

BAB 5

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Umum

Pada bab ini disajikan data, analisis, dan pembahasan seluruh tahapan pada penelitian ini. Pada subbab 5.2 berisi data pemeriksaan karakteristik material agregat halus dan jaring kawat (*wire mesh*) yang digunakan, serta membahas komposisi material untuk benda uji silinder mortar dan beton busa, serta komposisi material untuk benda uji panel dinding. Pada subbab 5.3 berisi perhitungan dan pembahasan kuat tekan benda uji silinder mortar dan beton busa, serta kuat tekan benda uji panel dinding. Pada subbab 5.4 berisi perhitungan dan pembahasan kuat lentur benda uji panel dinding. Pada subbab 5.5 berisi perhitungan dan pembahasan kuat geser diagonal benda uji panel dinding.

5.2 Komposisi Material

5.2.1 Agregat Halus

Agregat halus merupakan salah satu komposisi utama dalam penelitian ini. Pada subbab ini dibahas pemeriksaan karakteristik agregat halus. Pemeriksaan karakteristik agregat halus dilakukan untuk mengetahui karakteristik agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini. Data yang diperoleh merupakan suatu parameter yang perlu diketahui dalam proses perencanaan dan pembuatan seluruh benda uji. Data yang diperoleh dari pemeriksaan agregat halus selanjutnya digunakan untuk perhitungan komposisi material seluruh benda uji dalam penelitian ini. Berikut ini pemeriksaan yang dilakukan terhadap agregat halus.

1. Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat halus

Berat jenis agregat halus adalah perbandingan antara berat agregat halus dan berat air murni dalam volume yang sama dengan suhu yang ditentukan. Penyerapan air agregat halus adalah perbandingan antara berat air yang mampu diserap agregat halus dengan berat kering mutlak agregat halus dan nilainya dinyatakan dalam persen. Hasil pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air

agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini.

Tabel 5.1 Hasil pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat halus

Uraian		Hasil pemeriksaan
Berat pasir kering mutlak, (Bk)	gram	485,50
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (Bu)	gram	500,00
Berat piknometer berisi pasir dan air (Bt)	gram	1159,70
Berat piknometer berisi air (B)	gram	846,00
Berat jenis curah = $Bk / (B + Bu - Bt)$		2,61
Berat jenis jenuh kering muka = $Bu / (B + Bu - Bt)$		2,68
Berat jenis semu = $Bk / (B + Bk - Bt)$		2,83
Penyerapan air = $((Bu - Bk) / Bk) \times 100\%$	%	2,99

Berdasarkan hasil pemeriksaan berat jenis di atas, didapatkan berat jenis jenuh kering muka agregat halus sebesar 2,68. Menurut SK SNI -T15-1991-03, hasil pemeriksaan berat jenis jenuh kering permukaan terhadap agregat halus yang digunakan menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan termasuk ke dalam jenis agregat normal yaitu agregat dengan berat jenis berkisar antara 2,40-2,90. Hasil penyerapan air agregat halus yang digunakan didapatkan sebesar 2,99%. Berdasarkan ASTM C128, hasil pemeriksaan penyerapan air tersebut menunjukkan bahwa penyerapan air agregat halus yang digunakan lebih tinggi dari batas maksimum penyerapan air agregat halus pada umumnya yaitu 2%.

2. Pemeriksaan berat volume agregat halus

Berat volume agregat halus adalah perbandingan antara berat agregat halus dan volume agregat halus dalam kondisi jenuh kering permukaan. Dalam penelitian ini dilakukan pemeriksaan berat volume gembur dan padat agregat halus. Berikut adalah hasil pemeriksaan berat volume agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini.

a. Berat volume gembur agregat halus

Berat volume gembur agregat halus adalah perbandingan antara berat agregat halus dan volume agregat halus tanpa pemadatan. Hasil pemeriksaan berat volume gembur agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut ini.

Tabel 5.2 Hasil pemeriksaan berat volume gembur agregat halus

Uraian		Hasil pemeriksaan
Berat tabung (W1)	gram	12450
Berat tabung + agregat halus kering tungku (W2)	gram	20950
Berat agregat (W3)	gram	8500
Volume tabung (V)	cm ³	5263,425
Berat volume gembur (W3/V)	gram/cm ³	1,615
Diameter tabung	cm	15
Tinggi tabung	cm	29,8
Luas alas tabung	cm ²	176,625

Menurut ASTM C 29, agregat normal memiliki berat volume berkisar antara 1,2-1,75 gram/cm³. Berdasarkan pada hasil pemeriksaan agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini, didapatkan berat volume gembur agregat halus sebesar 1,615 gram/cm³. Oleh karena itu, agregat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikategorikan ke dalam agregat normal.

b. Berat volume padat agregat halus

Berat volume padat agregat halus adalah perbandingan antara berat agregat halus dan volume agregat halus dengan pemadatan. Hasil pemeriksaan berat volume padat agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut ini.

Tabel 5.3 Hasil pemeriksaan berat volume padat agregat halus

Uraian		Hasil pemeriksaan
Berat tabung (W1)	gram	12450
Berat tabung + agregat halus kering tungku (W2)	gram	21850
Berat agregat (W3)	gram	9400
Volume tabung (V)	cm ³	5263,425
Berat volume padat (W3/V)	gram/cm ³	1,786
Diameter tabung	cm	15
Tinggi tabung	cm	29,8
Luas alas tabung	cm ²	176,625

Hasil pemeriksaan agregat halus yang digunakan didapatkan berat volume gembur agregat halus sebesar 1,786 gram/cm³. Berdasarkan hasil tersebut, penambahan berat volume diakibatkan proses pemadatan agregat halus. Pemadatan tersebut mengakibatkan *void* dalam tabung berkurang dan digantikan oleh butiran agregat halus.

3. Pemeriksaan kadar lumpur agregat halus

Kadar lumpur agregat halus adalah persentase kadar lumpur pada agregat halus. Pemeriksaan kadar lumpur pada agregat halus sangat perlu dilakukan karena lumpur pada agregat halus dapat mempengaruhi kualitas beton yang dibuat menggunakan agregat halus tersebut. Hasil pemeriksaan kadar lumpur pada agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut ini.

Tabel 5.4 Hasil pemeriksaan kadar lumpur pada agregat halus

Uraian		Hasil pengujian
Berat agregat kering oven (W1)	gram	500
Berat agregat kering oven setelah dicuci (W2)	gram	492,8
Berat yang lolos saringan no.200 [(W1-W2)/W1]x100%	%	1,44

Hasil pemeriksaan kadar lumpur agregat halus yang digunakan adalah 1,44%. Menurut SNI 03-6821-2002, kadar lumpur maksimum agregat halus

adalah 5%, maka agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan tersebut.

4. Pemeriksaan modulus halus butir (MHB) agregat halus

Modulus halus butir (MHB) adalah indeks yang digunakan untuk mengukur tingkat kehalusan dan kekasaran butiran-butiran agregat. MHB diperoleh dari jumlah persen kumulatif dari butiran agregat yang tertinggal di suatu ayakan dibagi seratus. Hasil pemeriksaan modulus halus butir agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut ini.

Tabel 5.5 Hasil pemeriksaan modulus halus butir agregat halus (Analisa saringan)

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gram)	Persen tertinggal (%)	Berat tertinggal kumulatif (%)	Persen lolos kumulatif (%)
40,00	0	0,00	0,00	100,00
20,00	0	0,00	0,00	100,00
10,00	0	0,00	0,00	100,00
4,80	46,8	2,34	2,34	97,66
2,40	280,2	14,03	16,37	83,63
1,20	477,4	23,91	40,28	59,72
0,60	597,1	29,90	70,18	29,82
0,30	364,4	18,25	88,43	11,57
0,15	176,2	8,82	97,25	2,75
Sisa	54,9	2,75	100	-
Jumlah	1997	100	314,86	-

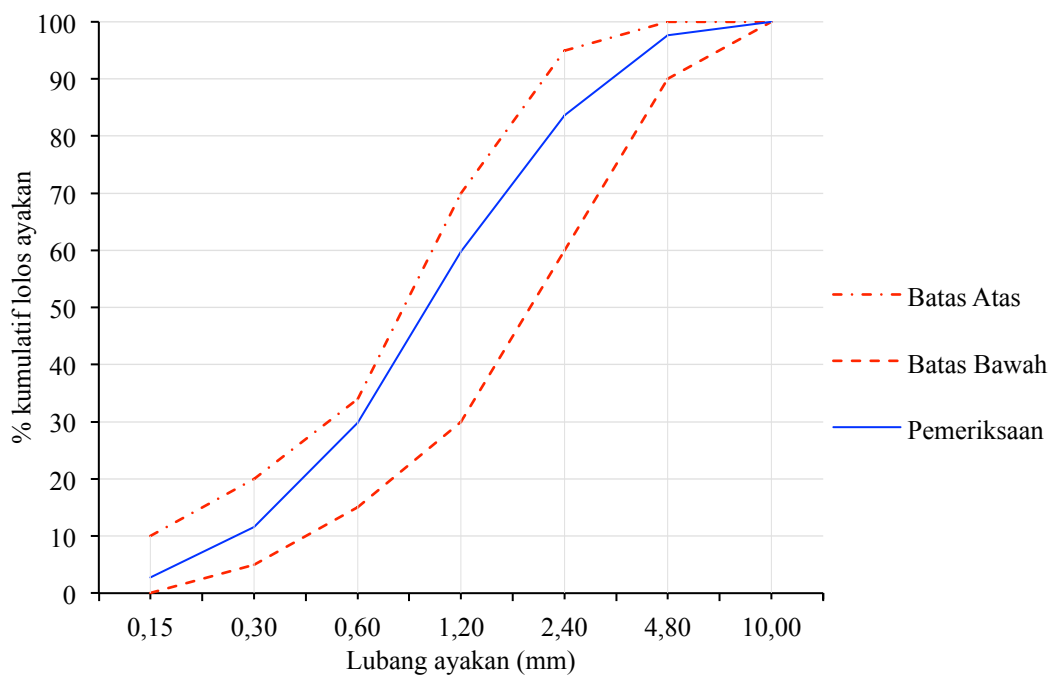
Nilai modulus halus butir agregat halus pada penelitian ini adalah sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned} \text{MHB} &= \frac{\text{Berat tertinggal kumulatif}}{100} = \frac{314,86}{100} \\ &= 3,1486 \end{aligned}$$

Menurut ASTM C 33, nilai modulus halus butir agregat halus tidak boleh kurang dari 2,3 dan tidak boleh lebih dari 3,1. Apabila tidak memenuhi, maka harus dilakukan penyesuaian antara agregat halus dan agregat kasar. Agregat yang digunakan dalam penelitian ini hanya agregat halus dan tidak

menggunakan agregat kasar atau agregat lainnya, maka tidak perlu melakukan penyesuaian antara agregat halus dan agregat kasar.

Hasil pemeriksaan pada Tabel 5.5 selanjutnya digunakan untuk menentukan daerah gradasi agregat halus. Dasar penentuan gradasi agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.5. Berdasarkan hasil pemeriksaan, persen kumulatif lolos ayakan yang diplot pada grafik daerah gradasi dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut ini.



Gambar 5.1 Hasil pemeriksaan analisa saringan agregat halus

Berdasarkan pada gambar di atas, gradasi agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini tergolong ke dalam gradasi daerah 1, atau disebut juga pasir kasar.

5.2.2 Jaring Kawat (*Wire mesh*)

Jaring kawat (*wire mesh*) merupakan material yang digunakan sebagai perkuatan panel dinding. Pada subbab ini dibahas karakteristik jaring kawat (*wire mesh*) berupa kuat tarik (tegangan leleh) dan tegangan putus (f_u) jaring kawat

(*wire mesh*) yang digunakan. Kuat tarik jaring kawat (*wire mesh*) adalah tegangan maksimum yang mampu diterima oleh jaring kawat (*wire mesh*) ketika ditarik atau diregangkan sebelum jaring kawat (*wire mesh*) tersebut patah. Pemeriksaan kuat tarik jaring kawat dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.

