

# Modifikasi Struktur Lapisan Balas dengan Campuran 2% Aspal Penetrasi 60/70 dan Variasi Jumlah Campuran

*Modification of Ballast Layer Structure with a Mixture of 2% Asphalt Penetration 60/70 and Mixed Amount Variation*

**Bayu Adithya Widyanto, Dian Setiawan M**

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*

**Abstrak.** Tingginya biaya pemeliharaan pada konstruksi jalan rel adalah salah satu permasalahan di Indonesia. Modifikasi campuran aspal pada lapisan balas diharapkan dapat meningkatkan durabilitas struktur lapisan balas sehingga biaya pemeliharaan dapat diminimalisir. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh modifikasi aspal terhadap lapisan balas berdasarkan berat, deformasi vertikal, tegangan, regangan, modulus elastisitas, dan abrasi pada balas. Aspal yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal penetrasi 60/70. Sampel pada penelitian ini adalah balas bersih, balas kotor, balas bersih + 2% aspal 1 lapis, balas kotor + 2% aspal 1 lapis, balas bersih + 2% aspal 3 lapis, dan balas kotor + 2% aspal 3 lapis. Cetakan yang digunakan berbentuk *box* dengan dimensi 400 x 200 x 300 mm. Metode pemadatan manual dilakukan sebanyak 50 kali pada sepertiga lapisan balas. Pengujian tekan dilakukan sebanyak 2 siklus dengan beban 4000 kg menggunakan alat *Micro-computer Universal Testing Machine (UTM)*. Hasil pengujian membuktikan bahwa sampel balas kotor + 2% aspal 1 lapis dapat mengalami perubahan nilai deformasi vertikal dan modulus elastisitas terbesar pada pembebanan siklus 2. Secara keseluruhan modifikasi aspal penetrasi 60/70 sebanyak 2% pada lapisan balas meningkatkan deformasi vertikal dan menurunkan nilai modulus elastisitas pada lapisan balas, namun dapat mengurangi nilai abrasi yang terjadi pada lapisan balas.

Kata-kata kunci: modifikasi balas, balas aspal, deformasi vertikal, modulus elastisitas, abrasi balas

**Abstract.** The high maintenance cost of railroad construction is one of the problems in Indonesia. Modification of the ballast layer with asphalt mixture is expected to increase the durability of the ballast layer structure so that maintenance costs can be minimized. This study aims to determine the effect of modification of the ballast layer with asphalt based on weight, vertical deformation, stress, strain, modulus of elasticity, and abrasion on the ballast layer. The asphalt used in this study is asphalt penetration 60/70. The samples in this study were clean ballast, fouled ballast, clean ballast + 2% asphalt in 1 layer, fouled ballast + 2% asphalt in 1 layer, clean ballast + 2% asphalt in 3 layers, and fouled ballast + 2% asphalt in 3 layers. Mold used box with dimensions of 400 x 200 x 300 mm. The manual compaction method is carried out 50 times on one third of the ballast layer. Compressive test was conducted in 2 cycles with a 4000 kg load using the Micro-computer Universal Testing Machine (UTM). The test results prove that fouled ballast + 2% asphalt in 1 layer gets the highest value change in vertical deformation and modulus of elasticity in cycle 2. Overall modification of ballast layer with 2% asphalt penetration 60/70 increases vertical deformation and decreases the modulus of elasticity in the ballast layer, but can reduce the abrasion value that occurs in the ballast layer.

Key words: ballast modification, asphalt ballast, vertical deformation, modulus of elasticity, ballast abrasion

## 1. Pendahuluan

Permasalahan yang dialami pemerintah Indonesia dalam pembangunan transportasi kereta api adalah penyediaan infrastruktur dan biaya pemeliharaan yang mahal, terutama pada lapisan balas. Balas merupakan tumpukan agregat yang dapat meneruskan beban dari

bantalan menuju ke tanah dasar, sehingga dapat menahan konstruksi jalan rel pada posisi yang disyaratkan. Menurut Indrarnatna *et al.* (2017), lapisan balas memberikan dukungan struktural terhadap tekanan dinamis tinggi yang ditransmisikan dari kereta yang bergerak. Lapisan balas juga memiliki struktur pori yang

mendukung kemampuan drainase pada jalan rel kereta api (Tennakoon *et al.*, 2012). Jika balas tidak terawat dengan baik maka dapat menimbulkan potensi kerusakan besar pada jalan rel yang ditimbulkan dari beberapa faktor seperti yang akan menyebabkan degradasi pada struktur jalan rel. Degradasi balas dapat terjadi karena pecahnya partikel akibat tekanan internal yang tinggi antara partikel agregat yang berdekatan (Koohmishi *et al.*, 2018). Oleh karena itu, lapisan balas harus mendapatkan pemeliharaan yang maksimal. Tetapi hal tersebut merupakan permasalahan utama dikarenakan biaya pemeliharaan yang sangat tinggi. Menurut D'Angelo *et al.* (2017), alternatif lebih lanjut untuk balas harus bertujuan untuk memperpanjang daya tahannya, terutama mengingat peningkatan yang pesat dalam kecepatan dan beban lalu lintas. Maka, penulis melakukan penelitian dengan mencampurkan bahan tambahan pada lapisan balas yaitu aspal. Sifat adhesi dan kohesi pada aspal yang mampu mengikat agregat dan mempertahankan agregat tetap pada tempatnya diharapkan dapat membantu agregat untuk menahan beban yang diperoleh sehingga deformasi yang terjadi pada balas dapat berkurang serta meningkatkan durabilitas dari struktur lapisan balas dan akan mengurangi biaya yang dibutuhkan untuk pemeliharaan.

