

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pemeriksaan Spesifikasi Material

Pemeriksaan spesifikasi material dilakukan untuk mengetahui kelayakan material agregat dan aspal yang akan digunakan untuk membuat modifikasi campuran lapisan balas.

4.1.1. Agregat

Langkah pertama pada penelitian ini adalah melakukan pemeriksaan fisik dan mekanis dari material agregat untuk membuktikan bahwa sifat – sifat agregat sudah sesuai spesifikasi sebagai material penyusun lapisan balas. Tahap pertama pemeriksaan material agregat adalah melakukan pengujian berat jenis dan penyerapan air, kadar lumpur, serta keausan material agregat. Seluruh tahapan pengujian dilakukan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI). Hasil dari pengujian membuktikan bahwa material agregat yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan spesifikasi. Hasil pemeriksaan sifat – sifat material agregat dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pemeriksaan Material Agregat

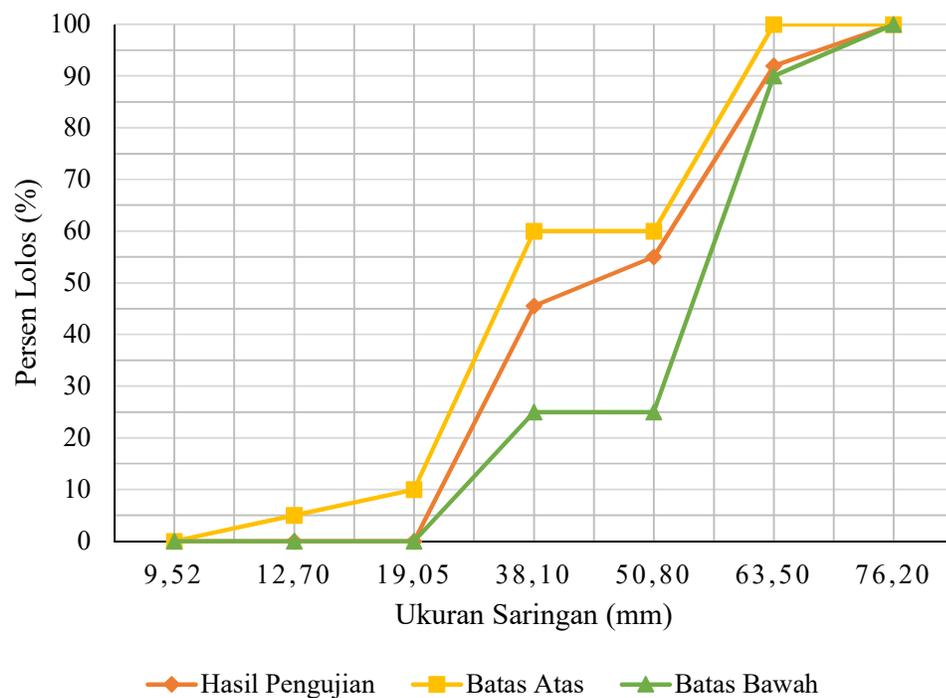
No	Parameter	Hasil	Spesifikasi	Satuan
1	Berat Jenis (BJ):			
	a. BJ Bulk (Sd)	2,61		-
	b. BJ SSD (Ss)	2,68	Min. 2,6	-
	c. BJ Semu (Sa)	2,80		-
	d. Penyerapan air (Sw)	2,65	Maks. 3,0	%
2	Kadar Lumpur	0,21	Maks. 0,5	%
3	Keausan Agregat	1,74	Maks. 25	%

Selain pengujian berat jenis, kadar lumpur, dan keausan agregat, dilakukan pengujian analisis saringan untuk mengetahui gradasi butir dari material agregat yang akan digunakan pada penelitian ini. Hasil dari analisis saringan didapatkan ukuran gradasi material agregat yang sesuai dengan spesifikasi untuk jalan rel kelas

I dan II mengacu pada PD No.10 Tahun 1986. Ukuran gradasi material agregat dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan disajikan dalam grafik pada Gambar 4.1.

Tabel 4.2 Hasil Analisis Saringan

Ukuran Saringan (inch)	Berat Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	Persen Tertahan (%)	Persen Lolos (%)	Spesifikasi
3	0	0	0	100	100
2 ¹ / ₂	403,64	403,64	8	92	90 – 100
2	1866,84	2270,48	37	55	25 – 60
1 ¹ / ₂	479,32	2749,80	9,5	45,5	25 – 60
1	0	2749,80	0	0	–
3/4	2295,70	5045,50	45,5	0	0 – 10
1/2	0	0	0	0	0 – 5
3/8	0	0	0	0	–
Pan	0	0	0	0	–
Jumlah	5045,50	5045,50	100		–



Gambar 4.1 Gradasi Material Agregat

4.1.2. Aspal

Aspal yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal penetrasi 60/70. Aspal tidak memiliki spesifikasi khusus untuk digunakan sebagai campuran lapisan balas pada struktur jalan rel di Indonesia. Pemeriksaan yang dilakukan yaitu penetrasi, titik lembek, berat jenis, daktilitas, dan kehilangan minyak mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI). Hasil pemeriksaan pada material aspal yang dilakukan sudah sesuai dengan spesifikasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pemeriksaan Material Aspal

No	Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Satuan	Acuan
1	Penetrasi	66,7	60 – 70	0,1 mm	SNI 06-2456-1991
2	Titik Lembek	53	≥ 48	$^{\circ}\text{C}$	SNI 2434:2011
3	Berat Jenis	1,01	$\geq 1,0$	–	SNI 2441:2011
4	Daktilitas	>100	≥ 100	cm	SNI 2432:2011
5	Kehilangan Minyak	0,13	$\leq 0,8$	%	SNI 06-2441-1991

4.2. Analisis Berat Benda Uji

Penelitian ini terdapat beberapa benda uji yaitu balas kotor tanpa campuran, balas bersih tanpa campuran, balas bersih dengan campuran aspal pada 1 lapis dan 3 lapis, serta balas kotor dengan campuran aspal pada 1 lapis dan 3 lapis. Benda uji pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Benda Uji Penelitian