Rekapitulasi perhitungan hasil pemeriksaan kuat tarik jaring kawat (*wire mesh*) dapat dilihat pada Tabel 5.6. Contoh perhitungan data hasil pemeriksaan kuat tarik jaring kawat (*wire mesh*) adalah sebagai berikut.

$$\text{Berat kawat per meter benda uji 1 (W)} = 165,3 \text{ gram} = 0,1653 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Diameter kawat (d)} &= 12,74 \sqrt{W} \\ &= 12,74 \sqrt{0,1653} \text{ mm} = 5,18 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas penampang (A)} &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times D^2 \\ &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 5,18^2 = 21,06 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan putus (fu)} &= \frac{P_{\text{maks}}}{A} \\ &= \frac{13341,6}{21,06} = 633,47 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan leleh (fy)} &= \frac{P_{\text{leleh}}}{A} \\ &= \frac{13243,5}{21,06} = 628,81 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tabel 5.6 Rekapitulasi perhitungan kuat tarik jaring kawat (*wire mesh*)

No	Diameter pengenal	Berat per meter (gram)	Diameter penampang (mm)	Luas penampang (mm ²)	Beban ketika leleh (N)	fy (MPa)	Beban maksimum (N)	fu (MPa)
1	M5	165,3	5,18	21,06	13243,5	628,81	13341,6	633,47
2	M5	164,7	5,17	20,98	13341,6	635,78	13537,8	645,13
3	M5	165,6	5,18	21,10	13292,55	630,00	13341,6	632,32
4	M5	165,0	5,18	21,02	13341,6	634,62	13439,7	639,29
5	M5	165,5	5,18	21,10	13341,6	632,32	13439,7	636,97
6	M5	164,0	5,16	20,90	13317,075	637,32	13390,65	640,84

5.2.3 Mortar dan Beton Busa

Mortar dan beton busa merupakan material penyusun panel dinding. Pada subbab ini dibahas komposisi material yang digunakan untuk membuat benda uji silinder mortar dan beton busa. Benda uji silinder mortar dan beton busa selanjutnya dihitung kuat tekannya dalam subbab berikutnya untuk mendapatkan komposisi yang menghasilkan kuat tekan maksimum. Dalam perhitungan ini digunakan *safety* 30% untuk menyesuaikan dengan kondisi alat yang kotor dan mengakibatkan campuran material berkurang cukup besar. Berikut ini perhitungan komposisi material mortar dan beton busa.

1. Komposisi material untuk mortar

Perhitungan komposisi material untuk mortar dilakukan untuk mengetahui komposisi campuran semen, pasir, dan air untuk tiap benda uji silinder mortar. Tahap 1 dibuat 3 komposisi material mortar, yaitu 1PC:2PS, 1PC:3PS, 1PC:4PS. Selanjutnya, digunakan berat volume masing-masing bahan untuk perhitungan kebutuhan material tiap benda uji. Berikut ini adalah contoh perhitungan komposisi 1PC:2PS.

Berat volume gembur pasir	= 1,615 gram/cm ³
Berat volume semen	= 40/0,0192 kg/m ³
Berat volume air	= 1,0 gram/cm ³
Faktor air semen (Fas)	= 0,65
Tinggi benda uji (Silinder)	= 20 cm
Diameter benda uji (Silinder)	= 10 cm

Dengan menggunakan data tersebut, maka dapat dihitung kebutuhan berat semen, pasir, dan air untuk tiap benda uji silinder mortar. Berikut ini contoh perhitungan kebutuhan berat semen, pasir, dan air untuk tiap benda uji silinder mortar.

$$\begin{aligned}\text{Volume semen} &= \frac{1}{3} \times \text{Volume benda uji} \\ &= \frac{1}{3} \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \times 20 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

$$= \frac{1}{3} \times 1732,5 \text{ cm}^3$$

$$= 577,50 \text{ cm}^3$$

Berat semen = Volume semen \times Berat volume semen

$$= 577,5 \text{ cm}^3 \times \frac{40 \times 10^3}{0,0192 \times 10^6} \text{ gram/cm}^3$$

$$= 1203,125 \text{ gram}$$

Safety semen 30% = Berat semen \times 30%

$$= 1203,125 \text{ gram} \times 30\%$$

$$= 360,94 \text{ gram}$$

Volume pasir = $\frac{2}{3} \times$ Volume benda uji

$$= \frac{2}{3} \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \times 20 \text{ cm}^3$$

$$= \frac{2}{3} \times 1732,5 \text{ cm}^3$$

$$= 1155 \text{ cm}^3$$

Berat pasir = Volume pasir \times Berat volume pasir

$$= 1155 \text{ cm}^3 \times 1,615 \text{ gram/cm}^3$$

$$= 1865,23 \text{ gram}$$

Safety pasir 30% = Berat pasir \times 30%

$$= 1865,23 \text{ gram} \times 30\%$$

$$= 559,57 \text{ gram}$$

Volume air = Faktor air semen (Fas) \times Volume semen

$$= 0,65 \times 557,50 \text{ cm}^3$$

$$= 375,38 \text{ cm}^3$$

Berat air = Volume air \times Berat Volume air

$$= 375,38 \text{ cm}^3 \times 1,0 \text{ gram/cm}^3$$

$$= 375,38 \text{ gram}$$

Safety air 30% = Berat air \times 30%

$$= 375,38 \text{ gram} \times 30\%$$

$$= 112,61 \text{ gram}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan kebutuhan berat semen, pasir, dan air untuk tiap benda uji silinder mortar yang dapat dilihat pada table 5.7 berikut ini.

Tabel 5.7 Rekapitulasi kebutuhan berat semen, pasir, dan air untuk tiap benda uji silinder mortar

Bahan	Komposisi material benda uji mortar	Volume tiap benda uji (cm ³)	Berat tiap benda uji (gram)	Safety 30% tiap benda uji (gram)	Berat total tiap benda uji (gram)
Semen	1 pc : 2 ps	577,50	1203,13	360,94	1564,06
	1 pc : 3 ps	433,13	902,34	270,70	1173,05
	1 pc : 4 ps	346,50	721,88	216,56	938,44
Pasir	1 pc : 2 ps	1155,00	1865,23	559,57	2424,80
	1 pc : 3 ps	1299,38	2098,38	629,52	2727,90
	1 pc : 4 ps	1386,00	2238,28	671,48	2909,76
Air	1 pc : 2 ps	375,38	375,38	112,61	487,99
	1 pc : 3 ps	281,53	281,53	84,46	365,99
	1 pc : 4 ps	225,23	225,23	67,57	292,79

2. Komposisi material untuk beton busa (*foam concrete*)

Perhitungan komposisi material untuk beton busa dilakukan untuk mengetahui komposisi semen, pasir, air dan tambahan busa (*foam agent*) untuk tiap benda uji silinder beton busa (*foam concrete*). Tahap 1 dibuat 3 komposisi benda uji silinder beton busa (*foam concrete*), yaitu 1PC:3PS +40% busa (*foam*), 1PC:3PS +50% busa (*foam*), dan 1PC:3PS +60% busa (*foam*). Berikut ini adalah contoh perhitungan kebutuhan bahan untuk benda uji silinder beton busa dengan komposisi 1PC:3PS + 40% busa (*foam*).

$$\text{Berat volume gembur pasir} = 1,615 \text{ gram/cm}^3$$

$$\text{Berat volume semen} = 40/0,0192 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Berat volume air} = 1,0 \text{ gram/cm}^3$$

$$\text{Faktor air semen (Fas)} = 0,65$$

$$\text{Tinggi benda uji (Silinder)} = 20 \text{ cm}$$

$$\text{Diameter benda uji (Silinder)} = 10 \text{ cm}$$

Menggunakan data tersebut, selanjutnya dihitung kebutuhan berat semen, pasir, air, dan busa (*foam*) untuk tiap benda uji silinder beton busa. Berikut ini contoh perhitungan kebutuhan berat semen, pasir, air, dan busa (*foam*) untuk tiap benda uji silinder beton busa.

$$\begin{aligned}
 \text{Volume semen} &= \frac{1}{4} \times \text{Volume benda uji} \\
 &= \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \times 20 \text{ cm}^3 \\
 &= \frac{1}{4} \times 1732,5 \text{ cm}^3 \\
 &= 433,13 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat semen} &= \text{Volume semen} \times \text{Berat volume semen} \\
 &= 433,13 \text{ cm}^3 \times \frac{40 \times 10^3}{0,0192 \times 10^6} \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 902,34 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety semen 30\%} &= \text{Berat semen} \times 30\% \\
 &= 902,34 \text{ gram} \times 30\% = 270,70 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume pasir} &= \frac{3}{4} \times \text{Volume benda uji} \\
 &= \frac{3}{4} \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \times 20 \text{ cm}^3 \\
 &= \frac{3}{4} \times 1732,5 \text{ cm}^3 \\
 &= 1299,38 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat pasir} &= \text{Volume pasir} \times \text{Berat volume pasir} \\
 &= 1299,38 \text{ cm}^3 \times 1,615 \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 2098,38 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety pasir 30\%} &= \text{Berat pasir} \times 30\% \\
 &= 2098,38 \text{ gram} \times 30\% \\
 &= 629,52 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume air} &= \text{Faktor air semen (Fas)} \times \text{Volume semen} \\
 &= 0,65 \times 433,13 \text{ cm}^3 \\
 &= 281,53 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat air} &= \text{Volume air} \times \text{Berat Volume air} \\
 &= 281,53 \text{ cm}^3 \times 1,0 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 281,53 \text{ gram} \\
 \text{Safety air 30\%} &= \text{Berat air} \times 30\% \\
 &= 281,53 \text{ gram} \times 30\% \\
 &= 84,46 \text{ gram} \\
 \text{Volume busa (40\%)} &= 40\% \times \text{Volume benda uji} \\
 &= 40\% \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \times 20 \text{ cm}^3 \\
 &= 40\% \times 1732,5 \text{ cm}^3 \\
 &= 693,00 \text{ cm}^3 \\
 &= 0,693 \text{ Liter} \\
 \text{Safety busa 30\%} &= \text{Volume busa} \times 30\% \\
 &= 0,693 \text{ Liter} \times 30\% \\
 &= 0,2079 \text{ Liter}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan kebutuhan berat semen, pasir, air, dan busa (*foam*) untuk tiap benda uji silinder beton busa yang dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut ini.

Tabel 5.8 Rekapitulasi kebutuhan berat semen, pasir, dan air untuk tiap benda uji silinder beton busa

Bahan	Komposisi penambahan busa tiap benda uji	Volume tiap benda uji (cm ³)	Berat tiap benda uji (gram)	Safety 30% tiap benda uji (gram)	Berat total tiap benda uji (gram)
Semen	40%	433,13	902,34	270,70	1173,05
	50%	433,13	902,34	270,70	1173,05
	60%	433,13	902,34	270,70	1173,05
Pasir	40%	1299,38	2098,38	629,52	2727,90
	50%	1299,38	2098,38	629,52	2727,90
	60%	1299,38	2098,38	629,52	2727,90
Air	40%	281,53	281,53	84,46	365,99
	50%	281,53	281,53	84,46	365,99
	60%	281,53	281,53	84,46	365,99

Tabel 5.9 Rekapitulasi kebutuhan volume busa untuk tiap benda uji silinder beton busa

Bahan	Komposisi penambahan busa tiap benda uji	Volume tiap benda uji (cm ³)	Volume tiap benda uji (Liter)	<i>Safety</i> 30% tiap benda uji (Liter)	Volume total tiap benda uji (Liter)
Busa	40%	693,00	0,693	0,2079	0,900
	50%	866,25	0,866	0,2599	1,126
	60%	1039,5	1,039	0,3119	1,351

5.2.4 Panel Dinding

Panel dinding merupakan benda uji utama dalam penelitian ini. Pada subbab ini dibahas komposisi material yang digunakan untuk membuat benda uji panel dinding. Komposisi material panel dinding terdiri dari material mortar dan beton busa dengan komposisi yang menghasilkan kuat tekan maksimum sebagaimana perhitungan kuat tekan pada subbab selanjutnya. Berikut ini perhitungan komposisi material mortar dan beton busa untuk benda uji panel dinding.

1. Komposisi material mortar untuk panel dinding

Perhitungan kebutuhan material mortar untuk panel dinding dilakukan untuk mengetahui komposisi material semen, pasir, dan air tiap benda uji panel dinding. Berdasarkan pengujian kuat tekan mortar, dipilih komposisi 1PC:2PS sebagai komposisi mortar untuk bagian kulit (*skin*) panel dinding. Berikut ini adalah contoh perhitungan komposisi material mortar untuk panel dinding tipikal 1.