Menurut (Di Mino *et al.*, 2012), lapisan balas dengan aspal dapat mengurangi gaya dinamis di tanah dan dapat mengurangi getaran pada tanah sehingga mengurangi kemungkinan degradasi. Hal tersebut juga didukung oleh Mohammad *et al.* (2018), bahwa solusi yang sangat efektif untuk meningkatkan stabilitas, mengurangi getaran, serta meminimalisir pemeliharaan yaitu penggunaan campuran aspal dalam konstruksi kereta api. Dalam penelitian yang dilakukan oleh D'Angelo *et al.* (2016), untuk meningkatkan daya tahan pada lapisan balas, *Bitumen Stabilized Ballast (BSB)* dapat menjadi solusi baru untuk stabilisasi balas. Hasil menunjukkan bahwa lapisan balas yang ditambah emulsi bitumen menunjukkan regangan plastis yang lebih rendah dan kekakuan yang meningkat. Metode *Bitumen Stabilized Ballast (BSB)* kembali dikaji dalam penelitian Giunta *et al.* (2018) sebagai solusi inovatif yang dirancang untuk meningkatkan daya tahan balas dan mengurangi beban

perawatan secara keseluruhan. Penelitian selanjutnya oleh Lee *et al.* (2014) melakukan campuran aspal untuk lapisan balas menggunakan tiga pengikat aspal yang berbeda yaitu PG64-22, aspal modifikasi karet (*Crumb Rubber Modified*), dan aspal modifikasi *Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)*. Hasil menunjukkan bahwa campuran aspal yang mengandung karet (*Crumb Rubber Modified*) dan aspal modifikasi *Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan aspal PG64-22. Elemen elastis seperti karet jika diaplikasikan pada jalur rel terutama lapisan balas memungkinkan pengurangan kerusakan dan getaran serta mendapatkan kekakuan yang optimal (Sanchez *et al.*, 2014).

Penggunaan aspal pada penelitian selanjutnya menggunakan karet ban bekas sepeda motor pada campuran lapisan balas dengan kadar aspal yang digunakan adalah 3% dan penggunaan karet sebanyak 10%. Hasil yang didapatkan adalah penggunaan karet bekas sebanyak 10% dapat meningkatkan nilai deformasi vertikal, sedangkan penambahan aspal 3% dalam campuran balas sebagai pengikat dapat meningkatkan kekakuan lapisan balas. Penggunaan karet bekas 10% dan aspal 3% dapat mengurangi nilai abrasi material pada lapisan balas secara signifikan dari 47% menjadi 80%. (Setiawan *et al.*, 2019a). Selanjutnya Setiawan *et al.* (2019b) melakukan penelitian menggunakan material karet yang sama sebagai campuran pada lapisan balas dengan variasi ukuran karet dan metode pemadatan yang berbeda pada tiap sampelnya. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa variasi ukuran karet bekas memiliki peran penting dalam meningkatkan durabilitas balas. Kemudian peningkatan pemadatan yang dilakukan hingga 100% hanya mampu meningkatkan modulus elastisitas sebesar 6% pada lapisan balas, namun dapat meningkatkan durabilitas balas hingga 38% dan kemampuan lapisan balas menahan beban hingga 70%.

Adapun tujuan dalam penelitian yang dilakukan saat ini adalah menganalisis pengaruh modifikasi lapisan balas dengan campuran aspal penetrasi 60/70 sebanyak 2% terhadap berat lapisan balas, deformasi vertikal, nilai tegangan dan regangan, modulus elastisitas, serta abrasi material yang

disebabkan oleh pembebanan menggunakan alat *UTM* dengan beban 4000 kg yang dilakukan pada 2 siklus.

## 2. Metode dan Tahapan Penelitian

### *Peralatan dan Material*

Peralatan yang digunakan yaitu oven agregat, oven aspal, nampan logam, timbangan, teko, cetakan benda uji, penumbuk manual, plat alas tumbukan, plat pembebanan, dan alat *Micro-computer Universal Testing Machine (UTM)* seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Alat *UTM*

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah agregat dan aspal. Material agregat yang digunakan berasal dari Kecamatan Clereng, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi D.I. Yogyakarta. Ukuran butir dari agregat yang digunakan pada penelitian ini adalah  $2\frac{1}{2}'' - \frac{3}{4}''$  sesuai persyaratan gradasi material agregat untuk balas dalam Rosyidi (2015). Sedangkan untuk material aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 yang didapat dari penyimpanan aspal di Laboratorium Transportasi dan Jalan Raya Teknik Sipil UMY. Material dapat dilihat pada Gambar 2.

