

Pengaruh Aspal Cair dan Potongan Karet Ban Bekas Terhadap Penurunan Lapisan Balas

The Effect of Bitumen and Scrap Tire on The Deformation of Ballast Layer

Nawang Cahya Ratri Nastiti, Sri Atmaja P. Rosyidi, Dian Setiawan M

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Lapisan balas adalah bagian dari struktur jalur kereta api konvensional yang banyak digunakan di Indonesia, karena praktis dalam perawatan, pembangunan dan biaya konstruksinya yang lebih murah dibandingkan dengan jalan rel yang menggunakan teknologi *slab track*. Penelitian ini memodelkan empat jenis benda uji, diantaranya menggunakan material potongan karet ban bekas dan aspal cair. Potongan karet bekas dan aspal cair yang digunakan masing-masing sebesar 10% dan 3%, dengan metode uji tekan untuk mengetahui, deformasi, abrasi dan modulus elastisitas. Hasil menunjukkan material balas yang dimodifikasi menggunakan potongan karet ban bekas memiliki nilai kekakuan paling rendah dibandingkan dengan ketiga benda uji yang lain. Nilai deformasi pada modifikasi balas dan karet memiliki nilai paling tinggi yaitu 9,12 mm dengan tegangan sebesar 77,27 kPa. Dengan adanya penambahan material elastis nilai abrasi menurun sebanyak 0,6% dan memiliki nilai modulus elastisitas sebesar 81,6% dari balas yang tidak di modifikasi. Akan tetapi balas yang tidak dimodifikasi dengan potongan karet ban bekas dan aspal, menghasilkan deformasi sebesar 5,72 mm dengan beban sebesar 196,59 dan nilai modulus elastisitas yang dihasilkan sebesar 9907,64 kPa.

Kata-kata kunci : abrasi, deformasi, modulus elastisitas, uji tekan

Abstract. The ballast layer is a common conventional structure of the railway track used in Indonesia, due to it is easy to maintenance, to build and low costs of maintenance compared to slab track. In this study it is used four types of specimen, which were using crumb scrap tire and bitumen materials. The percentage of crumb scrap tire and bitumen was 10% and 3%. The method used for experiment was the compression test to evaluate the deformation, abration and elastic modulus. The result indicated that ballast with crumb scrap tire has lowest stiffness compared to the three other samples. The crumb scrap tire increases deformation up to 9,12 mm with stress was found to be 77,72 kPa. However it decreases the abration of materials into 0,6% and elastic modulus of 81,6% from reply without mixture. Ballast without modification produces a deformation 5.72 mm with stress of 196,59 kPa and elastic modulus of 9907,64 kPa.

Keyword :abrasi, compression test, deformation, elastic modulus

1. Pendahuluan

Jaringan transportasi yang handal dan berkapasitas besar akan mendukung program NAWA CITA pemerintah sekaligus dapat mengoptimalkan penggunaan kereta api di Indonesia (Setiawan, 2016). Transportasi sebagai dasar pembangunan ekonomi, perkembangan masyarakat dan pertumbuhan industrial (Abbas, 2004) beberapa tahun terakhir mengalami pertumbuhan penduduk, bersamaan dengan hal tersebut nilai konsumtif masyarakat terhadap penggunaan moda transportasi perkeretaapian semakin banyak diminati dikarenakan aman, nyaman dan bebas macet (Haq dan Tunafiah, 2015).

Semua prasarana dalam sistem transportasi khususnya transportasi darat memerlukan perawatan dan perbaikan kerusakan dengan baik. Upaya dalam memperbaiki jalur rel kereta api dengan daya tahan yang baik adalah dengan menggunakan tipe struktur *slab track*. Namun penggunaan *slab track* memerlukan biaya pembangunan yang sangat tinggi hingga mencapai dua kali lipat, untuk itu muncul ide baru mengenai stabilisasi balas dengan modifikasi aspal (Setiawan dkk, 2013).

Faktor utama pembebananan jalan rel adalah kemampuan jalan rel dalam mendistribusikan beban dari roda yang kemudian disalurkan kepada bantalan lalu

disebarkan secara merata ke lapisan balas (Rosyidi, 2015). Balas modifikasi mempunyai kemampuan baik dalam meminimalisir kerusakan pada material balas, karena pergerakan yang terjadi pada material balas menjadi lebih sedikit atau terbatas, sehingga mengurangi gesekan antar partikelnya (Indraratna dkk., 2017).

