

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pemeriksaan Material

Pengujian yang telah dilakukan di laboratorium untuk mengkaji penelitian ini menghasilkan data yang diharapkan sesuai dengan standar spesifikasi yang telah ditentukan. Untuk mendapatkan material yang layak, perlu dilakukan pengujian fisis dari agregat dan aspal yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga material yang akan digunakan nantinya memenuhi standar spesifikasi yang telah ditentukan.

4.1.1. Material Balas

Tahapan awal dalam penelitian dilakukan pengujian fisis agregat kasar yang digunakan sebagai material balas. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik agregat yang sesuai dengan standar spesifikasi struktur jalan rel di Indonesia. Hasil pengujian sifat fisis dari material agregat dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil pengujian material agregat

No	Nama Pengujian	Standar/Acuan	Hasil Pengujian	Spesifikasi
1	Berat Jenis (BJ):			
	a. BJ Bulk	SNI 1969:2008 dan PM	2,65	Min 2,6
	b. BJ SSD	No.60 Tahun 2012	2,67	Min 2,6
	c. BJ Semu		2,71	Min 2,6
	d. Penyerapan air		0,85	Max 3,0 %
2	Kadar Lumpur	SNI 03-4141:1996 dan PM No.60 Tahun 2012	1,7	Max 0,5 %
3	Keausan Agregat	SNI 2417:2008 dan PM No.60 Tahun 2012	17,3	Max 25 %

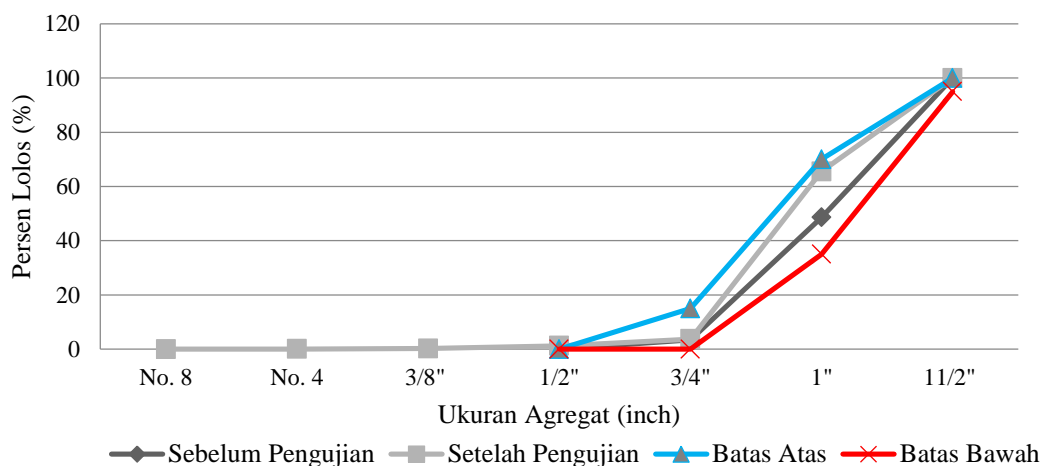
Tabel 4.1 menunjukkan ada tiga pengujian dasar yang dilakukan untuk mendapatkan material agregat yang sesuai standar spesifikasi struktur jalan rel di Indonesia yaitu berat jenis, kadar lumpur, dan keausan agregat. Untuk semua

pengujian berat jenis dan penyerapan air, hasil yang didapatkan sudah memenuhi standar spesifikasi yang ada yaitu minimal 2,6 untuk berat jenis dan maksimal 3% untuk penyerapan air. Kemudian hasil uji kadar lumpur yang didapatkan tidak memenuhi standar spesifikasi yaitu maksimal 0,5%. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi agregat yang sangat kotor ketika diambil langsung dari daerah Clereng dan juga pembersihan agregat yang tidak merata. Selanjutnya pada pengujian keausan agregat didapatkan hasil yang sudah memenuhi standar spesifikasi yaitu maksimal 25%.

Pada material agregat kasar ini juga dilakukan tahapan pengujian analisis saringan. Hal ini dilakukan bertujuan untuk memperoleh ukuran butir dari agregat kasar yang memenuhi spesifikasi sebagai struktur jalan rel. Hasil pengujian analisis saringan dari agregat kasar selengkapnya disajikan pada Tabel 4.2 dan dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Hasil pengujian analisis saringan

Ukuran Saringan (inch)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	Persen komulatif Tertahan (%)	Persen Komulatif Lewat (gram)	Spesifikasi
3"	0	0	0	100	-
2 ¹ / ₂ "	0	0	0	100	100
2"	0	0	0	100	100-95
1 ¹ / ₂ "	2571,1	2571,1	41,4251	48,5749	35-70
1"	2253,2	4824,2	96,4918	3,50821	0-15
³ / ₄ "	165,8	4990,1	99,808	0,19201	-
¹ / ₂ "	9,6	4999,7	100	0	0-5
³ / ₈ "	0	0	0	0	-
Pan	0	0	0	0	-
Jumlah	4999,7	4999,7	100	100	-



Gambar 4.1 Distribusi ukuran butiran agregat kasar

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Gambar 4.1 yang telah dibuat, gradasi material agregat yang didapatkan berada pada ukuran nominal 2" - 1" yang mana dalam Rosyidi (2015) yang berjudul *Rekayasa Jalan Kereta Api*, material balas yang digunakan termasuk pada kriteria jalan kelas III dan IV dengan kecepatan yang diijinkan adalah 100 km/jam dengan tebal lapisan balas 30 cm untuk kelas jalan III dan kecepatan 90 km/jam dengan tebal lapisan balas 25 cm untuk kelas jalan IV yang mengacu pada PD (Peraturan Dinas) No. 10 tahun 1986 dan Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012.