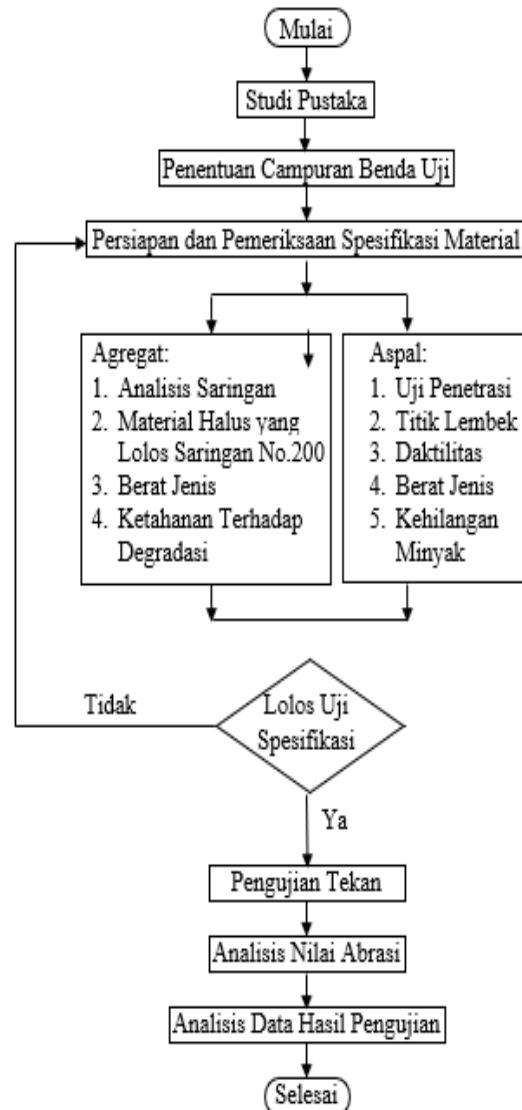


Gambar 2 (a) Agregat, (b) Aspal

Gambar 2 (a) Agregat, (b) Aspal

### *Bagan Alir Penelitian*

Penelitian ini terdapat beberapa tahapan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

### *Studi Pustaka*

Studi pustaka merupakan tahap pertama pada penelitian, seperti mengkaji penelitian – penelitian sebelumnya dari permasalahan, metode, hingga hasil yang berhubungan dengan penelitian saat ini sehingga dapat dijadikan acuan pada penelitian saat ini.

### *Penentuan Campuran Benda Uji*

Benda uji pada penelitian ini adalah balas dengan tebal 30 cm yang telah dilakukan pemadatan dengan 50 kali tumbukan tiap 1/3 lapisnya. Pada penelitian ini terdapat beberapa benda uji yang telah ditentukan, yaitu balas bersih dan balas kotor tanpa campuran aspal, balas bersih dan balas kotor dengan aspal 2%

pada 1 lapis, serta balas bersih dan balas kotor dengan aspal 2% pada 3 lapis. Penentuan campuran benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Benda Uji Pada Penelitian

No	Benda Uji	Jumlah Tumbukan	Kadar Aspal
1	Balas Bersih	50/Lapis	-
2	Balas Kotor	50/Lapis	-
3	Balas Bersih + Aspal 1 Lapis	50/Lapis	2%
4	Balas Kotor + Aspal 1 Lapis	50/Lapis	2%
5	Balas Bersih + Aspal 3 Lapis	50/Lapis	2%
6	Balas Kotor + Aspal 3 Lapis	50/Lapis	2%

### Pemeriksaan Spesifikasi Material

Material agregat dilakukan pemeriksaan terhadap sifat fisik dan mekanis meliputi analisis saringan, material halus yang lolos saringan no.200, berat jenis, dan ketahanan terhadap degradasi yang mengacu pada Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986, Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012, dan Standar Nasional Indonesia (SNI). Setelah dilakukan pemeriksaan, material agregat dikelompokkan sesuai penentuan campuran benda uji yang telah ditentukan, yaitu balas bersih dan balas kotor. Balas bersih adalah agregat yang harus dicuci terlebih dahulu hingga bersih dari pasir dan lumpur yang menempel. Kemudian agregat yang sudah dicuci dikeringkan di dalam oven dengan suhu  $110\text{ C}^\circ$  selama  $24\pm 4$  jam untuk mendapatkan berat tetapnya. Balas kotor adalah agregat yang tidak memerlukan pencucian terlebih dahulu, dan langsung dimasukkan ke dalam oven untuk mendapatkan berat tetapnya seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengerinan Agregat

Pemeriksaan sifat fisik dan mekanis aspal tidak memiliki spesifikasi untuk lapisan balas. Namun dilakukan pengujian dasar yaitu uji penetrasi, titik leleh, berat jenis, daktilitas, dan kehilangan minyak yang mengacu pada SNI. Aspal yang masih padat dimasukkan ke

dalam teko untuk kemudian diletakkan di dalam oven dengan suhu  $155\text{ C}^\circ$  selama 4 jam agar aspal mencair dan dapat digunakan pada benda uji. Pemanasan aspal seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemanasan Aspal

### Pembuatan Benda Uji

Pada tahap pertama agregat dimasukkan ke dalam cetakan sebanyak 1/3 lapisan. Kemudian dilakukan pemadatan secara manual sebanyak 50 kali tumbukan menggunakan alat penumbuk manual. Untuk benda uji dengan campuran aspal pada 3 lapis, tuang sepertiga dari 2% aspal yang digunakan pada lapisan balas yang telah dipadatkan tersebut. Cara yang sama dilakukan hingga pada lapisan terakhir. Untuk benda uji dengan campuran aspal pada 1 lapis, tuang aspal sebanyak 2% pada lapis permukaan setelah dilakukan pemadatan. Hasil pembuatan benda uji seperti pada Gambar 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4 (a) Proses Pemadatan, (b) Proses Penuangan Aspal, (c) Benda Uji Tanpa Campuran Aspal, (d) Benda Uji dengan Campuran Aspal

### Pengujian Tekan

Pengujian tekan menggunakan alat *UTM* dengan beban 4000 kg dan setiap benda uji memiliki siklus tekan sebanyak 2 kali. Tahap pertama yaitu melakukan *input* data dimensi

benda uji dan luas permukaan plat pembebanan, serta besaran beban yang akan diuji. Pengujian tekan dilakukan setelah benda uji dan plat pembebanan diletakkan dengan simetris seperti pada Gambar 5.