Modifikasi menggunakan karet ban bekas sebanyak 10% dapat mengurangi degradasi balas, kekakuan dan pada saat yang bersamaan dapat meredam getaran yang diakibatkan oleh beban dinamis yang diterima ketika jalan rel dioperasikan (Asgharzadeh dkk., 2018; D'Andrea dkk., 2012; Farhan dkk., 2015 dan Sanchez dkk., 2014). Deformasi lapisan balas terjadi saat karet dihamparkan pada bagian bawah material balas dapat menurun sekitar 35% - 45% (Navaratnarajah dkk., 2017). Penggunaan karet yang berlebih berpengaruh pada menurunnya nilai kepadatan, yang hasilnya langsung berpengaruh terhadap turunnya nilai modulus elastisitas dan ketidak stabilan jalur kereta (Abadi dkk., 2016; Bressi dkk., 2018; Sanchez dkk., 2014 dan Signes dkk., 2016).

Jika aspal berbaur dengan material agregat maka aspal akan menjadikan agregat tersebut lebih terikat satu dengan yang lainnya (Soto dan Mino., 2017) dan dapat mengurangi pengaruh beban dinamis berdasarkan nilai modulus kekakuan (Mino dkk., 2012). Penambahan material aspal dapat mengurangi deformasi pada lapisan balas secara vertikal karena dipengaruhi oleh prosentase dan ketebalan aspal tersebut (D'Angelo dkk., 2016; Pirozzolo dkk., 2017 dan Sanchez dkk., 2015).

2. Metode Penelitian

Bahan

Kualitas jalan rel / *track* dapat ditinjau dari berbagai aspek, salah satu diantaranya adalah kualitas material yang digunakan pada kinerja jalan rel. Jika kualitas jalan rel memenuhi spesifikasi maka jalan rel dapat menjadi jalan rel yang aman dan nyaman (Setiawan dan Rosyidi, 2016).

Material Balas

Material balas yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Kecamatan Clereng, Kabupaten Kulon Progo, seperti pada Gambar

1. Material balas yang digunakan saat penelitian masuk pada spesifikasi balas kelas jalan 2. Terdapat 2 kondisi balas yaitu balas bersih dan balas kotor, dikarenakan balas kotor menyebabkan kinerja mekanik hilang dan mempercepat kerusakan geometri (D'Angelo dkk., 2017) maka pada penelitian ini hanya menggunakan balas bersih kering oven. Balas akan di uji berat jenis dan penyerapan air dengan ketentuan BSN(2008a), kadar lumpur BSN (1996), keausan (2008b) dan analisis saringan dengan ketentuan BSN (2012).



Gambar 1 Benda uji balas

Potongan Karet Ban Bekas

Potongan karet ban bekas merupakan salah satu limbah industri yang tidak dapat terurai oleh alam, akan tetapi dapat dimanfaatkan dengan cara *recycled rubber* dan *reclaimed rubber* (Adhikari dkk., 2000) seperti penggunaan pada modifikasi balas. Potongan karet ban bekas ini diambil dari limbah ban kendaraan roda 2 yang ada di berbagai bengkel kendaraan bermotor di Yogyakarta. Ukuran karet yang digunakan mengacu pada BSN (2012) yaitu tertahan saringan 3/8 inch atau sama dengan 9,52 mm seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Karet ban bekas

Aspal

Penelitian ini menggunakan aspal penetrasi 60/70 sebanyak 3% dari berat total benda uji, yang berasal dari Pertamina yang disimpan di Laboratorium Transportasi dan Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Penggunaan aspal

penetrasi 60/70 memiliki nilai substansi yang cukup tinggi untuk digunakan sebagai perkerasana struktural (Alvarez et al., 2018). Pengujian fisis aspal di uji berat jenis dengan ketentuan BSN(2011a), Penetrasi Aspal BSN (2011b), daktilitas dan kehilangan minyak BSN (1991) dan titik lembek aspal dengan BSN (2011d). Adapun gambar seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Aspal penetrasi 60/70

3. Prosedur Pengujian

Pembuatan benda uji

Penelitian ini menggunakan benda uji yang dicampur didalam *ballast box* sebanyak empat sampel dimana setiap sampel tersebut mempunyai modifikasi material yang berbeda. Dengan menggunakan balas sebagai bahan utamanya dan potongan karet ban bekas serta aspal sebagai bahan campurannya. Adapun daftar benda uji ada pada Tabel 1.