No	Benda Uji	Keterangan
1	Balas Bersih	BB
2	Balas Kotor	BK
3	Balas Bersih + 2% Aspal 1 Lapis	BB1
4	Balas Kotor + 2% Aspal 1 Lapis	BK1
5	Balas Bersih + 2% Aspal 3 Lapis	BB3
6	Balas Kotor + 2% Aspal 3 Lapis	BK3

Analisis berat benda uji dilakukan dengan menimbang cetakan benda uji dalam keadaan kosong dan menimbang benda uji yang sudah diletakkan di dalam

cetakan serta dilakukan perhitungan sehingga didapat hasil dari berat benda uji tersebut. Hasil analisis berat benda uji disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Berat Benda Uji

No	Pemeriksaan	BB	BK	BB1	BK1	BB3	BK3	Satuan
1	Berat Benda Uji + <i>Box</i>	47,50	48,54	47,76	48,14	47,14	48,52	kg
2	Berat <i>Box</i>	10,70	10,70	10,65	10,22	10,22	10,70	kg
3	Berat Benda Uji	36,80	37,84	37,11	37,92	36,92	37,82	kg

Dari hasil analisis berat benda uji tersebut dapat disimpulkan bahwa berat balas bersih lebih kecil daripada balas kotor baik tanpa campuran maupun dengan campuran aspal. Berat benda uji BB adalah 36,80 kg lebih kecil dari berat benda uji BK sebesar 37,84 kg, dan berat benda uji BB1 adalah 37,11 kg lebih kecil dari berat benda uji BK1 sebesar 37,92 kg, serta berat benda uji BB3 adalah 36,92 kg lebih kecil dari berat benda uji BK3 sebesar 37,82 kg. Hal ini disebabkan karena balas kotor masih terdapat kandungan lumpur dan butiran pasir yang menempel pada agregat karena tidak adanya proses pencucian seperti pada balas bersih. Sehingga jumlah kandungan lumpur dan butiran pasir tersebut mempengaruhi berat dari benda uji. Pada benda uji dengan campuran aspal, berat benda uji dengan aspal 1 lapis lebih besar daripada berat benda uji dengan aspal 3 lapis baik pada balas bersih maupun balas kotor. Berat benda uji BB1 sebesar 37,11 kg lebih besar dari berat benda uji BB3 sebesar 36,92 kg, dan berat benda uji BK1 sebesar 37,92 kg lebih besar dari berat benda uji BK3 sebesar 37,82 kg. Hal ini dikarenakan pada balas dengan campuran aspal 3 lapis, campuran aspal pada lapis pertama dan kedua mempengaruhi ketebalan dari lapis agregat yang berada di atasnya sehingga jumlah butir agregat lebih sedikit dibandingkan pada balas dengan campuran aspal 1 lapis yang memiliki ketebalan agregat 30 cm sebelum dicampur aspal pada permukaannya.

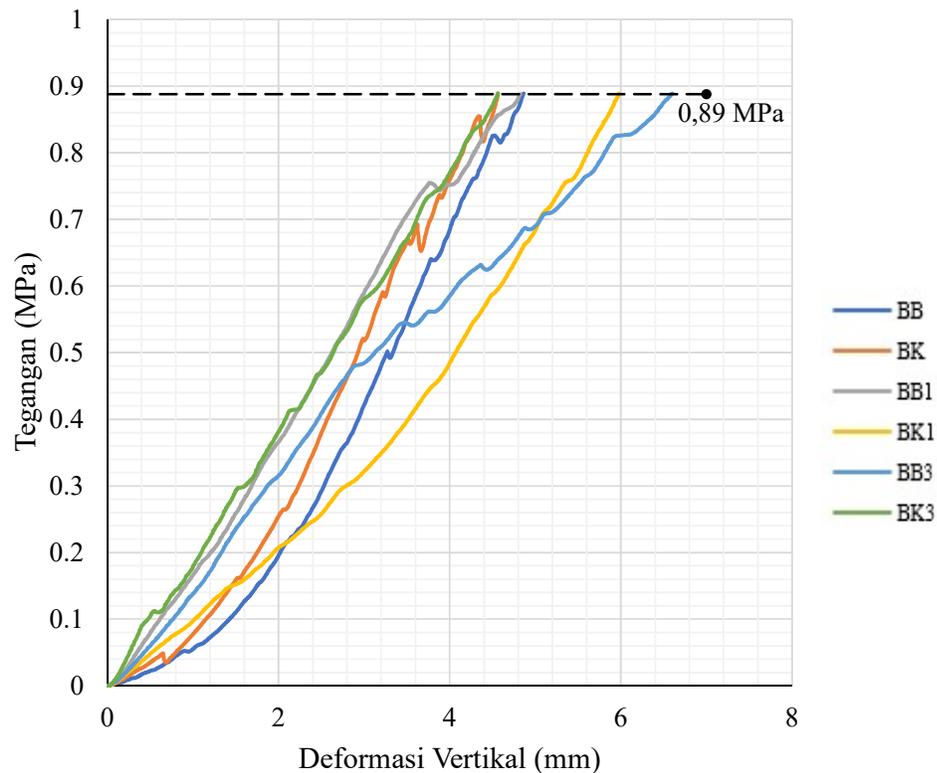
4.3. Analisis Deformasi Vertikal

Nilai deformasi vertikal atau penurunan pada benda uji diperoleh dari *output data* yang dihasilkan oleh alat pengujian tekan *UTM* setelah pembebanan dilakukan. Pada penelitian ini penulis membandingkan penurunan yang terjadi pada