Berat volume gembur pasir	= 1,615 gram/cm ³
Berat volume semen	= 40/0,0192 kg/m ³
Berat volume air	= 1,0 gram/cm ³
Faktor air semen (Fas)	= 0,65
Tinggi benda uji (Tipikal 1)	= 50 cm
Lebar benda uji (Tipikal 1)	= 50 cm
Tebal bagian kulit (Tipikal 1)	= 3 cm (2 bagian kulit untuk 1 benda uji panel dinding)

Data tersebut digunakan untuk menghitung kebutuhan berat semen, pasir, dan air untuk tiap lapisan kulit (*skin*) panel dinding. Berikut ini contoh perhitungan kebutuhan berat semen, pasir, dan air tiap lapisan kulit (*skin*) panel dinding.

$$\begin{aligned}
 \text{Volume semen} &= \frac{1}{3} \times \text{Volume benda uji} \\
 &= \frac{1}{3} \times 50 \times 50 \times 3 \text{ cm}^3 \\
 &= \frac{1}{3} \times 7500 \text{ cm}^3 \\
 &= 2500 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat semen} &= \text{Volume semen} \times \text{Berat volume semen} \\
 &= 2500 \text{ cm}^3 \times \frac{40 \times 10^3}{0,0192 \times 10^6} \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 5208,33 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety semen 30\%} &= \text{Berat semen} \times 30\% \\
 &= 5208,33 \text{ gram} \times 30\% \\
 &= 1562,50 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume pasir} &= \frac{2}{3} \times \text{Volume benda uji} \\
 &= \frac{2}{3} \times 50 \times 50 \times 3 \text{ cm}^3 \\
 &= \frac{2}{3} \times 7500 \text{ cm}^3 = 5000 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat pasir} &= \text{Volume pasir} \times \text{Berat volume pasir} \\
 &= 5000 \text{ cm}^3 \times 1,615 \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 8074,59 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety pasir 30\%} &= \text{Berat pasir} \times 30\% \\
 &= 8074,59 \text{ gram} \times 30\% \\
 &= 2422,38 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume air} &= \text{Faktor air semen (Fas)} \times \text{Volume semen} \\
 &= 0,65 \times 2500 \text{ cm}^3 = 1625,00 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat air} &= \text{Volume air} \times \text{Berat Volume air} \\
 &= 1625,00 \text{ cm}^3 \times 1,0 \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 1625,00 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety air 30\%} &= \text{Berat air} \times 30\% \\
 &= 1625,00 \text{ gram} \times 30\% \\
 &= 487,50 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan kebutuhan berat semen, pasir, dan air tiap lapisan kulit (*skin*) panel dinding yang dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut ini.

Tabel 5.10 Rekapitulasi perhitungan kebutuhan bahan mortar untuk lapisan kulit (*skin*) panel dinding

Benda uji	Bahan	Volume tiap benda uji (cm ³)	Berat tiap benda uji (gram)	Safety 30% tiap benda uji (gram)	Berat total tiap benda uji (gram)
PD-KTe	Semen	2500,00	5208,33	1562,50	6770,83
	Pasir	5000,00	8074,59	2422,38	10496,97
	Air	1625,00	1625,00	487,50	2112,50
PD-KLe	Semen	5000,00	10416,67	3125,00	13541,67
	Pasir	10000,00	16149,18	4844,75	20993,93
	Air	3250,00	3250,00	975,00	4225,00
PD-KGe	Semen	14400,00	30000,00	9000,00	39000,00
	Pasir	28800,00	46509,64	13952,89	60462,53
	Air	9360,00	9360,00	2808,00	12168,00

2. Komposisi material bahan beton busa (*foam concrete*) untuk panel dinding

Perhitungan kebutuhan bahan beton busa (*foam concrete*) untuk panel dinding dilakukan untuk mengetahui komposisi campuran semen, pasir, air, dan penambahan busa (*foam*) untuk tiap benda uji panel dinding. Berdasarkan pengujian tahap 1, dipilih komposisi 1PC:3PS dengan penambahan 40% busa (*foam*) untuk komposisi lapisan inti (*core*) panel dinding. Berikut ini adalah data yang diperlukan untuk perhitungan komposisi bahan beton busa (*foam concrete*) panel dinding tipikal 1.

$$\text{Berat volume gembur pasir} = 1,615 \text{ gram/cm}^3$$

$$\text{Berat volume semen} = 40/0,0192 \text{ kg/m}^3$$

Berat volume air	= 1,0 gram/cm ³
Faktor air semen (Fas)	= 0,65
Tinggi benda uji (Tipikal 1)	= 50 cm
Lebar benda uji (Tipikal 1)	= 50 cm
Tebal bagian kulit (Tipikal 1)	= 6 cm

Dengan menggunakan data tersebut, dapat dihitung kebutuhan berat semen, pasir, air, dan penambahan busa (*foam*) untuk lapisan inti (*core*) panel dinding. Berikut ini contoh perhitungan kebutuhan berat semen, pasir, air, dan busa (*foam*) untuk lapisan inti (*core*) panel dinding.

$$\begin{aligned}
 \text{Volume semen} &= \frac{1}{4} \times \text{Volume benda uji} \\
 &= \frac{1}{4} \times 50 \times 50 \times 6 \text{ cm}^3 \\
 &= \frac{1}{4} \times 15000 \text{ cm}^3 \\
 &= 3750 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat semen} &= \text{Volume semen} \times \text{Berat volume semen} \\
 &= 3750 \text{ cm}^3 \times \frac{40 \times 10^3}{0,0192 \times 10^6} \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 7812,50 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety semen 30\%} &= \text{Berat semen} \times 30\% \\
 &= 7812,50 \text{ gram} \times 30\% \\
 &= 2343,75 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume pasir} &= \frac{3}{4} \times \text{Volume benda uji} \\
 &= \frac{3}{4} \times 50 \times 50 \times 6 \text{ cm}^3 \\
 &= \frac{3}{4} \times 15000 \text{ cm}^3 \\
 &= 11250 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat pasir} &= \text{Volume pasir} \times \text{Berat volume pasir} \\
 &= 11250 \text{ cm}^3 \times 1,615 \text{ gram/cm}^3 \\
 &= 18167,83 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety pasir 30\%} &= \text{Berat pasir} \times 30\% \\
 &= 18167,83 \text{ gram} \times 30\% = 5450,35 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume air} &= \text{Faktor air semen (Fas)} \times \text{Volume semen} \\
 &= 0,65 \times 3750 \text{ cm}^3 \\
 &= 2437,50 \text{ cm}^3 \\
 \text{Berat air} &= \text{Volume air} \times \text{Berat Volume air} \\
 &= 2437,50 \text{ cm}^3 \times 1,0 \text{ gram/cm}^3 = 2437,50 \text{ gram} \\
 \text{Safety air 30\%} &= \text{Berat air} \times 30\% \\
 &= 2437,50 \text{ gram} \times 30\% = 731,25 \text{ gram} \\
 \text{Volume busa (40\%)} &= 40\% \times \text{Volume benda uji} \\
 &= 40\% \times 50 \times 50 \times 6 \text{ cm}^3 \\
 &= 40\% \times 15000 \text{ cm}^3 \\
 &= 6000 \text{ cm}^3 = 6 \text{ Liter} \\
 \text{Safety busa 30\%} &= \text{Volume busa} \times 30\% \\
 &= 6 \text{ Liter} \times 30\% = 1,8 \text{ Liter}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan kebutuhan berat semen, pasir, air, dan penambahan busa bagian inti (*core*) panel dinding yang dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut ini.

Tabel 5.11 Rekapitulasi kebutuhan material semen, pasir, dan air untuk beton busa pada panel dinding

Benda uji	Bahan	Volume tiap benda uji (cm ³)	Berat tiap benda uji (gram)	Safety 30% tiap benda uji (gram)	Berat total tiap benda uji (gram)
PD-KTe	Semen	3750,00	7812,50	2343,75	10156,25
	Pasir	11250,00	18167,83	5450,35	23618,18
	Air	2437,50	2437,50	731,25	3168,75
PD-KLe	Semen	7500,00	15625,00	4687,50	20312,50
	Pasir	22500,00	36335,66	10900,70	47236,35
	Air	4875,00	4875,00	1462,50	6337,50
PD-KGe	Semen	21600,00	45000,00	13500,00	58500,00
	Pasir	64800,00	104646,69	31394,01	136040,70
	Air	14040,00	14040,00	4212,00	18252,00

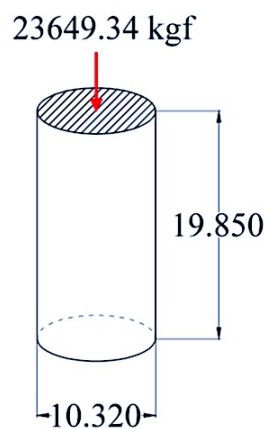
Tabel 5.12 Rekapitulasi kebutuhan volume busa untuk beton busa pada panel dinding

Benda uji	Bahan	Volume tiap benda uji (cm ³)	Volume tiap benda uji (Liter)	<i>Safety</i> 30% tiap benda uji (Liter)	Berat total tiap benda uji (Liter)
PD-KTe	Busa	6000	6	1,8	7,8
PD-KLe		12000	12	3,6	15,6
PD-KGe		34600	34,6	10,37	44,97

5.3 Kuat Tekan

5.3.1 Mortar dan beton busa

Pengujian kuat tekan benda uji silinder mortar dan silinder beton busa dilakukan ketika benda uji telah berumur 28 hari. Pengujian kuat tekan mortar dan beton busa bertujuan untuk mendapatkan komposisi material benda uji yang memiliki kuat tekan paling tinggi. Komposisi yang menghasilkan kuat tekan paling tinggi digunakan sebagai komposisi material panel dinding. Berikut ini contoh perhitungan kuat tekan benda uji silinder mortar dan beton busa. Contoh perhitungan yang digunakan adalah benda uji M-Kte-R1-S1 (Benda uji mortar, komposisi 1, sampel 1) seperti pada Gambar 5.2 berikut ini. Dimensi benda uji silinder sesuai dengan SNI 1974-2011.



Gambar 5.2 Sketsa pengujian kuat tekan mortar benda uji M-KTe-K1-S1

$$\begin{aligned} \text{Diameter benda uji (d)} &= 10,320 \text{ cm} = 103,20 \text{ mm} \\ \text{Tinggi benda uji (h}_w\text{)} &= 19,850 \text{ cm} = 198,50 \text{ mm} \\ \text{Beban maksimum (P)} &= 23649,34 \text{ kgf} = 232000 \text{ N} = 232 \text{ kN} \end{aligned}$$

Dari data di atas, dapat dihitung kuat tekan mortar dengan menggunakan perhitungan berikut ini.

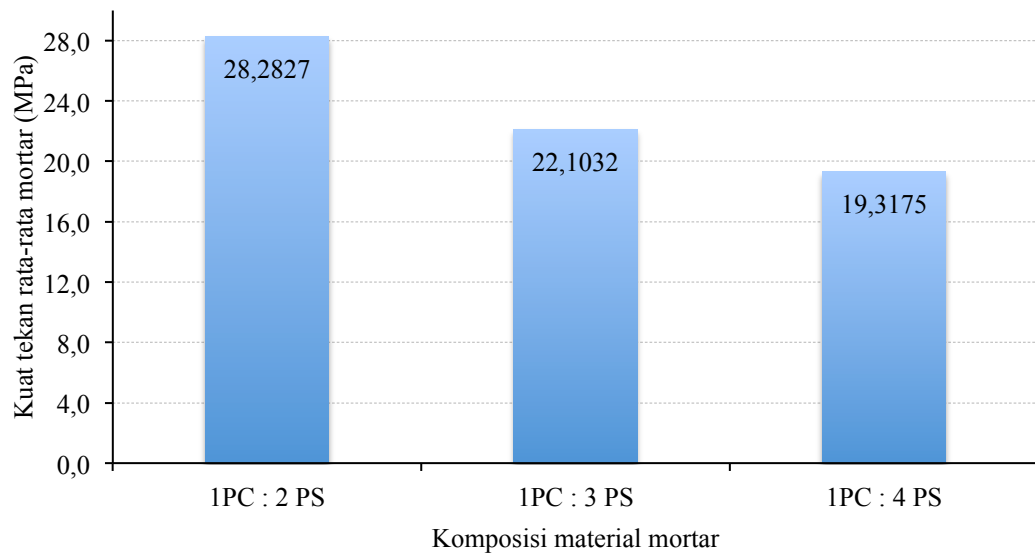
$$\begin{aligned} \text{Luas bidang tekan (A)} &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times d^2 \\ &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 103,20^2 \text{ mm}^2 \\ &= 8360,438 \text{ mm}^2 \\ \text{Kuat tekan (f}'_m\text{)} &= \frac{P}{A} \times \frac{1}{1,04} \\ &= \frac{242 \text{ kN}}{8360,438 \text{ mm}^2} \times \frac{1}{1,04} = 27,8325 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Seluruh perhitungan benda uji kuat tekan mortar dan beton busa dilakukan seperti perhitungan di atas. Rekapitulasi hasil perhitungan kuat tekan benda uji silinder mortar dan beton busa dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut ini.