Tabel 1 Sampel penelitian

No	Nama Benda uji	Campuran
1.	Benda Uji 1	Balas
2.	Benda Uji 2	Balas + Karet
3.	Benda Uji 3	Balas + Aspal
4.	Benda Uji 4	Balas + Karet + Aspal

Benda Uji 1

Balas dituangkan ke dalam *ballast box* sebanyak 1/3 bagian, kemudian ditumbuk menggunakan penumbuk manual seperti pada Gambar 4 sebanyak 50 kali per lapisan. Begitu seterusnya hingga 3/3 bagian dari *ballast box*.



Gambar 4 Alat penumbuk manual

Benda Uji 2

Balas dituang kedalam *ballast box* kemudian ditabur sebanyak 10% potongan karet ban bekas secara merata sebagai pengisi rongga yang ditinggalkan oleh balas selanjutnya ditumbuk sebanyak 50 kali pada setiap lapisannya. Hal yang sama dilakukan pada dua lapisan berikutnya.

Benda Uji 3

Balas dituangkan kedalam *ballast box* seperti pada benda uji 1, namun setelah dilakukan pemadatan sebanyak 50 kali balas ditambahkan 3% aspal di atasnya hingga merata pada setiap lapisannya. Tahapan yang sama digunakan pada lapisan berikutnya.

Benda Uji 4

Penuangan balas dan karet dilakukan seperti ketika mempersiapkan sampel 2, namun setelah proses pemadatan sebanyak 50 kali, aspal dituangkan pada balas dan potongan karet ban bekas secara merata seperti benda uji 3. Begitu seterusnya hingga 3/3 bagian dari *ballast box* terpenuhi.

Pengujian kuat tekan

Metode kuat tekan adalah kekuatan yang dihasilkan oleh mesin kuat tekan dan berupa besarnya gaya yang diterima oleh suatu bahan persatuan (Tjokrodinuljo, 1996). Alat pengujian tekan vertikal yang digunakan adalah *Universal Testing Mechine* dengan merk Hung Ta 9501. Mesin ini memiliki kuat tekan maksimal sampai dengan 45 kPa. Pada penelitian ini pengujian yang diterapkan sama seperti ketika menguji tekan beton sesuai dengan BSN (1990). Bagian utama dari alat uji tekan vertikal seperti pada Gambar 5 sebagai berikut



Gambar 5 Alat uji tekan vertikal

4. Analisis Data

Masing-masing benda uji yang telah diketahui karakteristiknya, kemudian diletakkan pada mesin pengujian kuat tekan UTM yang akan menghasilkan empat parameter yakni, *force* (gaya), *Stress* (tegangan), *strain* (regangan) dan *elongation* (perubahan panjang atau tinggi). Dari masing-masing parameter tersebut diolah untuk mencari deformasi, abrasi dan modulus elastisitas.

Dari keempat data tersebut dapat memberikan penjelasan tentang besarnya deformasi yang terjadi dengan menarik garis antara tegangan dan *elongation* pada sebuah grafik. Pengujian abrasi digambarkan menggunakan grafik prosentase ukuran butir agregat menggunakan jumlah sebaran material balas dengan analisis saringan material balas sebelum dilakukan pembebanan dan setelah selesai dilakukan pengujian (Sanchez dkk., 2014).

Modulus Elastisitas merupakan gambaran suatu bahan berada pada kondisi elastis yang dihasilkan dari hubungan antara dua sumbu yaitu sumbu Y yang mewakili tegangan (σ) dan sumbu X yang mewakili regangan (ϵ) (Ointu dkk., 2013). Nilai modulus elastisitas dapat diketahui dengan melakukan pendekatan atau koreksi menggunakan *trendline* dari kurva tegangan dan regangan. Konsep sebuah konstanta modulus elastisitas seperti pada persamaan 1.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Dimana : E : Nilai modulus elastisitas (N)

σ : Tegangan (MPa)

ϵ : Regangan (mm)