4.1.2. Aspal

Material aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 yang biasanya dipakai dalam perkerasan jalan di Indonesia. Pada penelitian ini, aspal digunakan sebagai bahan campuran modifikasi balas yang berfungsi sebagai pengikat antara material balas. Aspal yang telah mengalami pengujian fisis, kemudian dimasukkan ke dalam oven selama 4 jam dengan suhu mencapai 155 °C.

Hasil pengujian fisis material aspal ditunjukkan pada Tabel 4.3 yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) sebagai berikut.

Tabel 4.3 Hasil pengujian material aspal

No	Jenis Pengujian	Standar/Acuan	Spesifikasi	Hasil Pengujian	Satuan
1	Penetrasi aspal	SNI 2456:2011	60-70	63,4	0,1 mm
2	Berat jenis aspal	SNI 2441:2011	≥ 1	1,043	-
3	Titik lembek aspal	SNI 2434:2011	≥ 48	51,5	$^{\circ}\text{C}$
4	Daktilitas aspal	SNI 06-2432-1991	≥ 100	147	cm
5	Kehilangan berat minyak dan aspal	SNI 06-2440-1991	$\leq 0,8$	0,39	%

Pada Tabel 4.3 menunjukkan semua hasil uji fisis material aspal yang digunakan sudah memenuhi standar spesifikasi yang ada. Pada pengujian penetrasi aspal memperoleh hasil sebesar 63,4 mm. Pada pengujian berat jenis aspal memperoleh hasil sebesar 1,043. Pada pengujian titik lembek aspal memperoleh hasil sebesar 51,5 $^{\circ}\text{C}$. Pada pengujian daktilitas aspal memperoleh hasil sebesar 147 cm. Kemudian untuk pengujian kehilangan berat minyak dan aspal memperoleh hasil sebesar 0.3%.

4.2. Pembahasan

Sebelum pengujian kuat tekan dilaksanakan, dilakukan pemeriksaan terlebih dahulu terhadap benda uji guna mengetahui karakteristik dari masing-masing benda uji. Hasil pemeriksaan benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4 Karakteristik benda uji

No	Jenis Pemeriksaan	Benda Uji I	Benda Uji II	Benda Uji III	Satuan
1	Berat Benda Uji + Box	50005	47150	49650	Gr
2	Berat Box	10200	10205	10238	Gr
3	Berat Benda Uji	39805	36945	39412	Gr
4	Volume Box	24000	24000	24000	cm ³
5	Berat Vol. Benda Uji	1,659	1,539	1,642	gr/cm ³
6	% Aspal Terhadap Berat	-	2	3	%
7	% Balas Terhadap Berat	100	98	97	%
8	BJ Rata-Rata Aspal	-	1,06	1,06	-
9	BJ Rata-Rata Balas	2,69	2,69	2,69	-
10	BJ Maks. Teoritis Vol. Aspal Dalam	2,69	2,62	2,57	-
11	Campuran Vol. Balas Dalam	-	3,71	4,65	%
12	Campuran Vol. Pori Dalam	61,66	56,08	59,22	%
13	Campuran	38,34	41,21	36,14	%
14	Pemadatan	25	25	25	Tmbkn

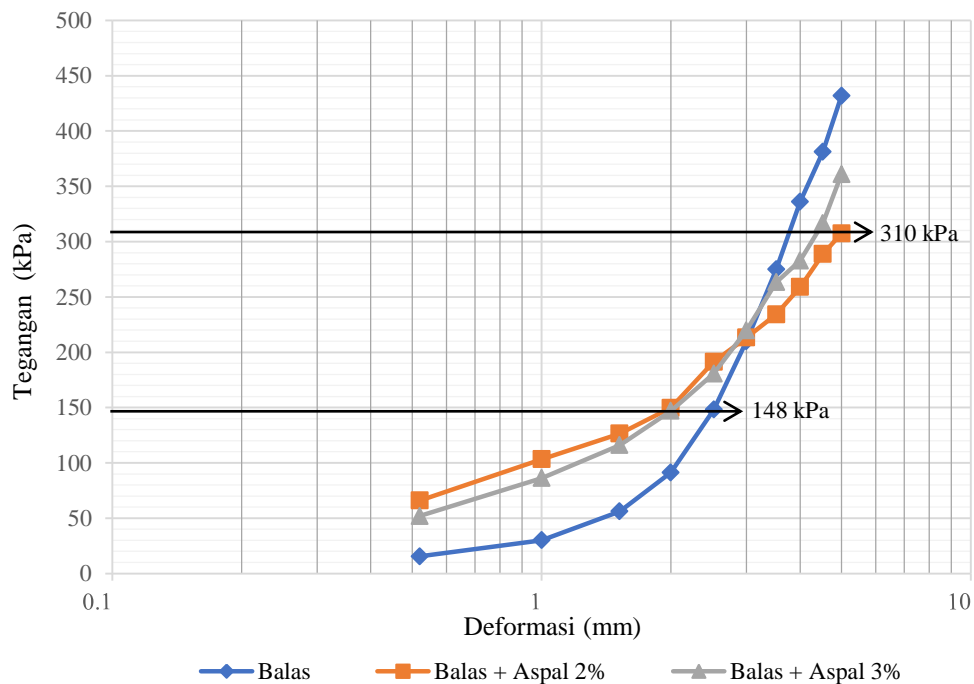
Setelah dilakukan pemeriksaan karakteristik, kemudian dilakukan pengujian kuat tekan yang menghasilkan gaya, tegangan, regangan, dan perubahan tinggi. Kemudian dari data tersebut diolah dan dianalisis untuk memperoleh nilai deformasi vertikal, modulus elastisitas, dan durabilitas lapisan balas.