Tabel 5.13 Rekapitulasi hasil perhitungan hasil pengujian kuat tekan mortar

Nama benda uji	Komposisi	Dia- meter (mm)	Luas bidang tekan (mm ²)	Beban maksimum	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)
				kN		
M-Kte-K1-S1	1 pc : 2 ps	103,2	8360,438	242,00	27,8325	28,2827
M-Kte-K1-S2	1 pc : 2 ps	104,3	8539,615	259,00	29,1627	
M-Kte-K1-S3	1 pc : 2 ps	103,8	8457,935	245,00	27,8528	
M-Kte-K2-S1	1 pc : 3 ps	104,0	8490,560	204,00	23,1026	22,1032
M-Kte-K2-S2	1 pc : 3 ps	104,9	8638,148	199,00	22,1513	
M-Kte-K2-S3	1 pc : 3 ps	104,3	8539,615	187,00	21,0557	
M-Kte-K3-S1	1 pc : 4 ps	103,9	8474,240	167,00	18,9488	19,3175
M-Kte-K3-S2	1 pc : 4 ps	104,6	8588,811	170,00	19,0319	
M-Kte-K3-S3	1 pc : 4 ps	103,6	8425,374	175,00	19,9717	

Berdasarkan rekapitulasi hasil perhitungan kuat tekan benda uji silinder mortar, maka dibuat grafik kuat tekan rata-rata benda uji silinder mortar. Grafik kuat tekan rata-rata tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut ini.



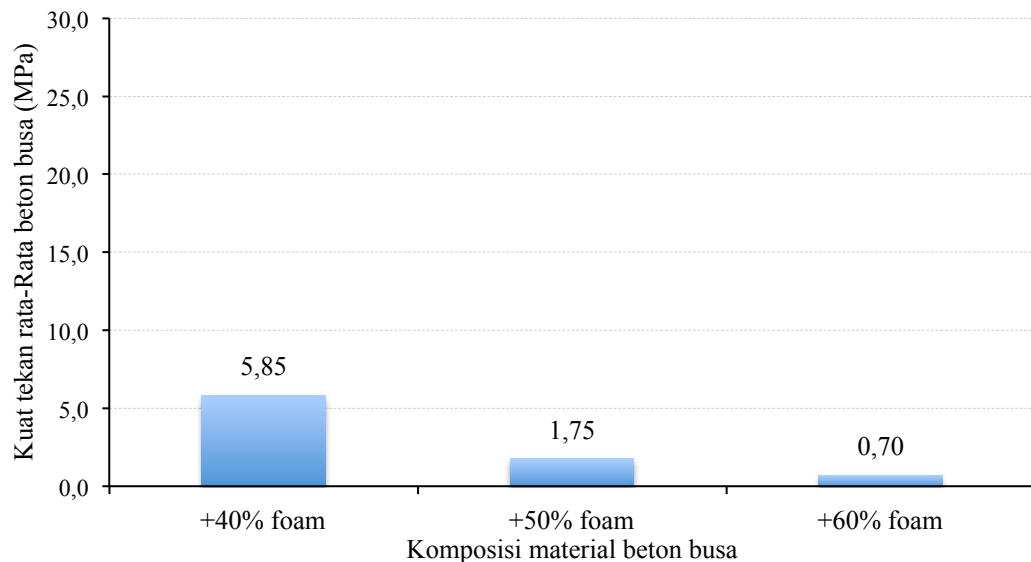
Gambar 5.3 Grafik kuat tekan rata-rata benda uji silinder mortar

Tabel 5.14 Rekapitulasi hasil perhitungan kuat tekan rata-rata silinder beton busa

Nama benda uji	Komposisi penambahan foam	Diameter (mm)	Luas bidang tekan (mm ²)	Beban maksimum (kgf)	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)
BB-Kte-K1-S1	+40%	103,9	8135,270	5225	6,06	5,85
BB-Kte-K1-S2	+40%	103,9	8135,270	5075	5,89	
BB-Kte-K1-S3	+40%	103,8	8119,618	4800	5,58	
BB-Kte-K2-S1	+50%	104,1	8166,620	1500	1,73	1,75
BB-Kte-K2-S2	+50%	103,6	8088,359	1390	1,62	
BB-Kte-K2-S3	+50%	104,9	8292,622	1665	1,90	
BB-Kte-K3-S1	+60%	103,9	8135,270	480	0,56	0,70
BB-Kte-K3-S2	+60%	104,7	8261,031	780	0,89	
BB-Kte-K3-S3	+60%	104,0	8150,938	570	0,66	

Berdasarkan rekapitulasi hasil perhitungan kuat tekan rata-rata benda uji silinder beton busa, maka dapat dibuat grafik kuat tekan rata-rata benda uji

silinder beton busa. Grafik kuat tekan rata-rata tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.4 berikut ini.



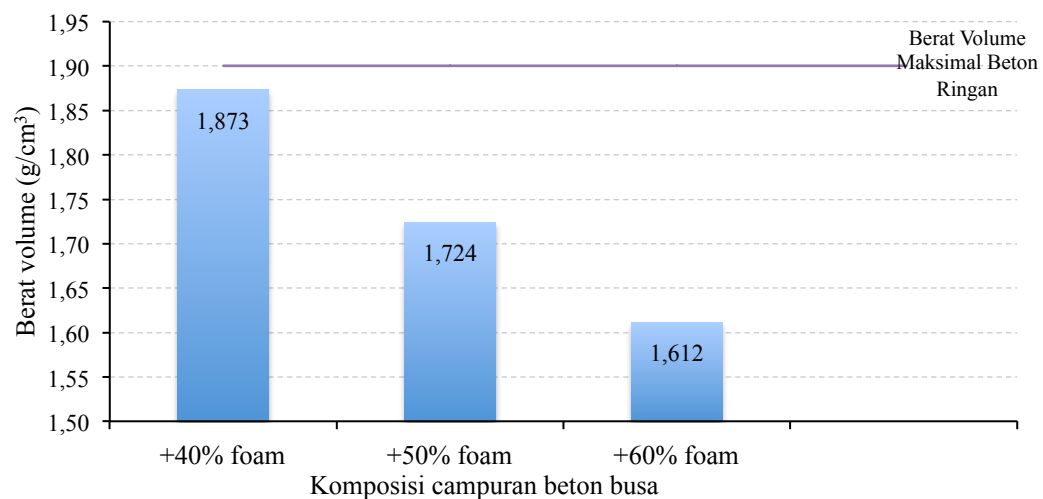
Gambar 5.4 Grafik kuat tekan rata-rata benda uji silinder beton busa

Menurut SNI 03-2847-2012, beton ringan memiliki berat volume kurang dari atau sama dengan 1900 kg/m^3 ($1,9 \text{ g/cm}^3$). Rekapitulasi hasil pemeriksaan berat volume beton busa dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut ini.

Tabel 5.15 Rekapitulasi hasil pemeriksaan berat volume beton busa

Nama benda uji	Komposisi penambahan foam	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Berat Kering (g)	Volume (cm^3)	Berat volume (g/cm^3)	Berat volume rata-rata (g/cm^3)
BB-Kte-K1-S1	+40%	10,39	19,94	3011	1622,173	1,856	1,873
BB-Kte-K1-S2	+40%	10,39	19,98	3053	1625,427	1,878	
BB-Kte-K1-S3	+40%	10,38	20,13	3081	1634,479	1,885	
BB-Kte-K2-S1	+50%	10,41	20,02	2871	1634,957	1,756	1,724
BB-Kte-K2-S2	+50%	10,36	20,00	2758	1617,672	1,705	
BB-Kte-K2-S3	+50%	10,49	20,17	2863	1672,622	1,712	
BB-Kte-K3-S1	+60%	10,39	20,35	2684	1655,527	1,621	1,612
BB-Kte-K3-S2	+60%	10,47	20,06	2599	1657,163	1,568	
BB-Kte-K3-S3	+60%	10,4	19,95	2675	1626,112	1,645	

Berdasarkan rekapitulasi hasil pemeriksaan berat volume rata-rata benda uji silinder beton busa di atas, dapat dibuat grafik berat volume rata-rata benda uji silinder beton busa. Grafik berat volume rata-rata tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut ini.

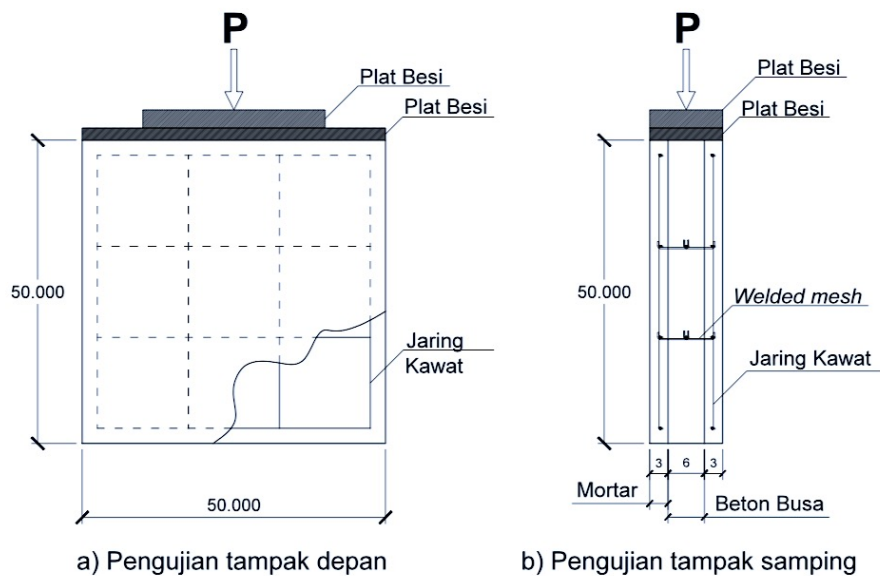


Gambar 5.5 Grafik berat volume rata-rata beton busa

5.3.2 Panel Dinding

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan cara memberikan beban merata secara *in-plane* pada benda uji sampai benda uji mengalami keruntuhan. Pembebanan yang diberikan mengakibatkan perubahan bentuk benda uji per satuan panjang yang selanjutnya perbandingan antara beban dan perubahan bentuk per satuan panjang tersebut digunakan sebagai parameter untuk membuat grafik beban vs lendutan.

Benda uji untuk pengujian kuat tekan berupa panel dinding dengan dimensi panjang 50 cm, lebar 50 cm, dan tebal total 12 cm. Benda uji kuat tekan berjumlah 3 panel dinding. Protokol pengujian kuat tekan panel dinding dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut ini.



Gambar 5.6 Protokol pengujian kuat tekan panel dinding

Berdasarkan pada pengujian kuat tekan panel dinding, didapatkan data beban maksimum dan lendutan maksimum, serta lendutan yang terjadi setiap kenaikan beban 500 kg sampai panel dinding mengalami keruntuhan. Data tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan persamaan yang terdapat pada SNI 03-4164-1996 untuk menghitung kuat tekan. Data hasil pengujian kuat tekan panel dinding dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut ini.

Tabel 5.16 Hasil pengujian kuat tekan panel dinding

No	Benda uji	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Beban maksimum (kN)
1	PD-Kte-S1	504	503	121	938,15742
2	PD-Kte-S2	502	501	119	777,45983
3	PD-Kte-S3	503	503	120	868,82867

Berdasarkan data pada Tabel 5.16, dapat dilakukan perhitungan kuat tekan panel dinding. Berikut contoh perhitungan kuat tekan panel dinding pada benda uji PD-Kte-S1 (Panel dinding, uji kuat tekan, sampel 1).

$$\begin{aligned}
\text{Luas bidang tekan (A)} &= l_w \times t \\
&= 503 \times 121 \text{ mm}^2 \\
&= 60863 \text{ mm}^2 \\
\text{Kuat tekan (f}^k\text{)} &= \frac{P}{A} \\
&= \frac{938,15742}{60863} \\
&= 15,414 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

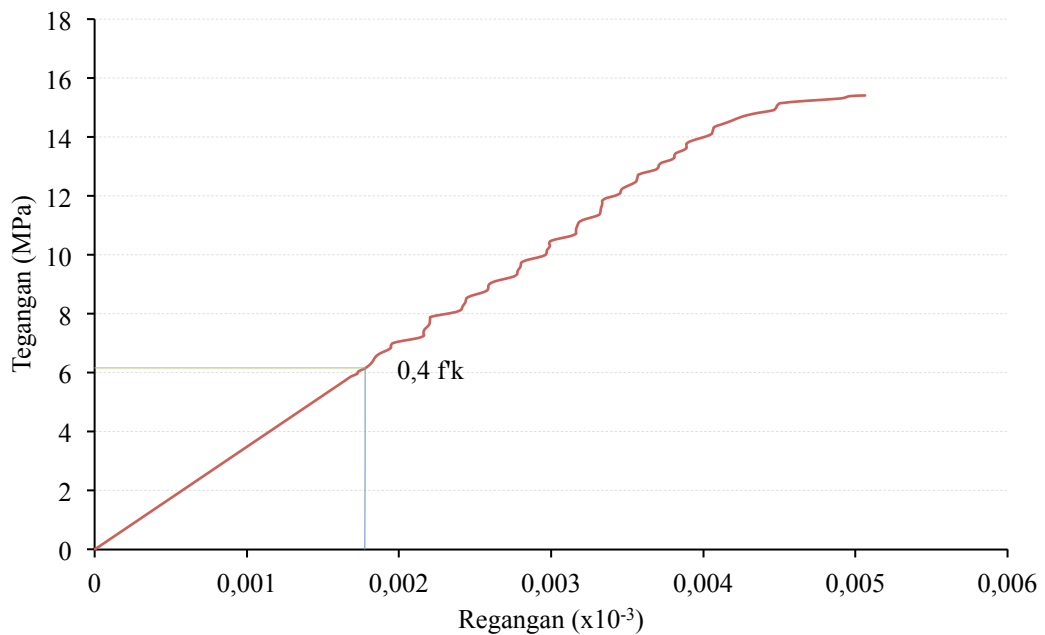
Dengan menggunakan perhitungan di atas, didapatkan kuat tekan seluruh benda uji panel dinding. Rekapitulasi hasil perhitungan kuat tekan panel dinding dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut ini.