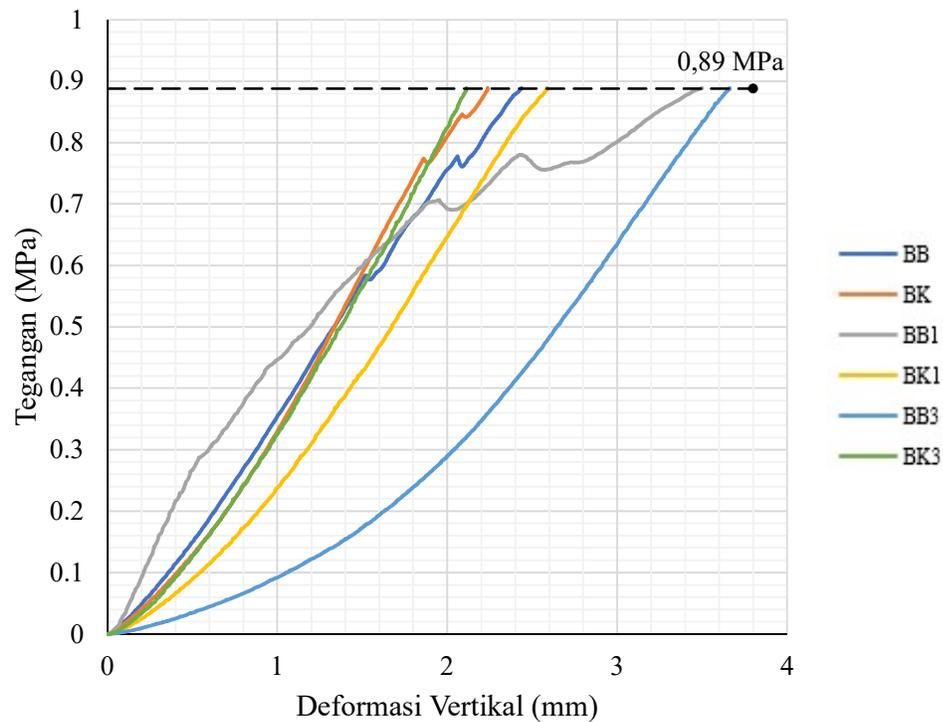
masing – masing benda uji setelah menerima tegangan sebesar 0,89 MPa. Besarnya nilai deformasi vertikal yang terjadi pada benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan disajikan dalam grafik pada Gambar 4.2 (Siklus 1) dan Gambar 4.3 (Siklus 2).

Tabel 4.6 Nilai Deformasi Vertikal

No	Benda Uji	Tegangan (MPa)	Deformasi Vertikal (mm)	
			Siklus 1	Siklus 2
1	BB	0,89	4,86	2,44
2	BK	0,89	4,56	2,24
3	BB1	0,89	4,82	3,50
4	BK1	0,89	5,97	2,59
5	BB3	0,89	6,60	3,66
6	BK3	0,89	4,56	2,11



Gambar 4.2 Kurva Hubungan Tegangan dan Deformasi Vertikal Siklus 1



Gambar 4.3 Kurva Hubungan Tegangan dan Deformasi Vertikal Siklus 2

Hasil dari analisis menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai penurunan yang terjadi pada tiap benda uji pada tegangan sebesar 0,89 MPa pada siklus 1 maupun siklus 2. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai perubahan penurunan pada tiap benda uji. Perubahan nilai penurunan pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Perubahan Nilai Deformasi Vertikal

No	Benda Uji	Deformasi Vertikal (mm)		Perubahan Nilai Deformasi (%)
		Siklus 1	Siklus 2	
1	BK1	5,97	2,59	-56,69
2	BK3	4,56	2,11	-53,69
3	BK	4,56	2,24	-50,96
4	BB	4,86	2,44	-49,87
5	BB3	6,60	3,66	-44,51
6	BB1	4,82	3,50	-27,46

Hasil yang diperoleh yaitu perubahan nilai penurunan yang paling besar dialami oleh benda uji BK1 yaitu sebesar 56,69 % dengan deformasi pada siklus 1 sebesar 5,97 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 2,59 mm, sedangkan nilai perubahan penurunan yang paling rendah adalah benda uji BB1 sebesar 27,46 % dengan deformasi pada siklus 1 sebesar 4,82 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 3,50 mm.

Perubahan nilai penurunan pada benda uji BB dan BK tidak terpaut jauh. Pada benda uji BB perubahan yang terjadi sebesar 49,87 % dengan deformasi pada siklus 1 sebesar 4,86 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 2,44 mm, sedangkan pada benda uji BK perubahan yang terjadi sebesar 50,96 % dengan deformasi pada siklus 1 sebesar 4,56 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 2,24 mm. Tidak adanya campuran aspal pada dua benda uji ini menunjukkan bahwa perubahan nilai penurunan yang terjadi dari siklus 1 ke siklus 2 adalah sebesar $\pm 50\%$.

Pada benda uji BB1 perubahan nilai penurunan yang terjadi adalah 27,46 % lebih kecil dibandingkan benda uji BK1 sebesar 56,69 %. Dapat diartikan bahwa benda uji BK1 mengalami deformasi lebih kecil pada pembebanan siklus 2 dibandingkan benda uji BB1. Hal ini disebabkan pada saat penuangan aspal cair, benda uji BK1 terdapat kandungan butir halus yang menahan aliran aspal sehingga campuran aspal pada lapis permukaan lebih banyak daripada benda uji BB1. Kadar aspal pada lapis permukaan ini berpengaruh terhadap benda uji BK1 yang dapat menahan beban dari perubahan nilai deformasi lebih baik daripada benda uji BB1.

Antara benda uji BB3 dan benda uji BK3, perubahan nilai deformasi yang lebih besar terjadi pada benda uji BK3. Pada benda uji BK3, perubahan nilai deformasi sebesar 53,69 % dengan nilai deformasi pada siklus 1 sebesar 4,56 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 2,11 mm, sedangkan benda uji BB3 sebesar 44,51 % dengan nilai deformasi pada siklus 1 sebesar 6,60 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 3,66 mm. Hal ini disebabkan pada saat penuangan aspal, benda uji BK3 terdapat butir halus yang menahan campuran aspal pada tiap lapisan, sehingga kadar aspal pada tiap lapisan lebih banyak daripada benda uji BB3. Dengan kadar aspal yang lebih banyak di tiap lapisan, maka benda uji BK3 dapat menahan deformasi lebih baik dibandingkan benda uji BB3.