4.2.1. Nilai Deformasi Akibat Campuran Aspal pada Balas

Deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu benda akibat dari perlakuan berupa pembebanan. Besarnya nilai deformasi vertikal atau penurunan pada lapisan balas didapatkan dari hasil pembebanan setelah dilakukannya pengujian kuat tekan. Nilai deformasi diambil dari hasil pengujian kuat tekan pada masing-masing benda uji yang memiliki angka penurunan berbeda-beda tergantung dari komposisi materialnya. Berikut ini adalah nilai deformasi dari masing-masing benda uji dan grafik yang telah dibuat dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.2 berikut ini.

Tabel 4.5 Nilai tegangan dan deformasi dari benda uji

No	Benda Uji I		Benda Uji II		Benda Uji III	
	Tegangan (kPa)	Deformasi (%)	Tegangan (kPa)	Deformasi (%)	Tegangan (kPa)	Deformasi (%)
Awal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	15,43	0,52	65,95	0,52	51,89	0,52
1	30,08	1,00	103,26	1,00	86,13	1,00
2	56,11	1,52	126,35	1,52	116,02	1,52
3	91,29	2,00	149,67	2,00	147,02	2,00
4	148,09	2,52	191,39	2,52	180,63	2,52
5	209,86	3,00	213,20	3,00	219,71	3,00
6	274,81	3,52	234,26	3,52	263,24	3,52
7	336,06	4,00	258,95	4,00	282,82	4,00
8	381,25	4,52	288,80	4,52	316,67	4,52
9	431,84	5,00	307,38	5,00	360,94	5,00
Puncak	681,34	6,88	567,08	8,80	743,93	10,92
Akhir	679,77	6,92	544,45	8,96	721,04	10,6



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara tegangan dan penurunan

Kemudian untuk nilai deformasi yang dihasilkan dari nilai tegangan yang sama pada masing-masing benda uji disajikan dalam Tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6 Nilai deformasi pada tegangan yang sama

No	Jenis Benda Uji	Tegangan (kPa)	Deformasi (mm)
1	Benda Uji I	310	4,00
2	Benda Uji II	310	5,00
3	Benda Uji III	310	4,52

Seperti yang terlihat dalam Tabel 4.5 dan Gambar 4.2 di atas, hasil pengujian kuat tekan memperoleh nilai deformasi yang berbeda. Ketika nilai tegangan yang diberikan sebesar ± 148 kPa didapatkan nilai deformasi sebesar 2,52 mm untuk benda uji 1 dan nilai deformasi sebesar 2 mm untuk benda uji 2 dan benda uji 3. Deformasi terbesar terjadi pada benda uji 1 dimana dengan nilai tegangan yang kurang lebih sama, tetapi didapatkan nilai deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan 2 benda uji lainnya yaitu 2,52 mm. Hal ini menunjukkan fungsi aspal bekerja dengan baik yaitu mengikat antara material agregat, sehingga timbul adanya peningkatan kekakuan dengan ditambahkan aspal pada benda uji. Namun, hal itu berbeda ketika nilai tegangan yang diberikan sebesar ± 310 kPa, yang mana didapatkan nilai deformasi sebesar 4 mm untuk benda uji 1, 5 mm untuk benda uji 2, dan 4,52 mm untuk benda uji 3. Nilai deformasi terbesar didapatkan pada benda uji 2 diikuti benda uji 3 dan benda uji 1. Hal ini menunjukkan hilangnya fungsi aspal sebagai bahan pengikat antara material agregat, sehingga timbul adanya penurunan kekakuan pada benda uji.