Tabel 5.17 Rekapitulasi hasil perhitungan kuat tekan panel dinding

No	Benda uji	Beban maksimum (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)
1	PD-KTe-S1	938,16	60863	15,414
2	PD-KTe-S2	777,46	59619	13,040
3	PD-KTe-S3	868,83	60360	14,394

Data kuat tekan panel dinding di atas selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai modulus elastisitas panel dinding. Perhitungan nilai modulus elastisitas panel dinding dilakukan dengan metode ASTM C469. Contoh perhitungan modulus elastisitas pada benda uji panel dinding pada benda uji PD-KTe-S1 adalah sebagai berikut ini.

Perhitungan modulus elastisitas dengan metode ASTM C469 dilakukan dengan menghitung *slope* (kemiringan) kurva tegangan vs regangan yang dihasilkan melalui pengujian kuat tekan. Kurva tegangan vs regangan pengujian kuat tekan panel dinding dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut ini.



Gambar 5.7 Kurva tegangan vs regangan benda uji tekan (PD-KTe-S1)

Berdasarkan grafik di atas, didapat data untuk perhitungan modulus elastisitas menurut ASTM C469 sebagai berikut ini.

$$\sigma_{0,4f_k} = 6,166 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{0,4f_k} = 0,00178 \times 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{\sigma_{0,4f_c} - \sigma_1}{\epsilon_{0,4f_c} - \epsilon_1} \\ &= \frac{6,166 - 0}{0,0017 \times 10^{-3} - 0} \\ &= 36841,85 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Perhitungan untuk benda uji 2 dan 3 dilakukan seperti perhitungan di atas. Berikut rekapitulasi perhitungan modulus elastisitas seluruh benda uji pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut ini.

Tabel 5.18 Rekapitulasi perhitungan modulus elastisitas metode ASTM C469

No	Benda uji	Kuat tekan f'_k (MPa)	$0,4 f'_k$ (MPa)	$\epsilon_{0,4f'_k}$ ($\times 10^{-3}$)	Ek (MPa)
1	PD-KTe-S1	15,414	6,166	0,17	36841,85
2	PD-KTe-S2	13,040	5,216	0,15	34195,68
3	PD-KTe-S3	14,394	5,758	0,13	44380,25

5.3.3 Pembahasan

1. Mortar dan beton busa

a. Mortar

Pengujian kuat tekan pada benda uji silinder mortar dengan komposisi 1PC:2PS, 1PC:3PS, dan 1PC:4PS menghasilkan kuat tekan rata-rata berturut-turut sebesar 28,2827 MPa, 22,1032 MPa, dan 19,3175 MPa. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, didapatkan benda uji silinder mortar dengan komposisi 1PC:2PS menghasilkan kuat tekan paling tinggi. Sementara benda uji silinder dengan komposisi 1PC:4PS menghasilkan kuat tekan paling kecil.

Pada Gambar 5.3, dapat dilihat hubungan antara komposisi mortar dan kuat tekan mortar yang dihasilkan. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai kuat tekan benda uji silinder mortar semakin kecil seiring dengan bertambahnya volume penggunaan pasir. Hal tersebut dapat dihubungkan dengan kemampuan agregat untuk menyerap air. Penggunaan agregat yang berlebih dapat menyebabkan penyerapan air yang terjadi semakin tinggi, akibatnya faktor air semen efektif yang telah direncanakan menjadi berkurang. Menurut Murdock dan Brook (1999) mengatakan bahwa seperti reaksi kimia lainnya, semen dan air dikombinasikan dalam proporsi tertentu. Untuk semen Portland, 1 bagian berat semen membutuhkan 0,25 bagian berat air untuk hidrasi. Artinya, apabila berat air dalam campuran mortar kurang dari $\frac{1}{4}$ berat semen, maka proses hidrasi tidak akan berlangsung dengan baik, dan ditambah lagi dengan berkurangnya berat air akibat diserap agregat halus dalam campuran mortar.

Murdock dan Brook (1999) mengatakan bahwa mortar dengan jumlah rongga yang minimal adalah yang terpadat dan terkuat. Disebutkan juga bahwa sumber rongga udara dalam beton ada dua, yaitu gelembung udara yang terperangkap dalam proses pengecoran dan air yang digunakan dalam proses pengecoran yang akhirnya menguap pada tahap pengerasan beton. Air yang digunakan dalam takaran beton berasal dari tiga sumber, yaitu air permukaan pada agregat, air yang ditambahkan ketika pencampuran beton, dan air yang diserap dalam agregat. Kondisi ideal agregat yang digunakan pada saat pencampuran beton adalah jenuh kering permukaan, yaitu kondisi ketika pori agregat mengandung air jenuh, tetapi permukaan agregat kering. Agregat dalam kondisi tersebut masih memiliki kemampuan untuk menyerap air, akan tetapi tidak menambah atau mengurangi air dalam campuran beton.

Dalam pelaksanaan, kondisi butiran agregat secara keseluruhan tidak bisa dipastikan benar-benar dalam kondisi jenuh kering permukaan. Kondisi tersebut dapat berarti bahwa kemungkinan kondisi agregat basah atau kering. Agregat dengan kondisi basah, dan dengan jumlah yang berlebih dalam komposisi campuran beton, mengakibatkan jumlah air dalam campuran beton akan semakin tinggi. Semakin tinggi jumlah air dalam campuran beton, maka semakin tinggi jumlah air yang akan menguap pada tahap pengerasan campuran beton. Selanjutnya mengakibatkan bertambahnya jumlah rongga dalam campuran beton, sehingga kuat tekan campuran beton tersebut berkurang.

Sebaliknya, agregat dengan kondisi kering dan dengan jumlah yang berlebih dalam komposisi campuran beton mengakibatkan kurangnya air dalam campuran tersebut. Kurangnya air dalam proses pencampuran beton mengakibatkan campuran beton akan semakin sulit untuk dikerjakan (*workability* rendah), sehingga campuran beton tersebut akan semakin sulit untuk dipadatkan. Sulitnya pemadatan campuran beton akan membuat beton menjadi tidak padat dan banyak gelembung udara yang terperangkap dalam campuran beton. Akibatnya kuat tekan beton akan semakin menurun.

Dalam campuran mortar, semen berfungsi sebagai bahan perekat antar butiran agregat dengan cara melapisi permukaan butiran agregat tersebut. Bertambahnya komposisi agregat dalam suatu campuran mortar mengakibatkan jumlah permukaan agregat yang harus dilapisi semen pun meningkat, hal tersebut mengakibatkan kemampuan pasta semen untuk melapisi permukaan agregat menurun, pada akhirnya lekatan antar butiran agregat pun berkurang. Berkurangnya lekatan antar butiran agregat mengakibatkan menurunnya kuat tekan campuran mortar tersebut.

b. Beton busa

Pada pengujian kuat tekan terhadap benda uji silinder beton busa, didapatkan kuat tekan rata-rata berturut-turut sebesar 5,85 MPa, 1,75 MPa, dan 0,70 MPa. Kuat tekan tertinggi didapatkan pada komposisi penambahan busa (*foam*) sebesar 40%, sementara kuat tekan terendah didapatkan pada komposisi penambahan busa (*foam*) sebesar 60%.

Grafik kuat tekan benda uji silinder busa pada Gambar 5.4 menunjukkan bahwa kuat tekan yang didapatkan berbanding terbalik dengan komposisi penambahan busa (*foam*). Semakin tinggi komposisi penambahan busa (*foam*) ke dalam campuran mortar mengakibatkan kuat tekan beton busa semakin berkurang, namun beton busa semakin ringan. Hal tersebut diakibatkan oleh penambahan volume busa dalam campuran beton menyebabkan rongga udara (*void*) dalam campuran beton busa bertambah juga. Dengan bertambahnya rongga udara (*void*) dalam campuran beton, tingkat kepadatan campuran beton tersebut semakin berkurang yang berarti bahwa berkurangnya kuat tekan pada campuran beton tersebut.

Tujuan penambahan busa (*foam*) ke dalam campuran beton dalam penelitian ini yaitu untuk menambahkan rongga udara (*void*) dalam campuran beton agar berat volume beton yang dihasilkan berkurang. Pada Gambar 5.5 dapat dilihat hubungan antara komposisi penambahan busa (*foam*) dan berat volume benda uji silinder busa. Bertambahnya komposisi penambahan busa (*foam*) ke dalam campuran beton mengakibatkan

berkurangnya berat volume benda uji silinder beton busa yang dihasilkan. Hal tersebut sesuai dengan tujuan penambahan busa (*foam*) ke dalam campuran beton, yaitu untuk mengurangi berat volume campuran beton yang dihasilkan. Menurut SNI 03-2847-2012, beton ringan memiliki berat volume kurang dari atau sama dengan 1900 kg/m^3 . Pada Gambar 5.5, dapat dilihat bahwa seluruh komposisi penambahan busa (*foam*) benda uji silinder menghasilkan berat volume kurang dari 1900 kg/m^3 , sehingga seluruh benda uji beton busa dapat digolongkan ke dalam beton ringan. Seluruh komposisi penambahan busa dapat digolongkan ke dalam beton ringan, namun berat volume yang dihasilkan dirasa masih cukup berat dibandingkan dengan berat hebel yang hanya mencapai 800 kg/m^3 . Berat volume beton busa yang masih cukup tinggi disebabkan karena agregat halus yang digunakan berupa pasir yang memiliki berat dan butiran yang masih cukup besar, oleh karena itu untuk mendapatkan berat volume yang jauh lebih ringan dapat mengganti agregat halus yang digunakan dengan material yang lebih ringan dan halus berupa *fly ash*, kapur, atau filler lainnya. Berkurangnya berat volume pada beton busa yang digunakan akan membuat panel dinding yang dihasilkan lebih ringan lagi.

2. Panel dinding

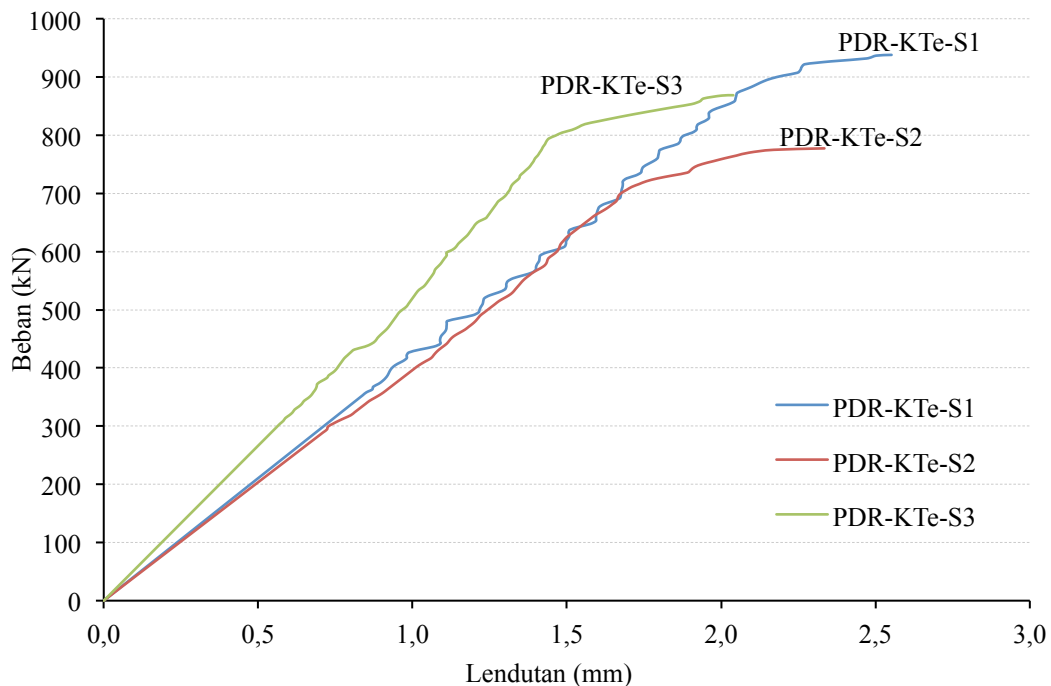
Pengujian kuat tekan dengan benda uji panel dinding tipikal 1 menghasilkan kuat tekan berturut-turut sebesar 15,414 MPa, 13,040 MPa, dan 14,394 MPa. Kuat tekan rata-rata benda uji panel dinding didapatkan sebesar 14,283 MPa. Kuat tekan tertinggi didapatkan pada benda uji PD-KTe-S1 yaitu 15,414 MPa, sementara kuat tekan terendah didapatkan pada benda uji PD-KTe-S2 yaitu 13,040 MPa. Nilai kuat tekan panel dinding yang didapatkan dari pengujian sudah memenuhi syarat sesuai dengan kuat tekan rencana yang diinginkan untuk struktur ringan yaitu antara 6,89 – 17,34 MPa menurut SNI 03-3449-2002.