Pada benda uji BB3, perubahan nilai deformasi sebesar 44,51 % dengan deformasi pada siklus 1 sebesar 6,60 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 3,66 mm lebih besar dibandingkan benda uji BB1 sebesar 27,46 % dengan deformasi pada siklus 1 sebesar 4,82 mm dan deformasi pada siklus 2 sebesar 3,50 mm. Pada pembebanan siklus 1 dan siklus 2, nilai deformasi benda uji BB3 lebih tinggi daripada benda uji BB1. Tetapi benda uji BB3 dapat mengurangi nilai penurunan pada siklus 2 lebih tinggi daripada benda uji BB1. Hal ini disebabkan persebaran aspal yang lebih merata pada benda uji BB3 mengurangi nilai penurunan lebih besar dibandingkan dengan benda uji BB1 jika diberikan beban secara berkala.

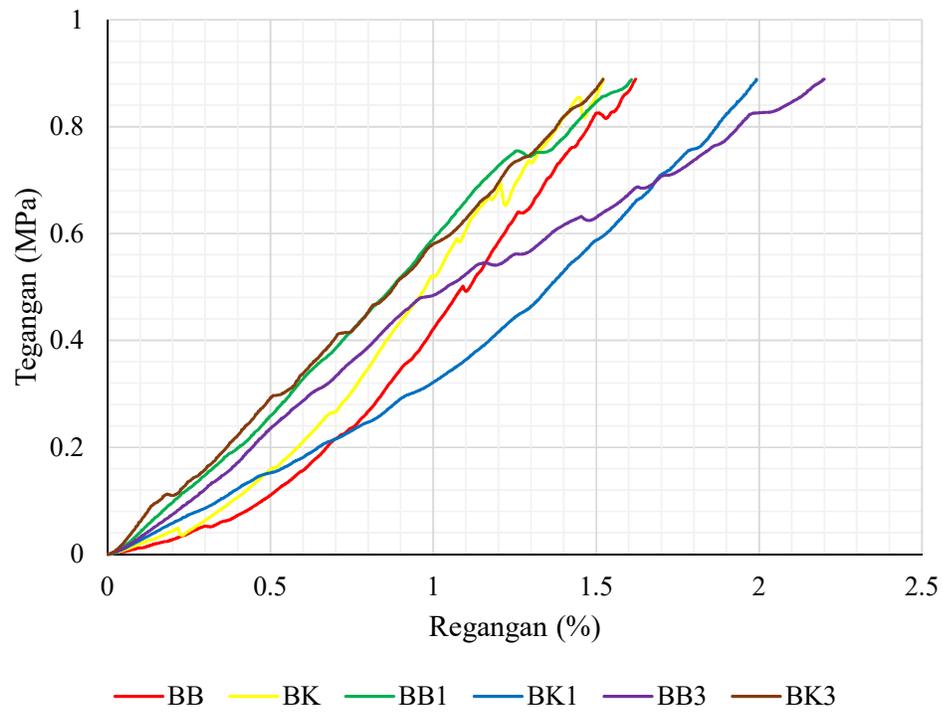
Nilai deformasi siklus 1 dan siklus 2 pada benda uji BK1 lebih tinggi dibandingkan benda uji BK3. Namun, benda uji BK1 memiliki perubahan nilai deformasi sebesar 56,69 % lebih besar jika dibandingkan dengan benda uji BK3 sebesar 53,69 %. Hal ini disebabkan campuran aspal pada benda uji BK1 yang seluruhnya berada di permukaan lapisan dapat mengurangi nilai penurunan lebih besar dibandingkan benda uji BK3 jika diberikan beban secara berkala.

4.4. Analisis Modulus Elastisitas

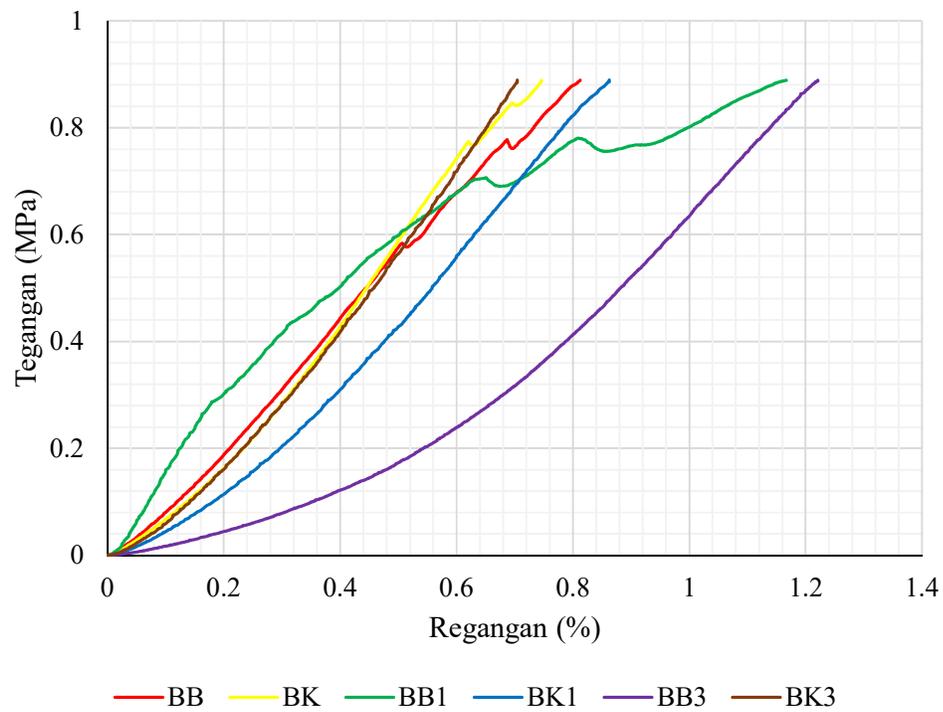
Analisis modulus elastisitas didapatkan berdasarkan perbandingan antara nilai tegangan dan regangan. Nilai tegangan dan regangan diolah dari hasil pembebanan menggunakan alat *UTM*. Tegangan dan regangan maksimal pada masing – masing benda uji dapat dilihat di Tabel 4.8. Sedangkan grafik antara nilai tegangan dan regangan pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.4 (Siklus 1) dan Gambar 4.5 (Siklus 2).