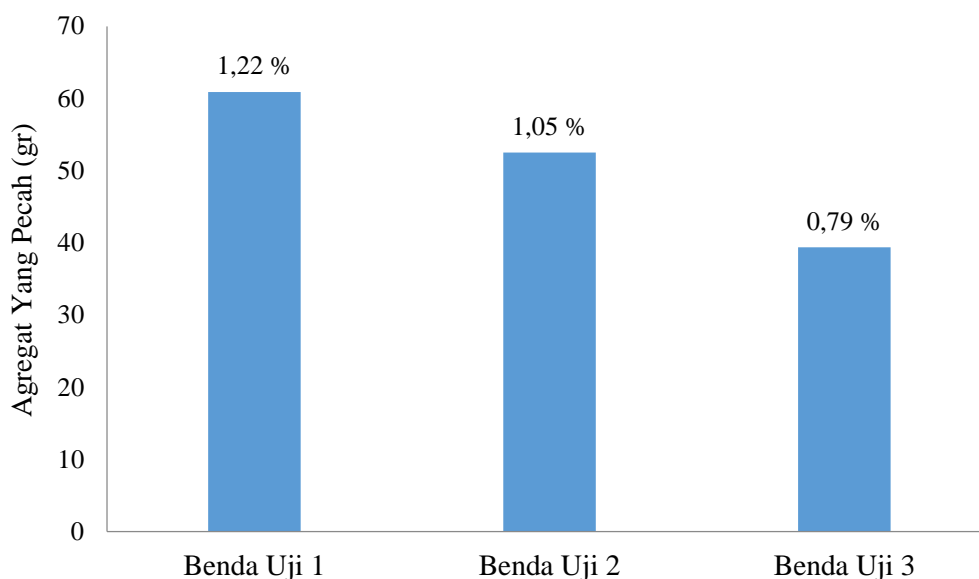
Perbedaan nilai deformasi ketika diberikan nilai tegangan yang berbeda dapat memberikan penjelasan bahwa penambahan aspal tidak hanya dapat menurunkan nilai deformasi dengan peningkatan kekakuan tetapi juga dapat menaikkan nilai deformasi dengan penurunan kekakuan. Pada nilai tegangan ± 148 kPa, membuktikan jika aspal yang ditambahkan pada lapisan balas sebagai pengikat di antara materialnya dapat mengurangi deformasi vertikal sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh D'Angelo dkk. (2017) yang menjelaskan bahwa penambahan aspal emulsi dapat menurunkan nilai deformasi vertikal pada

lapisan balas. Akan tetapi, ketika nilai tegangan yang diberikan berkisar antara ± 310 kPa membuktikan bahwa penambahan aspal pada lapisan balas membuat nilai deformasi vertikal lebih besar jika dibandingkan dengan balas tanpa campuran.

Berdasarkan uraian di atas, penambahan aspal pada lapisan balas sebagai pengikat material dapat mengurangi nilai deformasi, akan tetapi juga bisa memperbesar nilai deformasi dari lapisan balas. Oleh karena itu, perlunya evaluasi dan pembahasan lebih lanjut terkait metode pemadatan, pembuatan, serta pengujian kuat tekan dari penambahan aspal pada lapisan balas dalam menentukan metode pembuatan maupun pengujian yang paling tepat untuk penelitian selanjutnya.

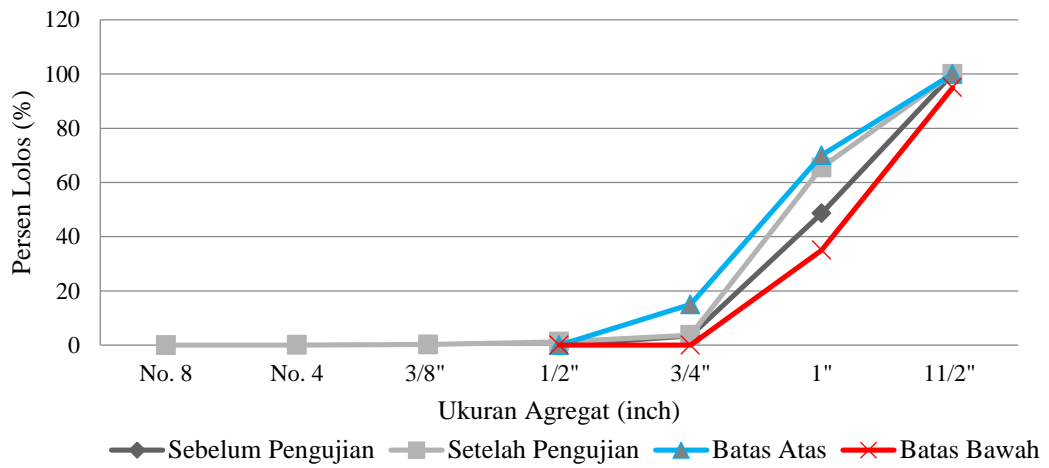
4.2.2. Durabilitas Lapisan Balas Akibat Campuran Aspal

Durabilitas merupakan kemampuan suatu material dalam menghadapi kerusakan yang disebabkan dari berbagai perilaku dan kondisi. Pengambilan material agregat sebesar ± 5 kg sebelum dan sesudah pengujian kuat tekan dilakukan untuk mendapatkan durabilitas dari masing-masing benda uji dengan cara analisis saringan. Pada penelitian ini, pembebanan pada tahap pengujian kuat tekan menyebabkan rusaknya sebagian dari agregat. Untuk kriteria kerusakan pada agregat dalam penelitian ini adalah agregat yang lolos saringan di bawah nomer $\frac{3}{4}$ ". Berikut ini grafik kerusakan pada masing-masing benda uji yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini.