Nilai kuat tekan panel dinding yang didapatkan pada penelitian ini lebih besar dibandingkan dengan kuat tekan dinding pasangan bata merah dan dinding pasangan batako. Pada penelitian Wahyudianto (2016), didapatkan

kuat tekan rata-rata dinding pasangan bata merah (dimensi benda uji $100 \times 50 \times 12 \text{ mm}^3$), tanpa perkuatan tulangan baja sebesar 0,919 MPa, sedangkan kuat tekan dinding pasangan bata merah (dimensi benda uji $100 \times 50 \times 12 \text{ mm}^3$), dengan perkuatan tulangan baja sebesar 1,167 MPa. Sementara pada penelitian Anggreni dkk (2015), didapatkan kuat tekan rata-rata dinding pasangan batako tanpa perkuatan *wire mesh* sebesar 4,496 MPa (dimensi benda uji $96 \times 60 \times 12 \text{ mm}^3$) dan kuat tekan rata-rata dinding pasangan batako dengan perkuatan *wire mesh* sebesar 3,544 MPa (dimensi benda uji $96 \times 60 \times 12 \text{ mm}^3$).

Perbedaan kuat tekan yang cukup signifikan antara penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan Wahyudianto (2016) dan Anggreni dkk (2015) disebabkan karena adanya perbedaan kekuatan material penyusun dinding itu sendiri. Pada penelitian ini, material penyusun dinding adalah mortar dengan kuat tekan rata-rata 29,414 MPa dan beton busa dengan kuat tekan rata-rata 6,08 MPa. Sementara itu kuat tekan bata merah menurut SNI 15-2094-2000 sebesar 10 MPa untuk bata merah mutu tingkat 1,8-10 MPa untuk bata merah tingkat 2, dan 6-8 MPa untuk bata merah tingkat 3. Perbedaan kuat tekan material penyusun dinding yang cukup signifikan tersebut yang kemudian mengakibatkan perbedaan yang cukup signifikan pada kuat tekan dinding.

Karakteristik tiap benda uji berdasarkan pada hubungan antara beban dan lendutan dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



Gambar 5.8 Grafik beban vs lendutan seluruh benda uji kuat tekan panel dinding

Pada Gambar 5.8 dapat dilihat setiap benda uji panel dinding memiliki tingkat kemiringan grafik yang serupa. Hal tersebut menunjukkan adanya keseragaman besar lendutan yang terjadi pada setiap benda uji seiring dengan bertambahnya beban. Perbedaan terdapat pada benda uji panel dinding uji kuat tekan sampel 3, kemiringan grafik benda uji panel dinding uji kuat tekan sampel 3 lebih kecil dibandingkan dengan benda uji panel dinding uji tekan sampel 1 dan 2. Hal tersebut menunjukkan bahwa lendutan yang terjadi tiap kenaikan beban lebih kecil dibandingkan dengan sampel yang lainnya.

Menurut ASTM C469, modulus elastisitas merupakan nilai kemiringan (gradien) dari grafik tegangan vs regangan. Regangan elastis ditentukan berdasarkan perubahan bentuk (lendutan) benda uji, semakin besar perubahan bentuk (lendutan) yang terjadi pada benda uji akibat gaya yang diberikan, maka semakin besar regangan yang dihasilkan. Besarnya perubahan bentuk (lendutan) mengakibatkan grafik hubungan beban vs lendutan semakin landai (miring), sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa semakin miring grafik

tegangan vs regangan ataupun grafik beban vs lendutan, maka modulus elastisnya akan semakin kecil.

Perkuatan jaring kawat baja pada pengujian kuat tekan tidak memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kuat tekan panel dinding. Hal ini dapat dilihat pada grafik hubungan antara beban dan lendutan tiap benda uji panel dinding uji tekan. Seluruh benda uji tidak mengalami kondisi plastis (ekor grafik kondisi plastis pendek) yang identik dengan grafik beban vs lendutan beton bertulang. Pendeknya grafik kondisi plastis pada grafik mengindikasikan bahwa kecilnya kontribusi jaring kawat pada pengujian tekan ini. Kecilnya kontribusi perkuatan jaring kawat tersebut salah satunya disebabkan oleh posisi tulangan jaring kawat baja yang searah dengan arah pembebanan, sehingga timbul beban tekuk pada jaring kawat akibat bentuk jaring kawat yang langsing. Selain itu, kecilnya kontribusi perkuatan jaring kawat pada pengujian kuat tekan disebabkan oleh kuat tekan tulangan jaring kawat yang dapat diabaikan karena cenderung sangat kecil.

Pada Gambar 5.8, dapat dilihat grafik kenaikan beban dan lendutan berbentuk linear (kondisi elastis) hingga beban 853 kN dan mulai memasuki kondisi plastis dan mencapai keruntuhan pada beban 938 kN dengan lendutan sebesar 2,55 mm. Pada Gambar 5.8, grafik kenaikan beban dan lendutan juga berbentuk linear (kondisi elastis) hingga beban 799 kN dan mulai memasuki kondisi plastis mencapai keruntuhan pada beban 777 kN dengan lendutan sebesar 2,33 mm. Pada Gambar 5.8, grafik kenaikan beban dan lendutan juga berbentuk linear (kondisi elastis) hingga beban 706 kN dan mulai memasuki kondisi plastis mencapai keruntuhan pada beban 868 kN dengan lendutan sebesar 2,3 mm.

Pada Lampiran L1.17, dapat dilihat mode keruntuhan benda uji panel dinding terjadi dimulai dengan kerusakan pada sambungan antar lapisan panel dinding. Selanjutnya terjadi keretakan pada lapisan kulit (*skin*) panel dinding seperti yang terlihat pada Lampiran L1.16. Mekanisme kegagalan 3 benda uji panel dinding cenderung tipikal. Benda uji 2 mengalami kegagalan terbesar akibat adanya eksentrisitas sebesar 7 mm. Hal tersebut mengakibatkan benda

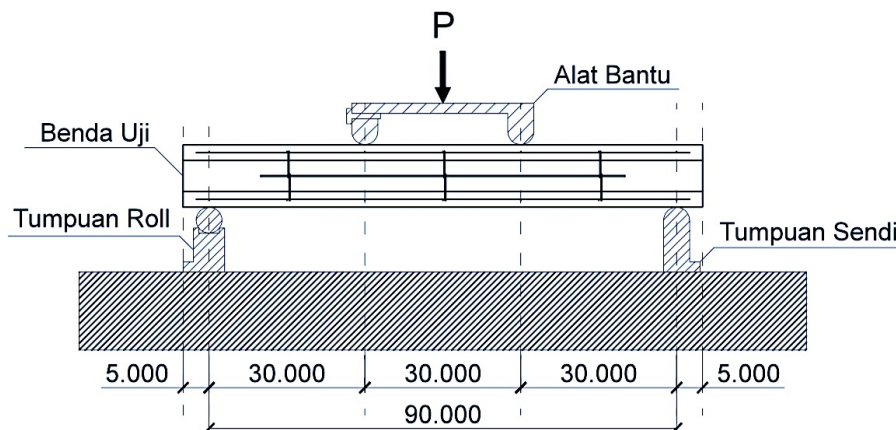
uji panel dinding runtuh pada bagian lapisan kulit akibat adanya momen yang terjadi karena adanya eksentrisitas tersebut.

5.4 Kuat Lentur

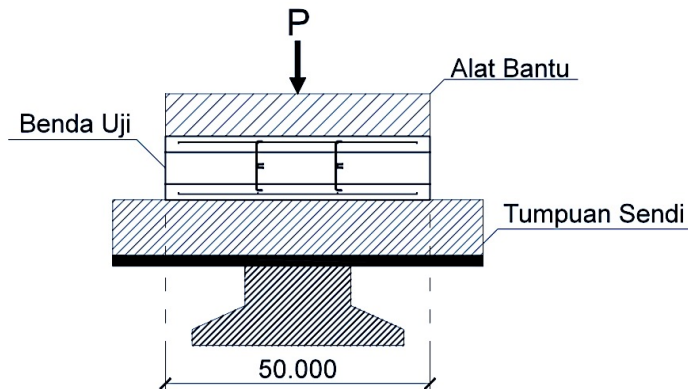
5.4.1 Perhitungan

1. Hasil pengujian

Pengujian kuat lentur panel dinding bertujuan untuk mengetahui kemampuan panel dinding untuk menahan beban dari arah tegak lurus sumbu panel dinding (*out of plane*). Pengujian kuat lentur yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian kuat lentur murni dengan dua titik pembebanan sesuai dengan SNI 4431:2011. Pengujian kuat lentur benda uji panel dinding dilakukan ketika benda uji panel dinding berumur 28 hari dengan jumlah benda uji panel dinding 3 benda uji. Benda uji panel dinding untuk pengujian kuat lentur berukuran panjang 100 cm, lebar 50 cm, dan tebal total 12 cm. Protokol pengujian kuat lentur panel dinding dapat dilihat pada Gambar 5.9 dan Gambar 5.10 berikut ini.



Gambar 5.9 Protokol pengujian kuat lentur tampak depan



Gambar 5.10 Protokol pengujian kuat lentur tampak samping

Berdasarkan pada pengujian yang telah dilakukan, seluruh panel dinding untuk pengujian kuat lentur mengalami retak utama pada pusat panel dinding. Data hasil pengujian kuat lentur dapat dilihat pada Tabel 5.19 berikut ini.

Tabel 5.19 Hasil pengujian kuat lentur panel dinding

No	Benda uji	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Beban maksimum (kN)	Keterangan
1	PD-KLe-S1	1003	498	118	21,88	Retak berada di daerah pusat 1/3 jarak tumpuan
2	PD-KLe-S2	999	499	123	24,39	
3	PD-KLe-S3	1002	500	121	27,21	

Dari data pada Tabel 5.19 di atas, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan nilai kuat lentur panel dinding. Berikut contoh perhitungan kuat lentur murni panel dinding benda uji PD-KLe-S1.

$$f_{lt} = \frac{P \times L}{b \times h^2} = \frac{21,88 \times 905}{498 \times 118^2} = 2,855 \text{ MPa}$$

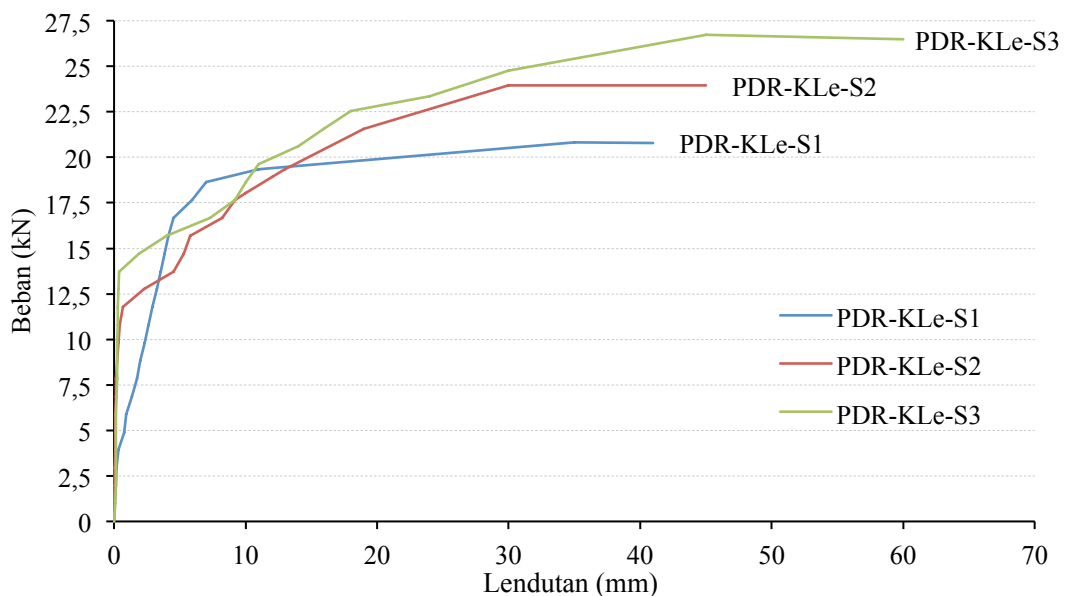
Dengan perhitungan di atas, maka didapatkan kuat lentur seluruh benda uji panel dinding. Rekapitulasi perhitungan kuat lentur benda uji panel dinding dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut ini.