Gambar 5 Proses Pengujian Tekan

### Analisis Nilai Abrasi

Setelah dilakukan pengujian tekan, benda uji dibongkar dan disaring untuk mengetahui abrasi material agregat akibat pembebanan menggunakan saringan ukuran  $\frac{3}{4}$ ". Butir agregat yang lolos ditimbang untuk mendapatkan besar nilai abrasi pada masing – masing benda uji.

### Analisis Data Hasil Pengujian

Tahapan terakhir pada penelitian ini adalah menganalisis data hasil pengujian. Penelitian ini memiliki beberapa parameter yaitu berat benda uji,, deformasi vertikal (nilai penurunan) yang didapat dari uji tekan, nilai modulus elastisitas yang dianalisis dari hasil tegangan dan regangan akibat pembebanan, dan nilai abrasi yang diperoleh dari analisis saringan terhadap material pecah setelah pembebanan. Hasil pengujian dari masing – masing benda uji akan diplotkan dalam tabel dan grafik.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Hasil Pemeriksaan Spesifikasi Material

Langkah pertama penelitian ini adalah melakukan pemeriksaan fisik dan mekanis dari material agregat. Pemeriksaan berat jenis dan

penyerapan air, kadar lumpur, serta keausan agregat dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Pemeriksaan Sifat Mekanis Agregat

No	Parameter	Hasil	Spesifikasi	Satuan
1	Berat Jenis (BJ):			
	BJ Bulk	2,61		-
	BJ SSD	2,68	Min. 2,6	-
	BJ Semu	2,80		-
	d. Penyerapan air	2,65	Maks. 3,0	%
2	Kadar Lumpur	0,21	Maks. 0,5	%
3	Keausan Agregat	19,3	Maks. 25	%

Selain pengujian tersebut diatas, 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 3.

Tabel 3 Ukuran Gradasi Material Agregat

Ukuran Saringan (inch)	Berat Tertahan (gr)	Jumlah Tertahan (gr)	Perse n Lolos (%)	Spesifikasi
3	0	0	100	100
2 $\frac{1}{2}$	403,64	403,64	92	90 – 100
2	1866,84	2270,48	55	25 – 60
1 $\frac{1}{2}$	479,32	2749,80	45,5	25 – 60
1	0	2749,80	0	–
$\frac{3}{4}$	2295,70	5045,50	0	0 – 10
$\frac{1}{2}$	0	0	0	0 – 5
$\frac{3}{8}$	0	0	0	–
Pan	0	0	0	–
Jumlah	5045,50	5045,50		–

Hasil pemeriksaan pada material aspal yang dilakukan sudah sesuai dengan spesifikasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Pemeriksaan Material Aspal

No	Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Satuan
1	Penetrasi	66,7	60 – 70	0,1 mm
2	Titik Lembek	53	$\geq 48$	$^{\circ}\text{C}$
3	Berat Jenis	1,01	$\geq 1,0$	–
4	Daktalitas	>100	$\geq 100$	cm
5	Kehilangan Minyak	0,13	$\leq 0,8$	%

### 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 5.

Tabel 5 Benda Uji Pada 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

Hasil analisis berat benda uji yaitu BB sebesar 36,80 kg, BK sebesar 37,84 kg, BB1 sebesar 37,11 kg, BK1 sebesar 37,92 kg, BB3 sebesar 36,92 kg, dan BK3 sebesar 37,82 kg.

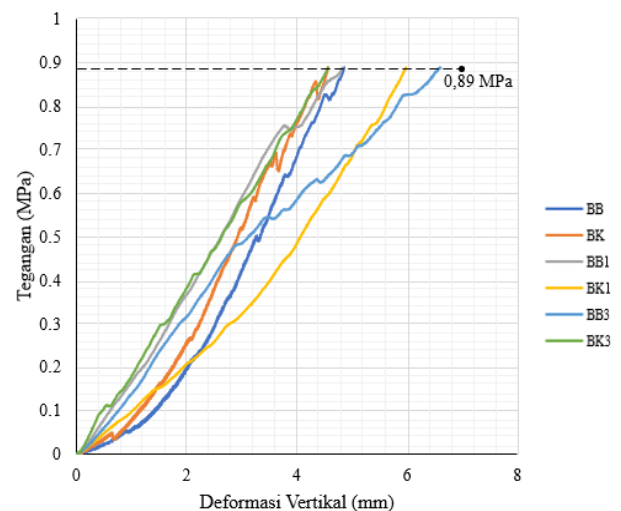
Dari hasil analisis berat benda uji tersebut dapat disimpulkan bahwa berat balas bersih lebih kecil daripada balas kotor baik tanpa campuran maupun dengan campuran aspal. Hal ini disebabkan karena balas kotor masih terdapat kandungan lumpur dan butiran pasir yang menempel pada agregat karena tidak adanya 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 dikarenakan pada balas dengan campuran aspal 3 lapis, campuran aspal pada 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.