Tabel 4.8 Tegangan dan Regangan Maksimal

No.	Benda Uji	Tegangan (MPa)		Regangan (%)	
		Siklus 1	Siklus 2	Siklus 1	Siklus 2
1	BB	0,89	0,89	1,62	0,81
2	BK	0,89	0,89	1,52	0,75
3	BB1	0,89	0,89	1,61	1,17
4	BK1	0,89	0,89	1,99	0,86
5	BB3	0,89	0,89	2,20	1,22
6	BK3	0,89	0,89	1,52	0,70

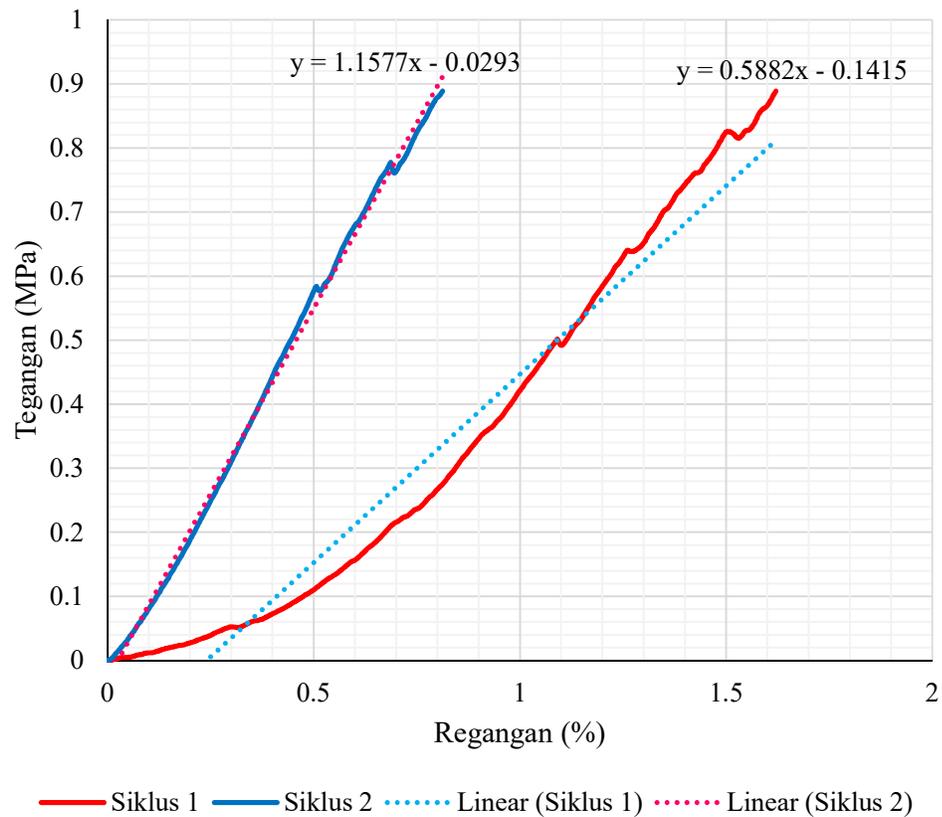


