1114	2,379	5,659	0,0558	
n	3			3			3			3			3		15	
∑xi	5,747			5,473			5,646			5,573			6,428		28,866	
∑xi ²		11,022			10,024			10,786			10,546			13,900	56,277	
Xrata	1,916			1,824			1,882			1,858			2,143			
varian			0,00684			0,02035			0,08039			0,0968			0,063682	

Dari tabel data uji statistik lendutan maksimum, dilakukan uji *ANOVA* dengan perhitungan sebagai berikut:

Jumlah kuadrat total (JK_A) :

$$\begin{aligned} JK_A &= \sum \frac{(\sum X_i^2)}{n_i} - \frac{(\sum X_T)^2}{N} \\ &= \left(\frac{5,747^2}{3} + \frac{5,473^2}{3} + \frac{5,646^2}{3} + \frac{5,573^2}{3} + \frac{6,428^2}{3} \right) - \frac{28,866^2}{15} \\ &= 55,741 - 55,548 \\ &= 0,192 \end{aligned}$$

Jumlah kuadrat dalam antar group (JK_D) :

$$\begin{aligned} JK_D &= \sum X_i^2 - \sum \frac{(\sum X_i^2)}{n_i} \\ &= 56,277 - 55,741 \\ &= 0,536 \end{aligned}$$

Derajat bebas:

$$db_A = A - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$db_D = N - A = 15 - 5 = 10$$

Kuadrat rerata antar grup:

$$KR_A = \frac{JK_A}{db_A} = \frac{0,192}{4} = 0,048$$

$$KR_D = \frac{JK_D}{db_D} = \frac{0,536}{10} = 0,054$$

F_{hitung} masing-masing grup:

$$F_{A hitung} = \frac{KR_A}{KR_D} = \frac{0,048}{0,054} = 0,895$$

F_{tabel} dengan taraf signifikansi 0,05:

$$F_{A tabel} = F_{A(0,05)(4,10)} = 3,48$$

Berdasar F_{hitung} dan F_{tabel} dapat ditentukan bahwa:

$$F_{A hitung} < F_{A tabel}$$

Dari uji *ANOVA* didapatkan $F_A \text{ hitung} < F_A \text{ tabel}$ atau $0,895 < 3,48$ dengan taraf signifikansi 0,05. Karena $F_A \text{ hitung}$ kurang dari $F_A \text{ tabel}$ maka H_0 diterima dan H_a ditolak. Artinya tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada lendutan akibat adanya variasi persentase piropilit sebagai pengganti agregat halus.