### Analisis Deformasi Vertikal

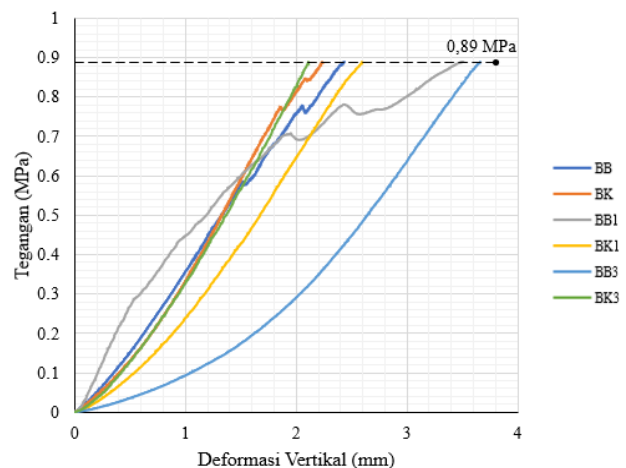
Nilai deformasi vertikal atau penurunan pada benda uji diperoleh dari *output data* yang dihasilkan oleh alat pengujian tekan *UTM* setelah pembebanan dilakukan. Pada penelitian ini penulis membandingkan penurunan yang terjadi pada masing – masing benda uji setelah menerima tegangan sebesar 0,89 MPa. Besarnya nilai deformasi vertikal yang terjadi pada benda uji dapat dilihat pada Tabel 6 dan disajikan dalam grafik pada Gambar 6 (Siklus 1) dan Gambar 7 (Siklus 2).

Tabel 6 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 6 Deformasi Siklus 1



Gambar 7 Deformasi 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 7.

Tabel 7 Perubahan Nilai Deformasi

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. 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. 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 % sedangkan benda uji BB3 sebesar 44,51 %. Hal ini disebabkan pada saat penguangan 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 % lebih besar dibandingkan benda uji BB1 sebesar 27,46 %. 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.

### Analisis Modulus Elastisitas

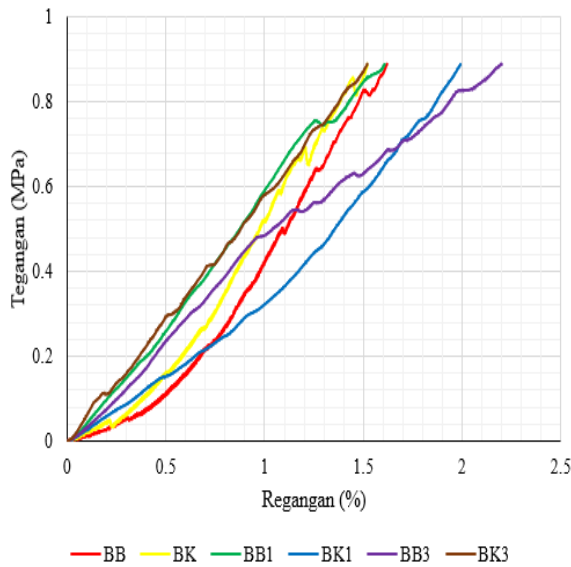
Menurut Sehonanda *et al.* (2013), modulus elastisitas merupakan besaran yang menggambarkan tingkat elastisitas bahan. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas maka semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi apabila diberi gaya (Wiyono *et al.*, 2012). Analisis modulus elastisitas didapatkan berdasarkan perbandingan antara nilai tegangan dan regangan yang diolah dari hasil pembebanan menggunakan alat *UTM*. Tegangan dan regangan maksimal pada masing – masing benda uji dapat dilihat di Tabel 8 sedangkan grafik antara nilai tegangan dan regangan pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Gambar 8 (Siklus 1) dan Gambar 9 (Siklus 2).

Tabel 8 Tegangan-regangan maksimal

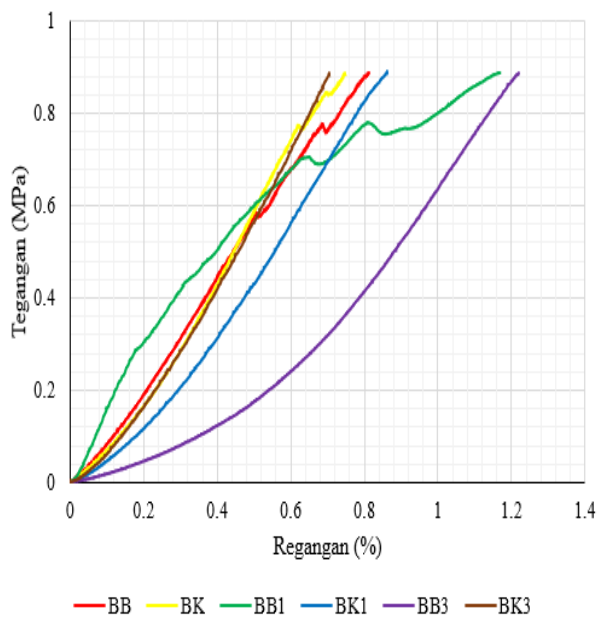
No.	Benda Uji	Tegangan (MPa)		Regangan (%)	
		Siklus 1	Siklus 2	Siklus 1	Siklus 2
		1	2	1	2
1	BB	0,89	0,89	1,62	0,81
2	BK	0,89	0,89	1,52	0,75
3	BB1	0,89	0,89	1,61	1,17
4	BK1	0,89	0,89	1,99	0,86
5	BB3	0,89	0,89	2,20	1,22
6	BK3	0,89	0,89	1,52	0,70

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.