Tabel 5.20 Rekapitulasi perhitungan kuat lentur benda uji panel dinding

No	Benda uji	Beban maksimum (kN)	Kuat lentur (MPa)	Keterangan
1	PD-KLe-S1	21,88	2,855	Retak berada di daerah pusat 1/3 jarak tumpuan
2	PD-KLe-S2	24,39	2,925	
3	PD-KLe-S3	27,21	3,372	

5.4.2 Pembahasan

Pengujian kuat lentur terhadap panel dinding uji lentur menghasilkan kuat lentur berturut-turut sebesar 2,855 MPa, 2,925 MPa, dan 3,372 MPa. Beban maksimum yang dapat diterima benda uji panel dinding tidak memiliki perbedaan yang cukup besar yaitu 21,88 kN, 24,39 kN, dan 27,21 kN. Sedangkan lendutan maksimal yang dihasilkan berturut-turut sebesar 4 cm, 4,5 cm, dan 6 cm. Grafik hubungan antara beban dan lendutan benda uji panel dinding uji lentur dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut ini.



Gambar 5.11 Grafik beban vs lendutan seluruh benda uji lentur

Pada Gambar 5.11, dapat dilihat kondisi elastis dan kondisi plastis benda uji. Pada benda uji PD-KLe-S1, kondisi elastis terjadi mencapai beban 3,924 kN dengan lendutan sebesar 0,35 mm. Pada benda uji PD-KLe-S2, kondisi elastis

terjadi mencapai beban 10,79 kN dengan lendutan sebesar 0,43 mm. Pada benda uji PD-KLe-S3, kondisi elastis terjadi mencapai beban 13,734 kN dengan lendutan sebesar 0,39 mm. Kondisi elastis merupakan kondisi ketika suatu benda mampu kembali ke posisi, bentuk, dan ukuran semula ketika gaya yang diberikan dihilangkan. Kondisi elastis benda uji dapat dilihat dari bentuk kenaikan grafik yang linier. Pada pengujian lentur ini, didapatkan kondisi elastis pada benda uji PD-KLe-S2 dan PD-KLe-S3 terjadi setelah beban > 10 kN, dan fase elastis benda uji PD-KLe-S1 terjadi pada beban 3,924 kN. Perbedaan terjadi pada benda uji PD-KLe-S1, yaitu fase elastis yang terjadi ketika beban < 10 kN. Hal ini disebabkan karena pada pengujian benda uji PD-KLe-S1 telah terjadi pembebanan inisial, yaitu terjadi pembebanan awal yang tidak terekam oleh *data logger*. Pembebanan inisial mengakibatkan benda uji mengalami retak rambut pada area tarik benda uji, namun benda uji masih kembali ke posisi, bentuk, dan ukuran semula yang artinya besarnya pembebanan inisial yang terjadi masih pada fase elastis benda uji. Adanya retak rambut pada area tarik benda uji mengindikasikan bahwa telah terjadi penurunan kekuatan pada benda uji terutama pada material mortar yang tidak berfungsi untuk menerima beban tarik. Penurunan kekuatan tersebut berimbas pada kecilnya beban maksimal pada fase elastis yang mampu diterima benda uji. Pada kondisi berikutnya kenaikan beban yang diterima benda uji PD-KLe-S2 tetap linear sampai beban 16,677 kN, namun deformasi yang terjadi lebih besar tiap kenaikan beban 1 kN. Hal tersebut bisa jadi diakibatkan karena adanya penurunan kekuatan tersebut. Selanjutnya apabila meninjau dari lendutan yang terjadi, besarnya lendutan yang terjadi pada ketiga benda uji cukup seragam, hal ini seharusnya menunjukkan keseragaman beban yang mampu diterima pada fase elastis.

Setelah mengalami kondisi elastis, selanjutnya benda uji mengalami kondisi plastis. Titik awal benda uji mengalami kondisi plastis biasanya disebut titik leleh. Pada kondisi plastis, ketika benda uji diberikan gaya sedikit saja, deformasi yang terjadi bisa bertambah berlipat-lipat dari deformasi elastis. Adanya perkuatan tulangan (dalam penelitian ini jaring kawat (*wire mesh*) sebagai tulangan) dapat ditinjau dari kondisi plastis suatu benda. Pada pengujian lentur, benda uji dinding

yang tidak menggunakan perkuatan tulangan biasanya akan getas dan mengalami kondisi plastis yang singkat karena tidak adanya tulangan yang menerima beban tarik pada area tarik. Sebaliknya, benda uji panel dinding dengan perkuatan jaring kawat (*wire mesh*) pada penelitian ini mengalami kondisi plastis yang cukup panjang. Hal ini dikarenakan adanya jaring kawat (*wire mesh*) yang berfungsi sebagai tulangan untuk menerima beban tarik yang terjadi sehingga benda uji masih mampu menerima beban lebih besar sampai benda uji mengalami keruntuhan. Pada Gambar 5.11, dapat dilihat kondisi plastis dari benda uji panel dinding.

Benda uji PD-KLe-S1 mulai memasuki kondisi plastis pada beban 3,924 kN dengan lendutan sebesar 0,35 mm, mencapai beban maksimum sebesar 20,827 kN dengan lendutan sebesar 35 mm, dan mengalami keruntuhan pada beban 20,802 kN dengan lendutan sebesar 41 mm. Benda uji PD-KLe-S2 mulai memasuki kondisi plastis pada beban 10,791 kN dengan lendutan sebesar 0,43 mm, mencapai beban maksimum sebesar 23,97 kN dengan lendutan sebesar 30 mm, dan mengalami keruntuhan pada beban 23,95 kN dengan lendutan sebesar 45 mm. Benda uji PD-KLe-S2 mulai memasuki kondisi plastis pada beban 10,791 kN dengan lendutan sebesar 0,43 mm, mencapai beban maksimum sebesar 26,72 kN dengan lendutan sebesar 45 mm, dan mengalami keruntuhan pada beban 26,47 kN dengan lendutan sebesar 65 mm.

Pada kondisi plastis, jaring kawat (*wire mesh*) memberikan kontribusi terbesar untuk menerima beban. Hal ini disebabkan karena posisi pemasangan jaring kawat (*wire mesh*) secara rangkap, yaitu pada area yang terkena beban tarik dan desak. Pada area yang menerima beban desak, jaring kawat (*wire mesh*) tidak memberikan kontribusi yang signifikan, namun mortar yang memberikan kontribusi yang signifikan untuk menerima beban desak. Pada area desak terjadi retak-retak halus, namun pada area tarik terjadi retak yang cukup banyak dan besar. Peristiwa tersebut menunjukkan mortar pada area tarik tidak memberikan kontribusi untuk menerima beban tarik, sesuai dengan kuat tariknya yang kecil. Tetapi benda uji tidak langsung mengalami keruntuhan karena adanya tulangan

jaring kawat (*wire mesh*) yang memiliki kuat tarik lebih besar sehingga memberikan kontribusi untuk menerima/menahan beban tarik tersebut.

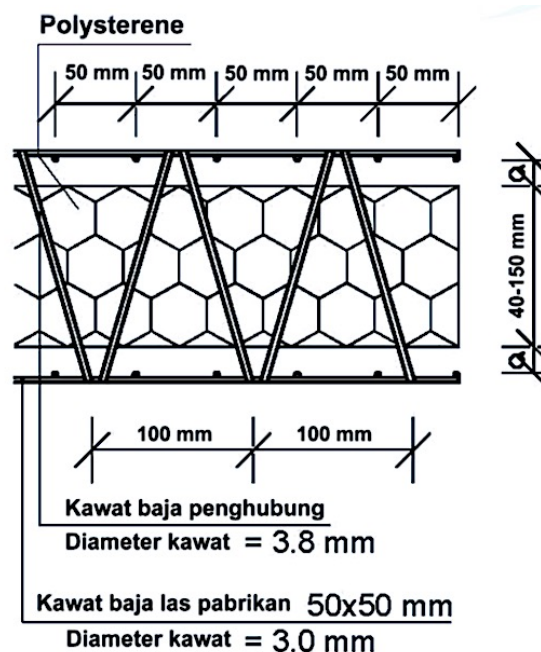
Mekanisme kegagalan yang terjadi pada seluruh benda uji panel dinding ringa uji lentur adalah dimulai dengan terjadinya retak halus pada bagian bawah panel dinding. Setelah terjadinya retak tersebut, terjadi kegagalan pada sambungan antar lapisan panel dinding seperti terlihat pada Lampiran L1.18. Kegagalan tersebut mengakibatkan benda uji panel dinding tidak lagi menjadi 1 benda uji komposit. Kondisi benda uji yang tidak berperilaku seperti komposit mengakibatkan kuat lentur panel dinding menjadi semakin kecil. Hal tersebut dipengaruhi oleh semakin kecilnya nilai inersia yang diperoleh ketika panel dinding tidak menjadi satu komposit lagi. Ketebalan (h) yang digunakan tidak lagi ketebalan total (h) total, melainkan ketebalan (h) tiap lapisan dikalikan 3. Perubahan tersebut menimbulkan perbedaan nilai inersia yang cukup signifikan, sehingga berpengaruh pada berkurangnya kuat lentur yang didapat pada benda uji panel dinding.

Pada proses keruntuhan selanjutnya, keruntuhan terjadi pada tiap lapisan panel dinding secara terpisah. Kegagalan pertama terjadi pada lapisan inti (*core*) panel dinding, terjadi patah pada bagian tengah panel dinding. Hal ini disebabkan karena lapisan inti (*core*) merupakan lapisan yang paling lemah sebab memiliki kuat tekan paling kecil dan tanpa perkuatan jaring kawat baja (*wire mesh*). Kegagalan selanjutnya terjadi pada lapisan paling bawah panel dinding, yaitu terjadi patah pada bagian bentang tengah panel dinding. Kegagalan tersebut diakibatkan karena bagian tersebut menerima beban tarik. Kegagalan terakhir terjadi pada lapisan paling atas panel dinding, akan tetapi kegagalan tidak sampai patah, hanya mencapai retak sebagian.

Kegagalan yang terjadi pada lapisan bawah dan atas panel dinding terjadi akibat bahan mortar tidak mampu menerima beban lebih tinggi lagi, akan tetapi perkuatan jaring kawat pada kedua lapisan ini belum mengalami leleh maksimum. Hal ini terlihat ketika pembebanan tidak dapat dilanjutkan, karena telah terjadi kegagalan pada bahan mortar benda uji, selanjutnya benda uji yang semula melengkung kembali ke posisi sebelumnya (lendutan berkurang). Hal ini

menunjukkan bahwa tulangan jaring kawat baja seharusnya masih mampu menerima beban yang lebih tinggi lagi. Mekanisme kegagalan pada 3 benda uji panel dinding terjadi secara tipikal seperti kegagalan yang dijelaskan di atas.

Pola kegagalan yang terjadi sangat mempengaruhi kuat lentur yang dihasilkan. Adanya pemisahan antara lapisan kulit dan lapisan inti pada kerusakan awal panel dinding menunjukkan kawat penghubung (*connector*) yang dipasang menghubungkan jaring kawat pada kedua lapisan kulit tidak mampu berfungsi secara maksimal. Hal tersebut dapat dibandingkan dengan panel dinding yang diproduksi oleh M-Panel Indonesia. Pada pengujian lentur murni terhadap panel dinding M-Panel, didapatkan kuat lentur rata-rata lebih dari 5 MPa, dengan mode kerusakan patah pada bagian tengah bentang tanpa adanya pemisahan antar lapisan. Tidak terjadinya pemisahan antar lapisan pada produk Panel dinding M-Panel tersebut disebabkan karena adanya *welded mesh* atau kawat penghubung antar *wire mesh* yang cukup banyak sehingga mampu menjaga rekatan antar lapisan panel dinding. Selain itu, karena pemasangan *welded mesh* tersebut dengan kemiringan 45° (Gambar 5.13), mampu memberikan kekuatan tambahan pada produk panel dinding M-Panel tersebut.