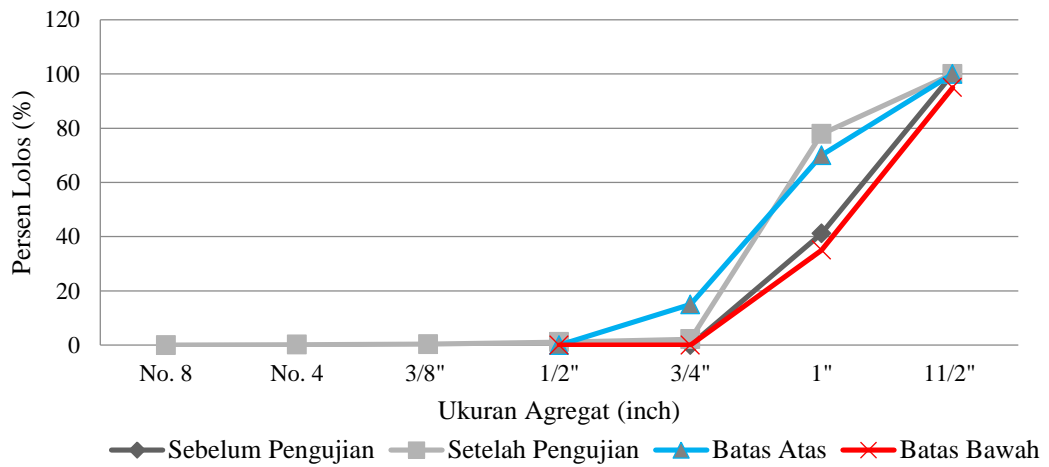


Gambar 4.3 Peningkatan durabilitas material benda uji

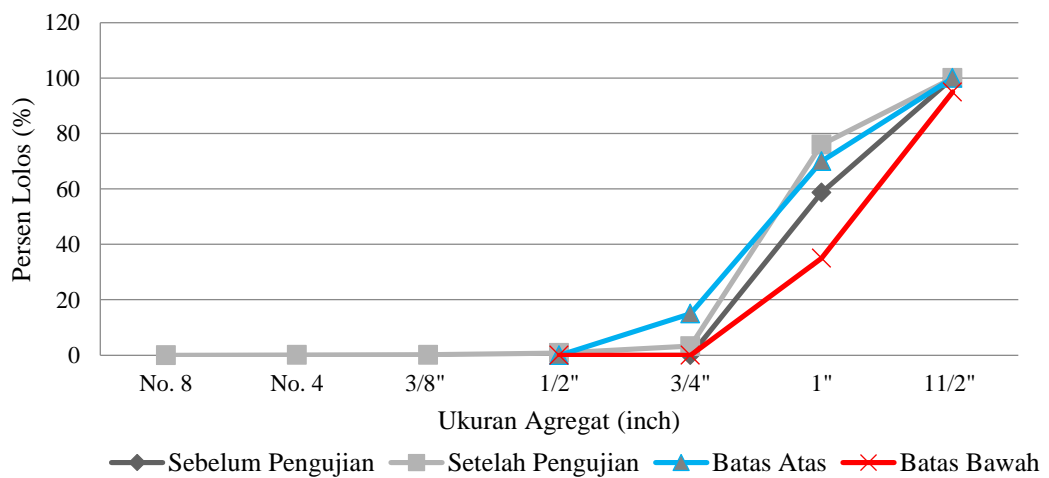
Hasil pengujian durabilitas tersebut diperoleh dengan mengambil 5000 gram dari masing-masing benda uji sebelum dan sesudah pengujian. Berdasarkan Gambar 4.3 menunjukkan bahwa penambahan aspal dapat mengurangi nilai kerusakan pada material yang berdampak pada meningkatnya durabilitas benda uji 2 dan benda uji 3. Pada benda uji 1 yang tersusun dari material agregat tanpa campuran memperoleh hasil yang paling besar yaitu 60,9 gram (1,22%). Benda uji 2 dengan material agregat ditambah aspal 2% memperoleh hasil yang lebih kecil yaitu 52,5 gram (1,05%). Kemudian benda uji 3 dengan material agregat ditambah aspal 3% memperoleh hasil yang paling kecil yaitu 39,4 gram (0,79%). Berdasarkan hasil yang diperoleh dapat diketahui bahwa penambahan aspal dengan prosentase 2% maupun 3% dari berat total benda uji, secara keseluruhan dapat meningkatkan durabilitas material lapisan balas. hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh D'Angelo dkk. (2016) yang menyatakan bahwa penggunaan bahan tambah bitumen pada lapisan balas dapat meningkatkan ketahanan/durabilitas dan meningkatnya umur layanan. Sebaran material balas dari masing-masing benda uji ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.4 Sebaran material benda uji 1