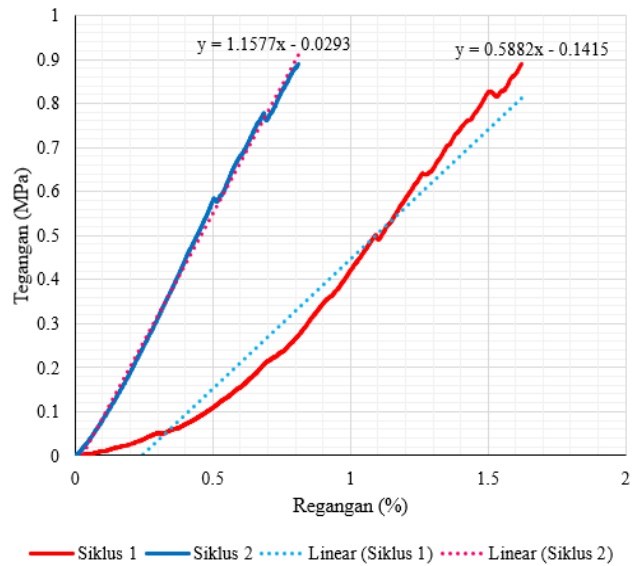


Gambar 8 Grafik Tegangan-Regangan Siklus 1

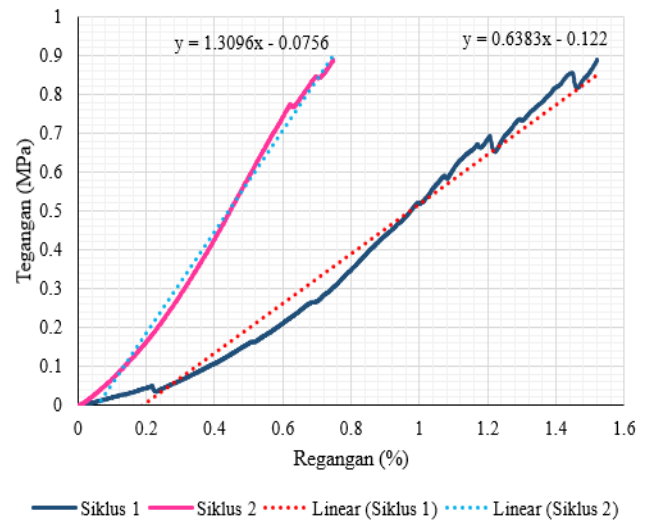


Gambar 9 Grafik Tegangan-Regangan Siklus 2

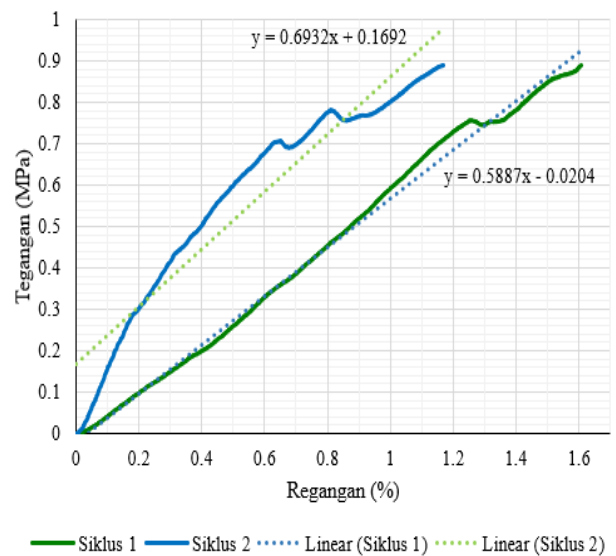
Dengan keterbatasan tersebut, kurva hubungan tegangan dan regangan dikoreksi dengan melakukan penarikan garis *trendline* untuk menghasilkan tegangan dan regangan elastis sehingga mendapatkan *slope* (kemiringan linier) dari kurva tegangan dan regangan. Hasil penarikan garis *trendline* pada tiap benda uji dapat dilihat pada Gambar 10, 11, 12, 13, 14, dan 15.