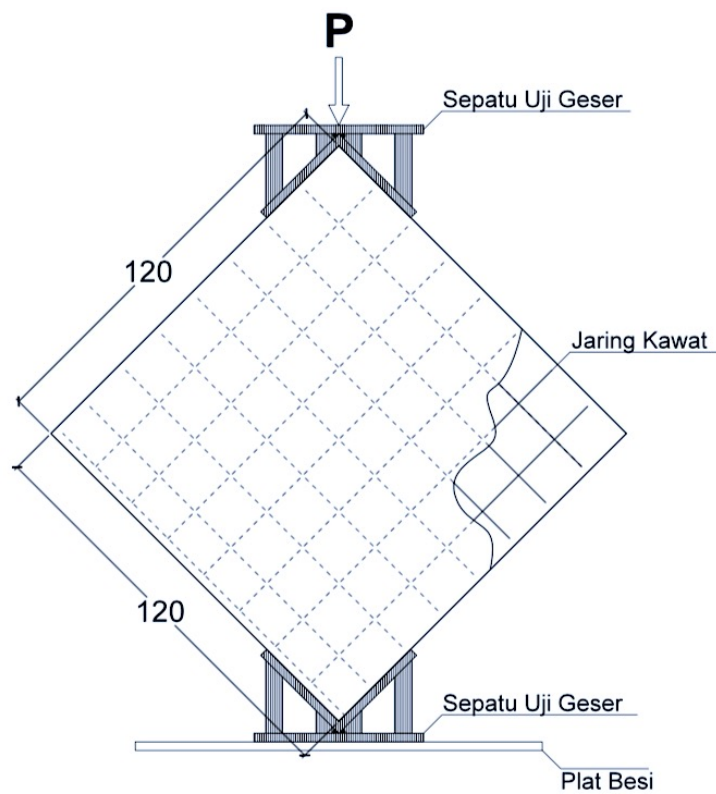


Gambar 5.12 Potongan melintang panel dinding produk M-Panel Indonesia

5.5 Kuat Geser Diagonal

5.5.1 Perhitungan

Pengujian kuat geser diagonal dilakukan pada benda uji panel dinding ketika berumur 28 hari. Benda uji panel dinding untuk pengujian kuat geser diagonal berukuran tinggi 120 cm, lebar 120 cm, dan tebal 12 cm. Jumlah benda uji panel dinding untuk pengujian kuat geser diagonal adalah 3 buah dinding. Analisis hasil pengujian kuat geser diagonal dilakukan menggunakan persamaan dalam ASTM E519-02 dan SNI 03-4166-1996. Protokol pengujian kuat geser diagonal dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut ini.



Gambar 5.13 Protokol pengujian kuat geser diagonal (ASTM E519-02)

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, hasil pengujian kuat geser diagonal panel dinding dapat dilihat pada Tabel 5.21 berikut ini.

Tabel 5.21 Hasil pengujian kuat geser diagonal

No	Benda uji	Dimensi			Berat alat bantu (kg)	Beban maksimum (kgf)
		Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)		
1	PD-KGe-S1	1197	1199	123	63	31100
2	PD-KGe-S2	1198	1196	119	41	26100
3	PD-KGe-S3	1205	1203,5	122	63	35400

1. Metode SNI 03-4166-1996

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi (h}_w) &= 1197 \text{ mm} \\
 \text{Lebar (l}_w) &= 1199 \text{ mm} \\
 \text{Tebal (t)} &= 123 \text{ mm} \\
 \text{Beban maksimum (P)} &= 31100 \text{ kgf} = 305091 \text{ N} \\
 \text{Koefisien friksi (\mu)} &= 0,3 \\
 \text{Berat alat bantu (M)} &= 63 \text{ kg} = 618,09 \text{ N} \\
 \text{Tampang bersih (A}_n) &= \frac{h_w + l_w}{2} \times t \\
 &= \frac{1197 + 1199}{2} \times 123 \\
 &= 147354 \text{ mm}^2 \\
 \text{Kuat geser (f}_{vd}) &= \frac{0,707 P + M}{A_n} \times (1 - \mu) \\
 &= \frac{0,707 \times 305091 + 618,09}{147354} \times (1 - 0,3) \\
 &= 1,025 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan perhitungan metode SNI 03-4166-1996 di atas, maka didapatkan hasil perhitungan kuat geser diagonal seperti pada Tabel 5.22 berikut ini.

Tabel 5.22 Rekapitulasi hasil perhitungan kuat geser diagonal metode SNI 03-4166-1996

No	Benda uji	Tampang bersih A_n (mm ²)	Berat alat bantu (N)	Beban maksimum (kN)	Kuat geser diagonal (MPa)
1	PD-KGe-S1	147354	618,09	305,091	1,028
2	PD-KGe-S2	142443	402,21	256,041	0,892
3	PD-KGe-S3	146918,5	618,09	347,274	1,173

2. Metode ASTM E519-02

$$\text{Tinggi } (h_w) = 1197 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar } (l_w) = 1199 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal } (t) = 123 \text{ mm}$$

$$\text{Beban maksimum } (P) = 31100 \text{ kgf} = 305,091 \text{ kN}$$

$$\text{Persen daerah bruto } (n) = 1$$

$$\text{Tampang bersih } (A_n) = \frac{h_w + l_w}{2} \times t \times n$$

$$= \frac{1197 + 1199}{2} \times 123 \times 1 = 147354 \text{ mm}^2$$

$$\text{Kuat geser } (f_{vd}) = \frac{0,707 P}{A_n}$$

$$= \frac{0,707 \times 305091 + 618,09}{147354} = 1,464 \text{ MPa}$$

Dengan menggunakan perhitungan metode ASTM E519-02 di atas, maka didapatkan hasil perhitungan kuat geser diagonal seperti pada Tabel 5.23 berikut ini.

Tabel 5.23 Rekapitulasi hasil perhitungan kuat geser diagonal metode ASTM E519-02

No	Benda uji	Tampang bersih A_n (mm ²)	Beban maksimum (kN)	Kuat geser diagonal (MPa)
1	PD-KGe-S1	147354	305,091	1,464
2	PD-KGe-S2	142443	256,041	1,271
3	PD-KGe-S3	146918,5	347,274	1,671

Berdasarkan perhitungan dengan metode SNI 03-4166-1996 dan ASTM E519-02 di atas, berturut-turut didapatkan kuat geser diagonal rata-rata sebesar 1,031 MPa dan 1,469 MPa.

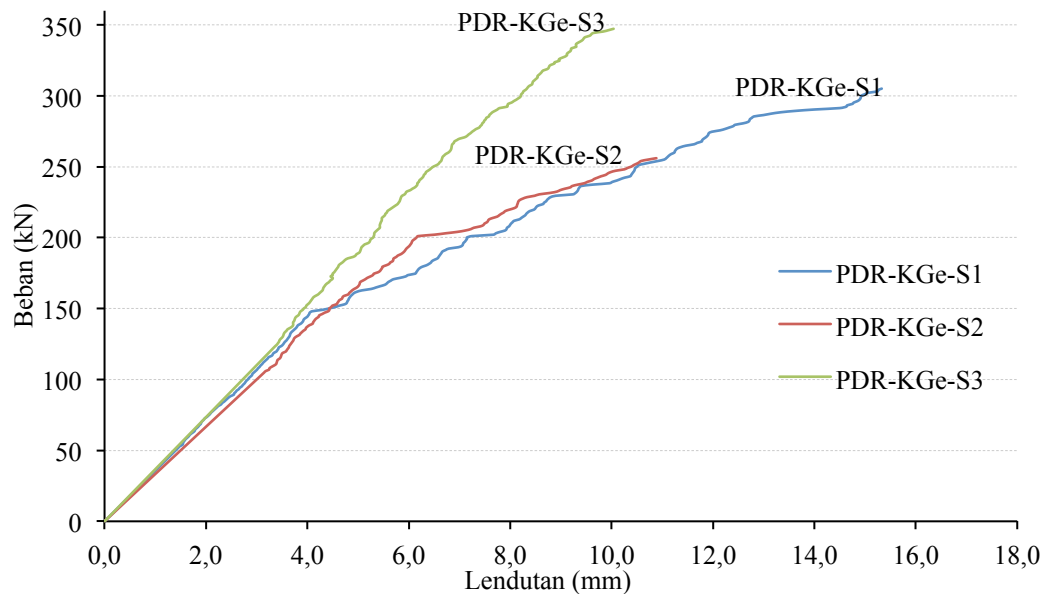
5.5.2 Pembahasan

Pengujian kuat geser diagonal merupakan konsep permodelan untuk mengetahui perilaku struktur ketika mendapatkan beban lateral. Perilaku struktur dapat ditinjau dari pola keruntuhan yang terjadi akibat adanya beban lateral. Bagian sudut benda uji panel dinding merupakan salah satu daerah runtuh akibat beban lateral yang diberikan, hal ini disebabkan karena bagian ujung-ujung panel dinding merupakan bagian titik sentuh pembebanan.

Hasil perhitungan kuat geser benda uji panel dinding dengan menggunakan persamaan SNI 03-4166-1996, didapatkan nilai kuat geser diagonal benda uji panel dinding uji geser diagonal sampel 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 1,028 MPa, 0,892 MPa, dan 1,173 MPa. Sementara hasil perhitungan kuat geser benda uji panel dinding dengan menggunakan persamaan ASTM E-519M-15, didapatkan hasil kuat geser diagonal benda uji panel dinding uji geser sampel 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 1,464 MPa, 1,271 MPa, dan 1,671 MPa. Kuat geser terendah didapatkan pada benda uji panel dinding uji geser diagonal sampel 2 (PD-KGe-S2), yaitu sebesar 0,892 MPa berdasarkan metode uji kuat geser diagonal SNI 03-4166-1996 dan 1,271 MPa berdasarkan uji kuat geser diagonal ASTM E519-02.

Pada benda uji panel dinding uji geser diagonal sampel 2 terjadi kegagalan tumpuan bagian atas (sepatu uji geser) terlebih dahulu seperti terlihat pada Lampiran L1.19. Lempeng baja yang menjadi tumpuan bagian atas (sepatu uji geser) tidak mampu menahan pembebanan, akibatnya tumpuan bagian atas (sepatu uji geser) tersebut mengalami kegagalan sebelum panel dinding mengalami keruntuhan maksimum (belum mencapai beban maksimum). Hal tersebut mengakibatkan beban maksimum yang dicapai benda uji panel dinding

sampel 2 paling kecil dibanding sampel 1 dan 3 seperti yang terlihat pada Gambar 5.14 berikut ini.



Gambar 5.14 Grafik beban vs lendutan seluruh benda uji geser diagonal

Benda uji panel dinding uji geser sampel 1 dan 3 mampu mencapai beban maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel 2 karena tidak terjadi kegagalan pada tumpuan bagian atas dan bawah (seperti uji geser). Benda uji panel dinding uji geser sampel 1 dan 3 memiliki karakteristik kegagalan yang sama, yaitu kegagalan pada bagian sudut-sudut pembebanan (sudut atas dan bawah). Kegagalan pada bagian tersebut menunjukkan pembebanan yang diberikan mengakibatkan efek tekuk pada benda uji panel dinding uji geser diagonal tersebut. Kegagalan tersebut tidak sesuai dengan ASTM E519-02, kegagalan benda uji pada pengujian geser diagonal berdasarkan ASTM E519-02 tersebut seharusnya terjadi pada bagian tengah benda uji, yaitu terjadi keretakan pada bagian tengah benda uji (arah vertikal dari sudut atas ke sudut bawah benda uji).

Pada saat pengujian panel dinding, keruntuhan awal terjadi pada bagian sudut-sudut panel dinding yang menjadi tumpuan mengalami retak halus seperti yang terlihat pada Lampiran L1.20. Selanjutnya, ketika beban terus bertambah,

terjadi keruntuhan pada bagian samping panel dinding, yaitu terjadi retak pada sambungan antar lapisan panel dinding (dapat dilihat pada Lampiran L1.21). Mekanisme keruntuhan 3 benda uji panel dinding cenderung sama seperti di atas.

Hasil pengujian yang didapatkan belum sesuai dengan syarat pengujian ASTM E519-02, yaitu keruntuhan yang terjadi tidak pada bagian tengah panel dinding. Hal ini disebabkan karena perbedaan karakteristik benda uji yang digunakan. Benda uji yang digunakan pada pengujian ASTM E519-02 merupakan dinding pasangan, sementara benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah panel dinding dengan menggunakan tulangan jaring kawat. Perbedaan benda uji tersebut dapat mengakibatkan pola keruntuhan yang berbeda, sehingga pola keruntuhan yang dihasilkan pada benda uji panel dinding di penelitian ini berbeda dengan syarat ASTM E519-02. Faktor lain yang dapat menyebabkan perbedaan tersebut adalah adanya perbedaan alat bantu berupa tumpuan bagian atas dan bawah (sepatu uji geser) antara yang digunakan pada pengujian dengan standar pada ASTM E519-02. Sepatu uji geser seharusnya memiliki pelat besi pada bagian muka dinding untuk mencegah pergeseran benda uji pada saat pengujian, sehingga pembebanan dapat dilakukan hingga beban maksimum dan mencapai kegagalan sesuai dengan standar ASTM E519-02.