Gambar 4.4 Kurva Hubungan Tegangan dan Regangan Siklus 1

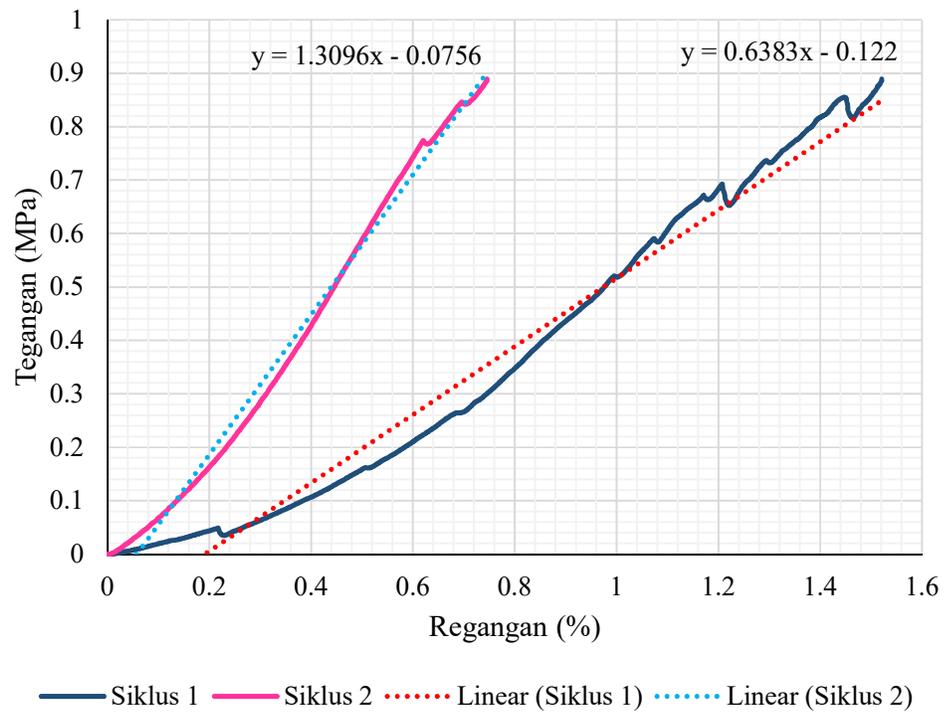
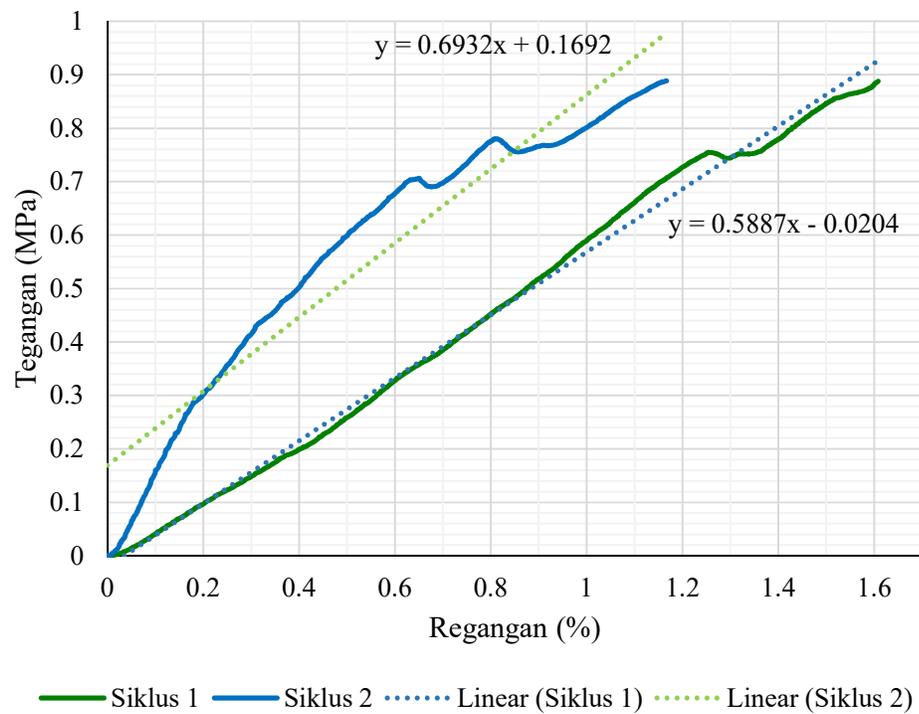


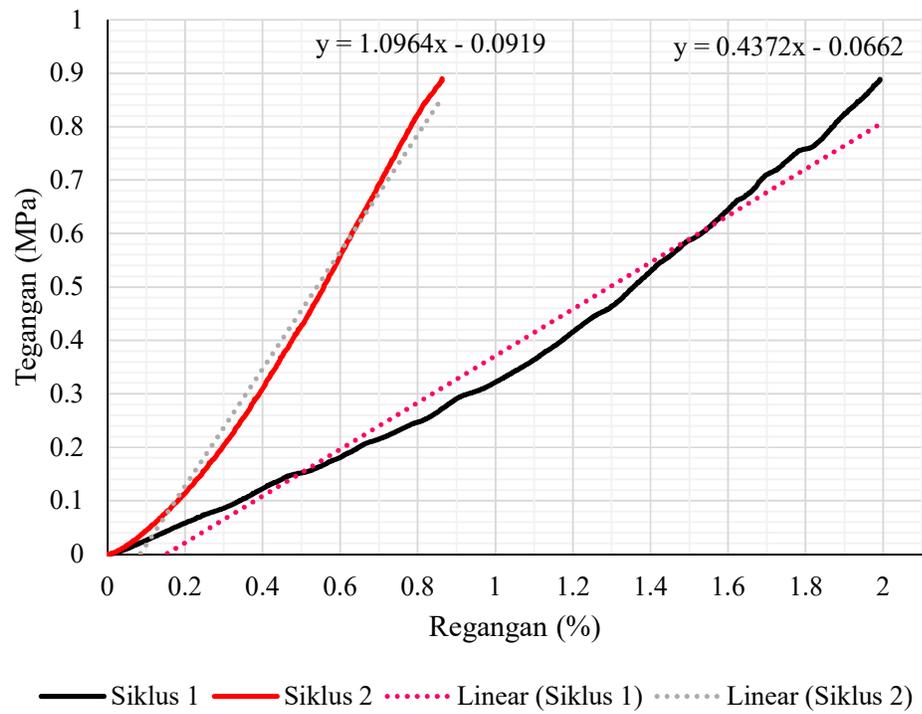
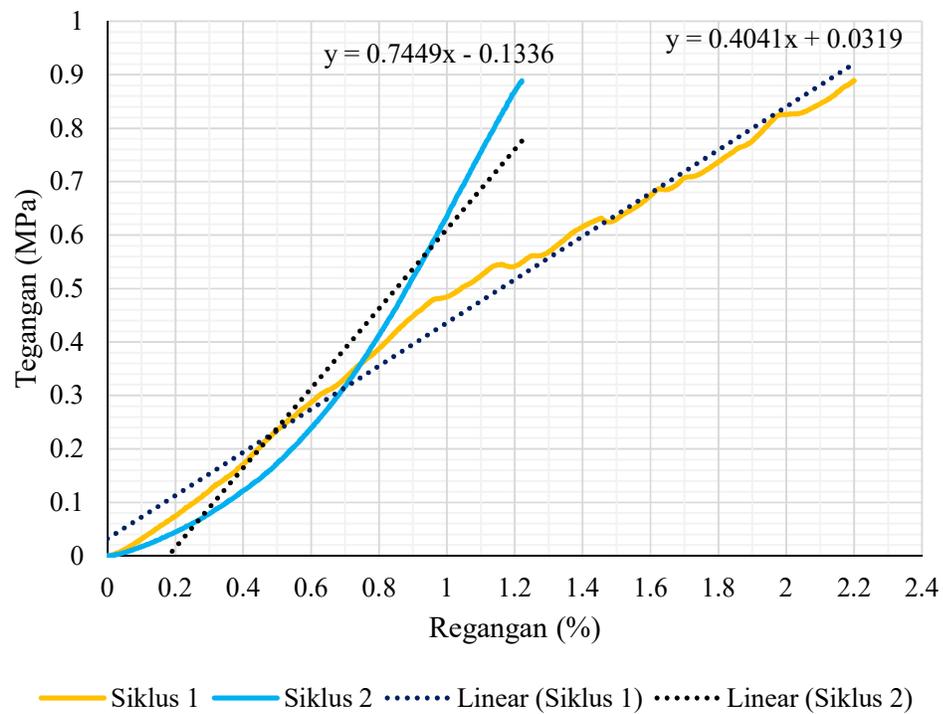
Gambar 4.5 Kurva Hubungan Tegangan dan Regangan Siklus 2