Gambar 10 Penarikan Garis *Trendline* BB

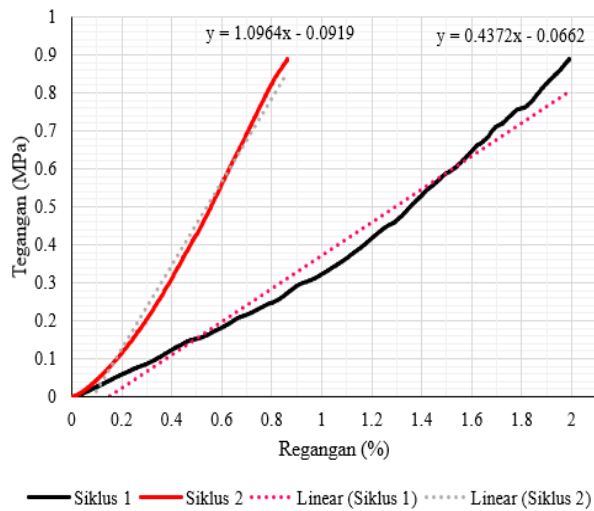


Gambar 11 Penarikan Garis *Trendline* BK

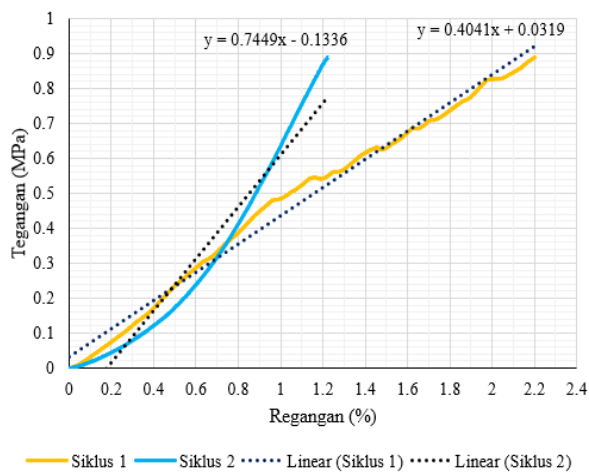


Gambar 12 Penarikan Garis *Trendline* BB1

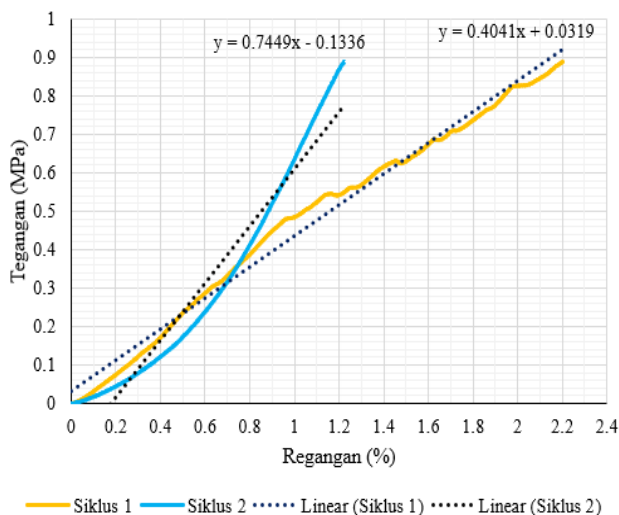




Gambar 13 Penarikan Garis *Trendline* BK1



Gambar 14 Penarikan Garis *Trendline* BB3



Gambar 15 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 9 ditampilkan hasil nilai modulus elastisitas pada siklus 1, sedangkan nilai modulus elastisitas pada siklus 2 ditampilkan pada Tabel 10.

Tabel 9 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 10 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 11 berikut.

Tabel 11 Perubahan Nilai Modulus Elastisitas

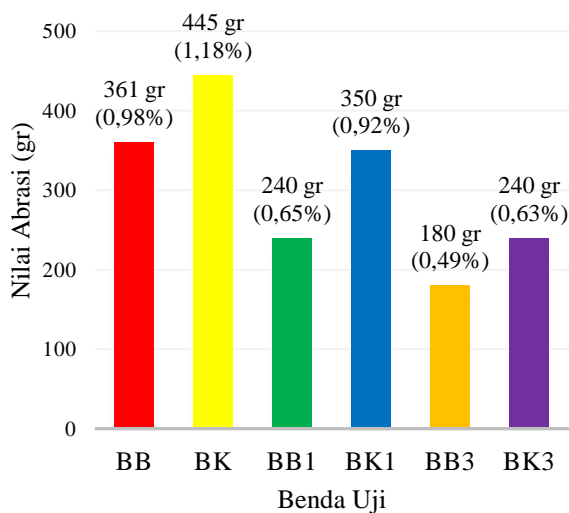
No	Benda Uji	Modulus Elastisitas (MPa)		Nilai Perubahan (%)
		Siklus 1	Siklus 2	
1	BK1	40,39	98,98	145,04
2	BB	50,09	112,16	123,93
3	BK	55,78	120,82	116,62
4	BK3	57,83	119,20	106,13
5	BB3	41,86	63,55	51,81
6	BB1	57,60	83,82	45,52

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.

### Analisis Nilai Abrasi

Analisis nilai abrasi material agregat adalah menghitung berapa banyak butir agregat yang hancur atau 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 16 berikut.



Gambar 16 Hasil Analisis Nilai Abrasi

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. 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. 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.

### 4. Kesimpulan

Pada penelitian ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berat benda uji yang menggunakan balas bersih lebih kecil daripada benda uji dengan menggunakan balas kotor disebabkan kandungan lumpur dan butiran pasir yang menempel pada agregat sehingga mempengaruhi berat dari benda uji. Urutan berat benda uji dari yang terbesar adalah BK1 sebesar 37,92 kg, BK sebesar 37,84 kg, BK3 sebesar 37,82 kg, BB1 sebesar 37,11 kg, BB3 sebesar 36,92 %, dan BB sebesar 36,80 %.
2. Perubahan nilai deformasi yang paling besar dialami oleh benda uji BK1 yaitu sebesar 56,69 % dan perubahan nilai deformasi yang paling rendah adalah benda uji BB1 sebesar 27,46 %. Benda uji balas bersih (BB, BB1, BB3) memiliki perubahan nilai deformasi yang lebih rendah dibandingkan benda uji balas kotor (BK, BK1, BK3). Hal ini disebabkan pada balas kotor terdapat butir halus yang menahan aspal pada tiap lapisan, sehingga ketebalan aspal pada tiap lapisan lebih tinggi dibandingkan balas bersih. Kurangnya ketebalan aspal tersebut berpengaruh pada kemampuan mengurangi nilai deformasi yang lebih kecil saat diberi beban secara berkala. Urutan perubahan nilai deformasi vertikal pada benda uji dari yang terbesar yaitu BK1 sebesar 56,69%, BK3 sebesar 53,69%, BK sebesar 50,96%,

BB sebesar 49,87%, BB3 sebesar 44,51%, dan BB1 sebesar 27,46%.