Gambar 4.5 Sebaran material benda uji 2



Gambar 4.6 Sebaran material benda uji 3

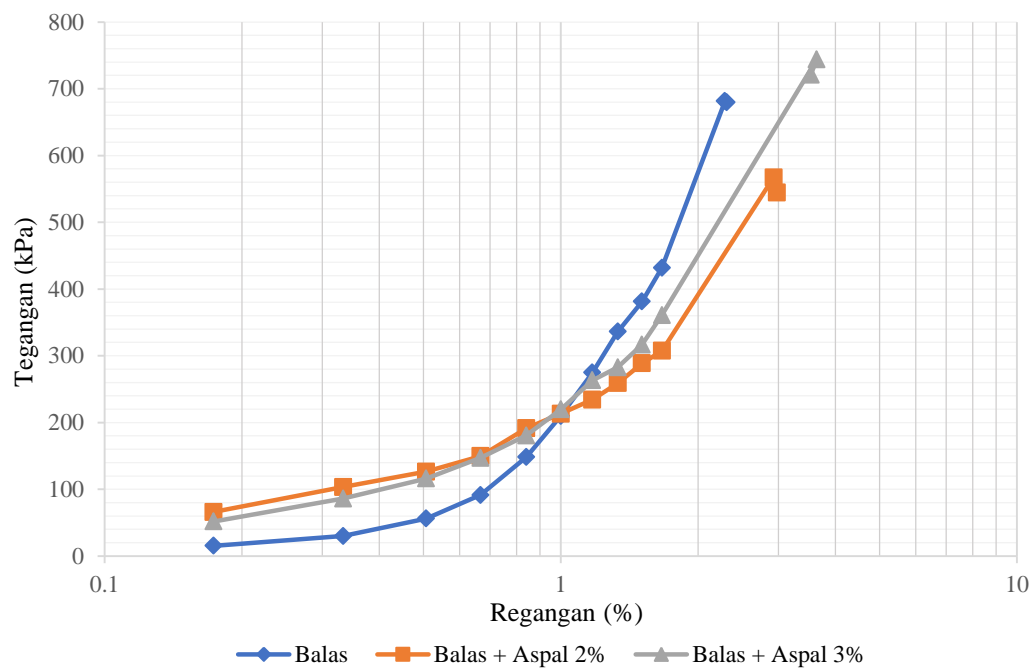
Penelitian ini menunjukkan kesamaan pada penelitian terdahulu mengenai penambahan aspal pada lapisan balas. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan Rose dkk. (2009), Mino dkk. (2012), dan D'Angelo dkk. (2017) menjelaskan bahwa penambahan aspal meningkatkan durabilitas material agregat. Hal ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya durabilitas pada lapisan balas, maka akan menambah umur layanan lapisan balas pada struktur jalan rel.

4.2.3. Nilai Modulus Elastisitas Akibat Campuran Aspal pada Balas

Modulus elastisitas merupakan nilai yang menunjukkan kekakuan suatu bahan dalam menghadapi perilaku dan kondisi tertentu. Modulus elastisitas merupakan besaran nilai yang menggambarkan tingkat elastisitas bahan material dan dihasilkan berdasarkan hubungan tegangan dan regangan (Sehonanda dkk., 2013). Material bahan yang kaku cenderung memiliki nilai modulus elastisitas yang tinggi dengan kata lain bahan atau material mempunyai tingkat kekakuan yang tinggi, sehingga nilai modulus elastisitas juga semakin tinggi. Nilai modulus elastisitas diambil dari regangan dan tegangan yang didapat setelah melakukan pengujian kuat tekan pada masing-masing benda uji. Berikut adalah Tabel 4.6 dan Gambar 4.7 yang menunjukkan nilai tegangan dan regangan hasil pengujian ini.

Tabel 4.7 Nilai tegangan dan regangan dari benda uji

No	Benda Uji I		Benda Uji II		Benda Uji III	
	Tegangan (kPa)	Regangan (%)	Tegangan (kPa)	Regangan (%)	Tegangan (kPa)	Regangan (%)
Awal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	15,43	0,17	65,95	0,17	51,89	0,17
1	30,08	0,33	103,26	0,33	86,13	0,33
2	56,11	0,51	126,35	0,51	116,02	0,51
3	91,29	0,67	149,67	0,67	147,02	0,67
4	148,09	0,84	191,39	0,84	180,63	0,84
5	209,86	1,00	213,20	1,00	219,71	1,00
6	274,81	1,17	234,26	1,17	263,24	1,17
7	336,06	1,33	258,95	1,33	282,82	1,33
8	381,25	1,51	288,80	1,51	316,67	1,51
9	431,84	1,67	307,38	1,67	360,94	1,67
Puncak	681,34	2,29	567,08	2,93	743,93	3,64
Akhir	679,77	2,31	544,45	2,98	721,04	3,53