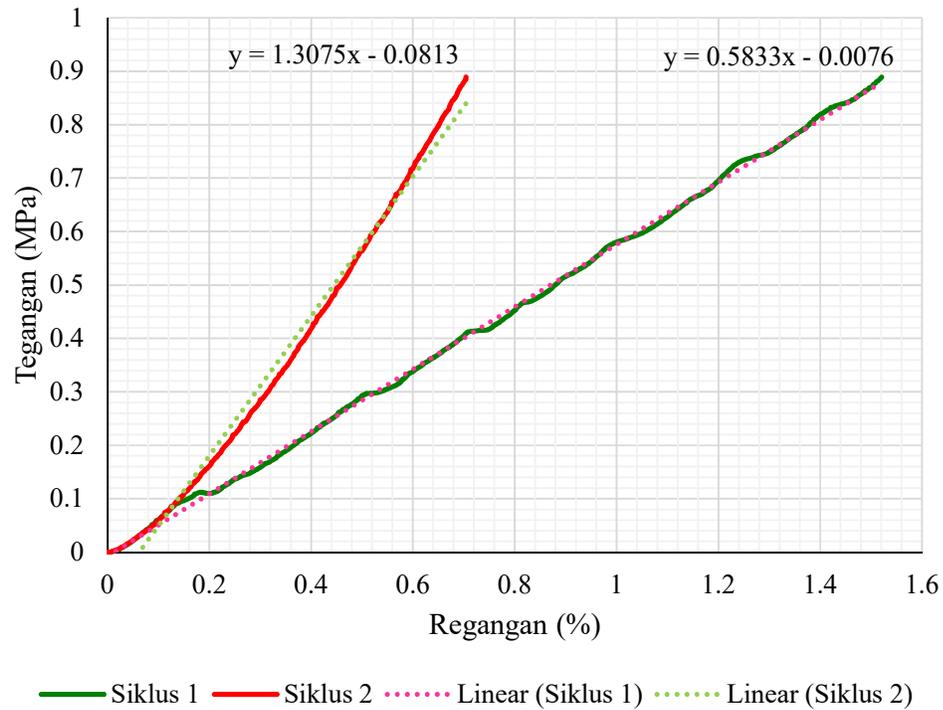
Hasil dari kurva tegangan dan regangan tidak dapat menentukan *slope* (kemiringan linier kurva) untuk menentukan nilai modulus elastisitas. Keterbatasan alat *box* cetakan uji dinilai tidak mampu menahan pembebanan melebihi 4000 kg. Pada beban 4000 kg yang diberikan pada benda uji menyebabkan sulitnya menentukan batas elastis dan plastis pada kurva, sehingga dapat disimpulkan bahwa tiap benda uji masih dapat menerima tegangan yang lebih besar dan kurva tegangan regangan masih dapat bertambah. Dengan keterbatasan tersebut, kurva hubungan tegangan dan regangan dikoreksi dengan melakukan penarikan garis *trendline* untuk menghasilkan tegangan dan regangan elastis sehingga mendapatkan *slope* (kemiringan linier) dari kurva tegangan dan regangan. Hasil penarikan garis *trendline* pada tiap benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.6 untuk benda uji BB, Gambar 4.7 untuk benda uji BK, Gambar 4.8 untuk benda uji BB1, Gambar 4.9 untuk benda uji BK1, Gambar 4.10 untuk benda uji BB3, dan Gambar 4.11 untuk benda uji BK3.



Gambar 4.6 Penarikan Garis *Trendline* BB

Gambar 4.7 Penarikan Garis *Trendline* BKGambar 4.8 Penarikan Garis *Trendline* BB1

Gambar 4.9 Penarikan Garis *Trendline* BK1Gambar 4.10 Penarikan Garis *Trendline* BB3

Gambar 4.11 Penarikan Garis *Trendline* BK3

Hasil dari penarikan garis *trendline* didapatkan koreksi nilai tegangan melalui persamaan yang ditampilkan pada kurva tegangan regangan. Nilai modulus elastisitas pada masing – masing benda uji dapat diperoleh dengan melakukan perbandingan antara nilai tegangan dan regangan. Pada Tabel 4.9 ditampilkan hasil nilai modulus elastisitas pada siklus 1, sedangkan nilai modulus elastisitas pada siklus 2 ditampilkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.9 Nilai Modulus Elastisitas Siklus 1

No	Benda Uji	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	BB	0,81	1,62	50,09
2	BK	0,85	1,52	55,78
3	BB1	0,93	1,61	57,60
4	BK1	0,80	1,99	40,39
5	BB3	0,92	2,20	41,86
6	BK3	0,88	1,52	57,83

Tabel 4.10 Nilai Modulus Elastisitas Siklus 2

No	Benda Uji	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	BB	0,91	0,81	112,16
2	BK	0,90	0,75	120,82
3	BB1	0,98	1,17	83,82
4	BK1	0,85	0,86	98,98
5	BB3	0,78	1,22	63,55
6	BK3	0,84	0,70	119,20

Setelah mendapatkan nilai modulus elastisitas pada pengujian siklus 1 dan siklus 2, tiap benda uji dilakukan perhitungan terhadap perubahan nilai modulus elastisitas yang terjadi dari siklus 1 ke siklus 2. Perubahan nilai modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut.