3. Perubahan nilai modulus elastisitas berbanding lurus dengan perubahan nilai deformasi. Nilai perubahan paling tertinggi dialami oleh benda uji BK1 sebesar 145,04 % dan nilai perubahan paling rendah dialami oleh benda uji BB1 sebesar 45,52 %. Perubahan nilai modulus elastisitas pada pengujian siklus 2 mengalami kenaikan karena lapisan balas telah mengalami kepadatan setelah pengujian siklus 1.
4. Benda uji yang memiliki nilai abrasi paling besar adalah BK sebesar 1,18%, dan paling rendah adalah BB3 sebesar 0,49%. 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 sehingga dapat mengikat agregat dan mempertahankan agregat tetap pada posisinya. Urutan nilai abrasi dari yang terbesar yaitu BK sebesar 1.18%, BB sebesar 0,98%, BK1 sebesar 0,92%, BB1 sebesar 0,65%, BK3 sebesar 0,63%, dan BB3 sebesar 0,49%. Hasil tersebut membuktikan bahwa campuran aspal 2% dapat mengurangi nilai abrasi pada lapisan balas.

## 5. Daftar Pustaka

- BSN, 1990, SNI 03-1974-1990, *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 1991(a), SNI 06-2440-1991, *Metode Pengujian Kehilangan Berat Minyak dan Aspal dengan Cara A*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 1991(b), SNI 06-2432-1991, *Metode Pengujian Daktilitas Bahan-Bahan Aspal*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 1996, SNI 03-4142-1996, *Metode Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir Mudah Pecah dalam Agregat*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 2008(a), SNI 1969-2008, *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 2008(b), SNI 2417-2008, *Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 2011(a), SNI 2441-2011, *Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 2011(b), SNI 2456-2011, *Cara Uji Penetrasi Aspal*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- BSN, 2011(c), SNI 2434-2011, *Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*, Badan Standarisasi Nasional Jakarta.
- D'Angelo, G., Presti, D. Lo, dan Thom, N., 2017, Optimisation of bitumen emulsion properties for ballast stabilisation, *Material de Construccin*, 67(327), 124.
- D'Angelo, G., Thom, N., dan Lo Presti, D., 2016, Bitumen stabilized ballast: A potential solution for railway track-bed, *Construction and Building Materials*, 124, 118–126.
- Di Mino, Maggiore, C., dan Noto, S., 2012, A Dynamic Model of Ballasted Rail Track with Bituminous Sub-Ballast Layer, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 366–378.
- Giunta, M., Bressi, S., dan Angelo, G. D., 2018, Life cycle cost assessment of bitumen stabilised ballast, *Construction and Building Materials*, 172, 751–759.
- Indraratna, B., Ngo, N. T., dan Rujikiatkamjorn, C., 2017, Improved Performance of Ballasted Rail Tracks Using Plastics and Rubber Inclusions, *Procedia Engineering*, 189, 207–214.
- Koohmishi, M., dan Palassi, M., 2018, Degradation of railway ballast under compressive loads considering particles rearrangement, *International Journal of Pavement Engineering*, 8436, 1–13.
- Lee, S. H., Park, D., dan Vo, H. V., 2014, Evaluation of asphalt concrete mixtures for railway track, *Construction and Building Materials*, 73, 13-18.
- Mohammad, S., Sadeghi, J., Peivast, P., dan Pedram, M., 2018, Fatigue properties of crumb rubber asphalt mixtures used in railways, *Construction and Building Materials*, 184, 248–257.
- Rosyidi, S. A. P., 2015, *Rekayasa Jalan Kereta Api*, Yogyakarta: LP3M UMY 2015
- Sehonanda, O., Ointu, B. M. M., Tamboto, W.

- J., dan Pandelege, R. R., 2013, Kajian Uji Laboratorium Nilai Modulus Elastisitas Struktur Sederhana, *Jurnal Sipil Statik*, 1(12), 797–800.
- Setiawan, D. M., dan Rosyidi, S. A. P., 2018(a), Vertical Deformation and Ballast Abrasion Characteristics of Asphalt-Scrap Rubber Track Bed, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(6), 2479.
- Setiawan, D. M., dan Rosyidi, S. A. P., 2018(b), The Role of Compaction and Scrap Rubber Size Against The Performance of Ballast Layer, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(13), 1275-1286.
- Sánchez, M., dan Rubio-gá, C., 2014, The Use of Deconstructed Tires as Elastic Elements in Railway Tracks, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 7, 5903–5919.
- Tennakoon, N., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Nimbalkar, S., dan Neville, T., 2012, The role of ballast-fouling characteristics on the drainage capacity of rail substructure, *Geotechnical Testing Journal*, 35(4), 1-12.
- Wiyono, W., Setiawan, A., dan Hidayat, N., 2016, Pengaruh Suhu Terhadap Modulus Elastisitas dan Angka Poisson Beton Aspal, *Journal of Transportation Management and Engineering*, 2(2), 105-114.