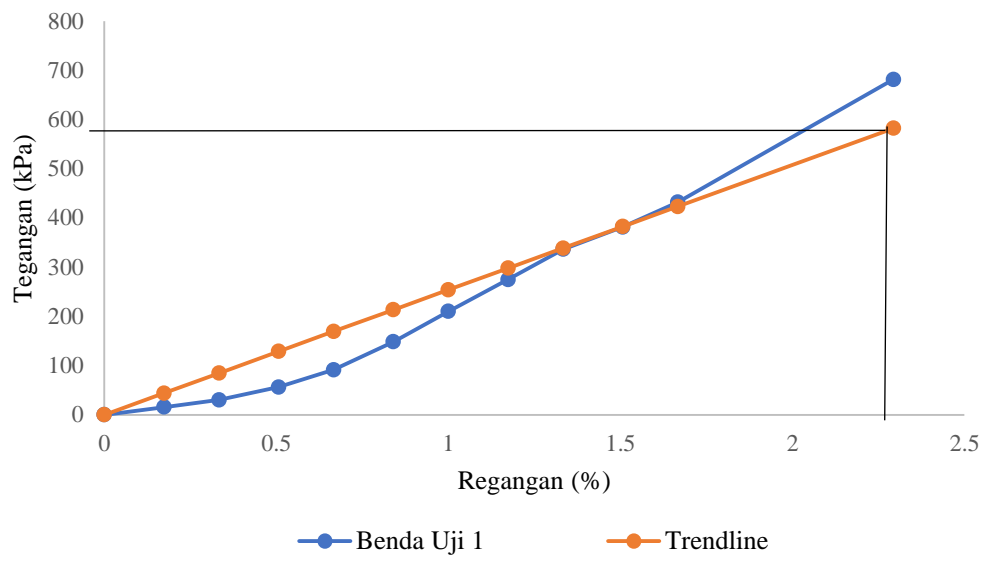


Gambar 4.7 Grafik hubungan antara tegangan dan regangan

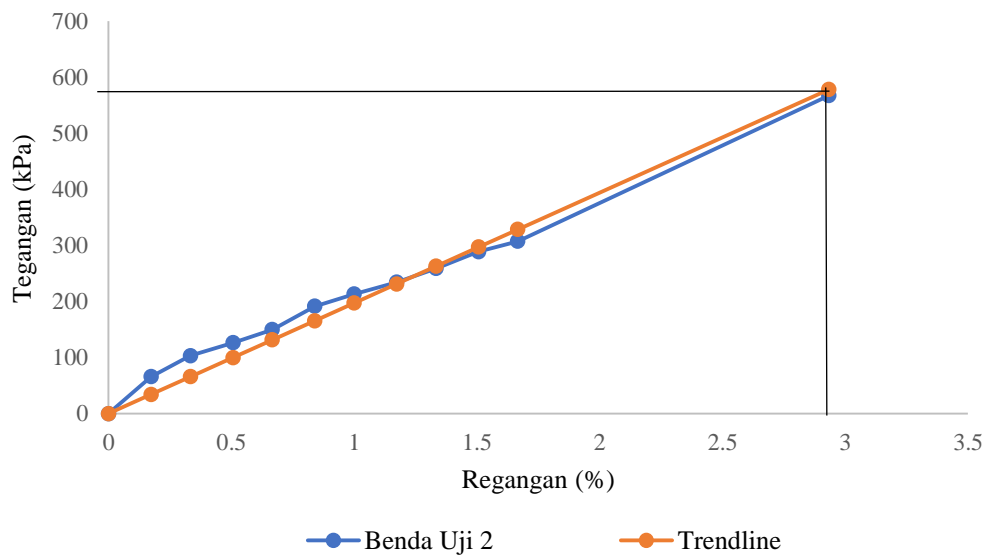
Hasil pengujian yang telah disajikan dalam Tabel 4.7 dan Gambar 4.7 menunjukkan nilai tegangan dan regangan seperti di atas. Nilai tegangan yang dihasilkan dalam regangan yang sama yaitu 1,67% berturut-turut sebesar 431,84 kPa untuk benda uji 1, 307,38 kPa untuk benda uji 2, dan 360,94 kPa untuk benda uji 3. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa penambahan aspal justru mengurangi tingkat kekakuan dari lapisan balas atau bisa dikatakan menurunkan nilai modulus elastisitas.

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh dan juga grafik hubungan antara tegangan dan regangan pada Gambar 4.6 menunjukkan perubahan tingkat kekakuan yang berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Seperti dalam penelitian D'Angelo dkk. (2016) yang menyatakan bahwa penambahan bahan bitumen pada struktur lapisan balas dapat mengurangi deformasi dan meningkatkan kekakuan. Hal ini berbeda dengan hasil grafik pada Gambar 4.6 yang mana meningkatnya kekakuan benda uji terjadi pada titik awal saja, tapi kemudian dari titik tengah hingga titik puncak mengalami penurunan. Menurunnya tingkat kekakuan terjadi baik itu pada benda uji 2 dan benda uji 3 dibandingkan dengan benda uji 1. Hal ini bisa disebabkan karena tidak maksimalnya pemadatan yang dilakukan saat pembuatan benda uji, pencampuran bahan tambah aspal yang tidak merata, maupun rentang waktu yang dibutuhkan saat penuangan aspal panas pada benda uji hingga waktu pengujian kuat tekan.