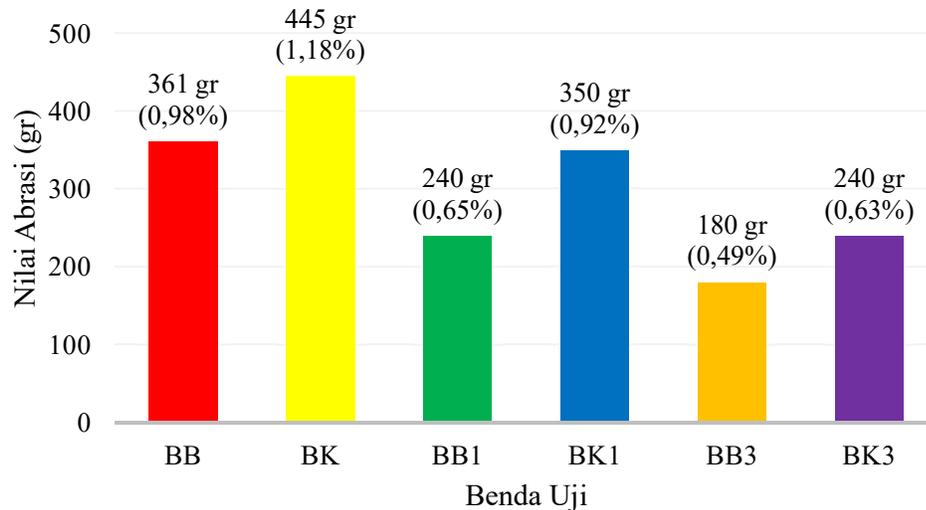
Tabel 4.11 Perubahan Nilai Modulus Elastisitas

No	Benda Uji	Modulus Elastisitas (MPa)		Nilai Perubahan (%)
		Siklus 1	Siklus 2	
1	BK1	40,39	98,98	+145,04
2	BB	50,09	112,16	+123,93
3	BK	55,78	120,82	+116,62
4	BK3	57,83	119,20	+106,13
5	BB3	41,86	63,55	+51,81
6	BB1	57,60	83,82	+45,52

Perubahan nilai modulus elastisitas pada pengujian siklus 2 mengalami kenaikan dibandingkan pengujian siklus 1. Hal ini disebabkan karena lapisan balas telah mengalami kepadatan setelah pengujian pada siklus 1. Nilai perubahan tertinggi dialami oleh benda uji BK1 sebesar 145,04 % dan nilai perubahan paling rendah dialami oleh benda uji BB1 sebesar 45,52 %. Dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai modulus elastisitas pada penelitian ini berbanding lurus dengan perubahan nilai deformasi yang terjadi.

4.5. Analisis Nilai Abrasi Material

Analisis nilai abrasi material agregat adalah menghitung berapa banyak butir agregat yang hancur atau agregat yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ " setelah benda uji dilakukan pembebanan. Hasil analisis nilai abrasi material agregat pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.12 Hasil Analisis Nilai Abrasi

Hasil dari analisis nilai abrasi material agregat, benda uji yang memiliki nilai abrasi paling besar adalah balas kotor tanpa campuran (BK) dengan persentase sebesar 1,18%, sedangkan benda uji dengan nilai abrasi paling rendah adalah balas bersih dengan campuran 2% aspal pada 3 lapis (BB3) dengan persentase nilai abrasi sebesar 0,49%.

Dari hasil tersebut dapat dibuktikan bahwa benda uji balas tanpa campuran aspal (BB, BK), memiliki nilai abrasi yang lebih besar dibandingkan benda uji balas dengan campuran aspal (BB1, BK1, BB3, BK3). Hal ini disebabkan oleh sifat adhesi dan kohesi pada aspal yang dapat mengikat agregat dan mempertahankan agregat tetap pada posisinya. Berbeda dengan balas tanpa campuran yang tidak memiliki bahan pengikat sehingga agregat dapat bergerak lebih leluasa ketika diberikan beban, sehingga gesekan antara agregat yang menghasilkan pecahan lebih banyak daripada balas dengan campuran aspal.

Selain itu, benda uji yang menggunakan balas bersih memiliki nilai abrasi yang rendah dibandingkan benda uji yang menggunakan balas kotor. Benda uji BB memiliki nilai abrasi sebesar 0,98% lebih rendah dibandingkan benda uji BK sebesar 1,18%, dan benda uji BB1 memiliki nilai abrasi sebesar 0,65% lebih rendah dibandingkan benda uji BK1 sebesar 0,92%, serta benda uji BB3 memiliki nilai abrasi sebesar 0,49% lebih rendah dibandingkan benda uji BK3 sebesar 0,63%. Hal ini disebabkan karena balas kotor memiliki kandungan lempung dan butiran pasir pada agregat sehingga lebih rentan terhadap keausan dan mudah mengalami abrasi.

Pada benda uji dengan campuran aspal, benda uji dengan campuran aspal 3 lapis memiliki nilai abrasi lebih rendah dibandingkan benda uji dengan campuran aspal 1 lapis. Benda uji BB3 memiliki nilai abrasi sebesar 0,49 % lebih rendah dibandingkan benda uji BB1 sebesar 0,65 %, dan benda uji BK3 dengan nilai abrasi sebesar 0,63 % lebih rendah dibandingkan benda uji BK1 sebesar 0,92 %. Hal ini disebabkan benda uji dengan campuran aspal 3 lapis (BB3, BK3) memiliki persebaran aspal yang lebih merata, sedangkan benda uji dengan campuran aspal 1 lapis (BB1, BK1) persebaran aspal hanya menumpuk pada permukaan lapisan saja dan bagian bawah dari lapisan balas tersebut tidak tercampur aspal yang menyebabkan bagian tersebut lebih rentan terhadap abrasi.