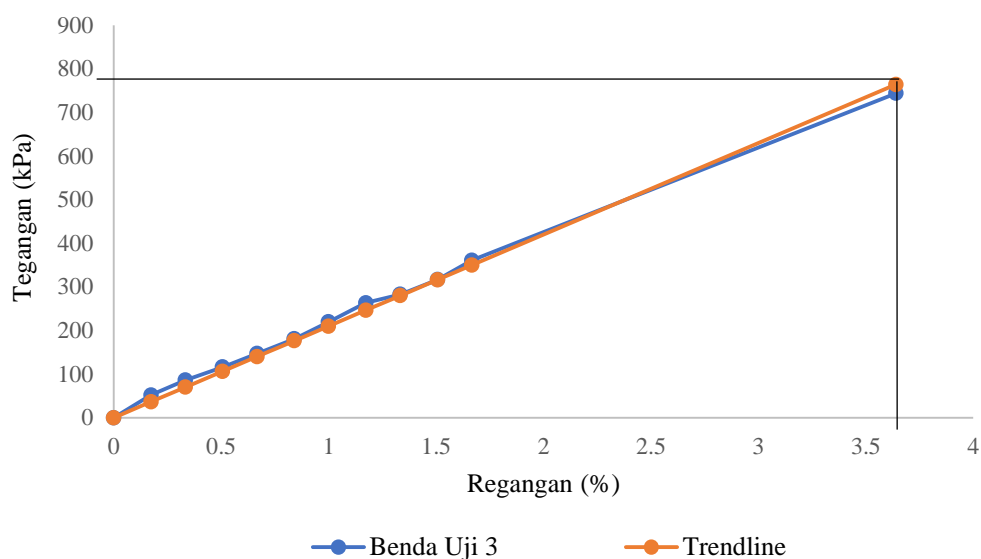
Nilai modulus elastisitas yang didapatkan dari hasil pengujian diambil dari koreksi dan perbaikan grafik hubungan tegangan dan regangan menggunakan *trendline*. Perbaikan menggunakan *trendline* bertujuan untuk menghasilkan kurva linier dari grafik hubungan tegangan dan regangan sehingga kemiringan batas elastis dari kurva dapat terlihat dari setiap benda uji. Hal ini dilakukan karena pengujian kuat tekan yang dilakukan pada setiap benda uji menghasilkan nilai tegangan dan regangan yang tinggi dan memungkinkan untuk mendapatkan nilai yang lebih besar. Akan tetapi, *box* benda uji hanya bisa menerima beban maksimal sebesar 3 ton serta ditambah lagi sulitnya mengetahui kondisi plastis dan elastis dari data yang diperoleh sehingga digunakan metode perbaikan garis *trendline*. Hasil perbaikan grafik hubungan tegangan dan regangan menggunakan *trendline* tersaji pada Gambar 4.8, Gambar 4.9, dan Gambar 4.10 di bawah ini.



Gambar 4.8 Grafik perbaikan dengan *trendline* pada benda uji 1



Gambar 4.9 Grafik perbaikan dengan *trendline* pada benda uji 2



Gambar 4.10 Grafik perbaikan dengan *trendline* pada benda uji 3

Kemudian dari hasil perbaikan grafik menggunakan *trendline* didapatkan nilai tegangan dan regangan yang akan digunakan untuk mencari nilai modulus elastisitas yang sudah disajikan pada Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.8 Nilai modulus elastisitas pada benda uji

No	Jenis Benda Uji	Tegangan (kPa)	Regangan (%)	E (kPa)	E (MPa)
1	Benda Uji I	582,06	2,29	25381,00	25,38
2	Benda Uji II	578,09	2,93	19710,00	19,71
3	Benda Uji III	764,18	3,64	20994,00	20,99

Seperti yang telah tersaji pada Tabel 4.8 nilai modulus elastisitas atau kekakuan yang paling tinggi didapatkan pada benda uji I sebesar 25,38 MPa. Sedangkan nilai modulus elastisitas pada benda uji II sebesar 19,71 MPa dan pada benda uji III sebesar 20,99 MPa. Penambahan material aspal pada benda uji II dan benda uji III yang direncanakan meningkatkan nilai moduls elastisitas justru mendapatkan nilai yang lebih rendah dibandingkan benda uji I yang material penyusunnya adalah agregat tanpa campuran.

Penurunan nilai modulus elastisitas pada benda uji yang ditambahkan material aspal berbeda dengan apa yang dinyatakan D'Angelo dkk. (2016) bahwa aspal dapat meningkatkan kekakuan. Penambahan aspal yang difungsikan sebagai

pengikat antar material agregat guna meningkatkan kekakuan, akan tetapi membuat menurunnya nilai modulus elastisitas dari benda uji. Hal ini bisa disebabkan oleh tidak maksimalnya proses penumbukan/pemadatan maupun pencampuran aspal dengan material agregat yang hanya dituangkan pada tiap layer dan juga faktor-faktor lain selama proses penelitian seperti lamanya waktu yang dibutuhkan aspal untuk mengeras setelah dicampurkan pada benda uji. Sehingga, perlu adanya pembahasan lebih lanjut mengenai hal ini agar penambahan material aspal selaras dengan fungsinya yaitu sebagai material pengikat yang dapat meningkatkan kekakuan.