5. Hasil dan Pembahasan

Pengujian Fisik Balas

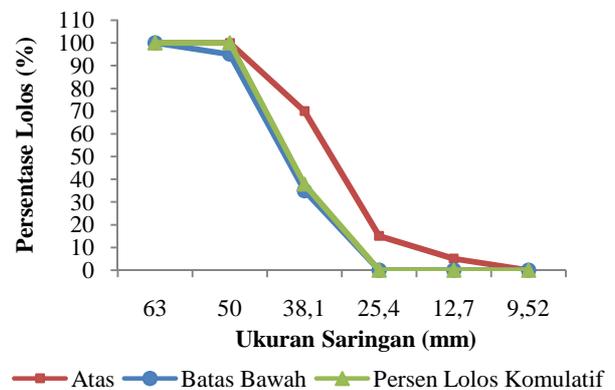
Pengujian fisik dilakukan pada balas untuk mengetahui kelayakan pemakaiannya sebagai bahan utama dalam penelitian. Adapun hasil pengujian fisik dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2 Sifat fisik material balas

Parameter	Hasil
Berat jenis curah kering, S_d	2,61
Berat jenis jenuh kering permukaan, S_s	2,64
Berat jenis semu, S_a	2,68
Penyerapan air, S_w	1%
Kandungan lumpur	1.9%

Keausan 18.42%

Pengujian analisis saringan juga dilakukan untuk mengetahui distribusi gradasi material balas memasuki spesifikasi pada kelas jalan 2 (PD No 10 1986). Dalam penelitian ini ukuran balas yang digunakan berkisar antara 25-60 mm (Kemenpeu, 2012). Distribusi ukuran balas tersaji pada Gambar 6.



Gambar 6 Distribusi gradasi balas

Pengujian Fisik Karet

Pada potongan karet ban bekas ini dilakukan 3 pengujian yaitu pengujian berat jenis, penyerapan air dan pengujian analisis saringan tertahan 3/8 inch atau sama dengan 9,52 mm. Adapun hasil pengujian berat jenis dan penyerapannya terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil pengujian berat jenis karet

Parameter	Hasil
Berat jenis curah kering, S_d	1.13
Berat jenis SSD, S_s	1.15
Berat jenis semu, S_a	1.15
Berat Jenis Rata Rata	1.14
Penyerapan air, S_w	1.5 %

Pengujian Fisik Aspal

Pengujian fisik aspal pada tahap persiapan benda uji dilakukan untuk mengetahui kelayakan penggunaan aspal penetrasi 60/70. Hasil pengujian fisik aspal disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil pengujian fisik aspal

Parameter	Hasil
Berat Jenis	1.03 gr/cm ³
Kehilangan Minyak	0.402 %
Penetrasi	62 mm
Titik Lembek	52°C
Daktilitas	147

Volume Pori

Identifikasi karakteristik pada campuran dilakukan untuk mengetahui setiap volume bahan serta volume pori yang mengisi sebuah *ballast box*. Semakin banyak bahan yang dicampurkan pada balas modifikasi, maka semakin kecil volume rongganya. Karena bahan campuran seperti karet ban bekas dan aspal ditujukan untuk mengisi rongga-rongga dan mengikat material. Volume pori setiap sampel disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Nilai volume pori setiap Benda Uji

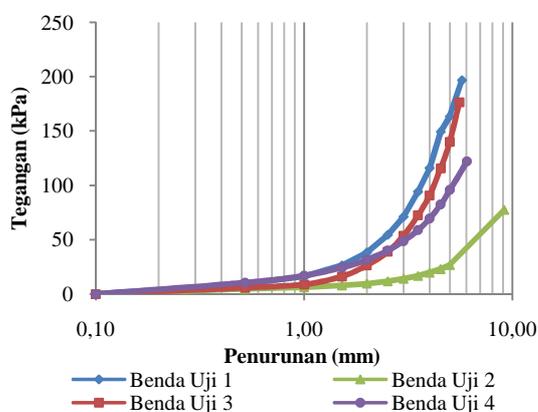
No.	Nama Sampel	Volume Pori
1.	Benda Uji 1	47,75 %
2.	Benda Uji 2	41,23 %
3.	Benda Uji 3	38,45 %
4.	Benda Uji 4	29,23 %

Pengaruh balas modifikasi terhadap deformasi

Nilai deformasi benda uji pada penelitian ini didapatkan dari grafik hubungan antara penurunan dan pembebanan. Adapun hasil deformasi dapat di lihat pada Tabel 6 dan Gambar 7

Tabel 1 Nilai deformasi vertikal

No	Benda Uji	Tegangan maksimal (kPa)	Deformasi maksimal (mm)
1	Benda Uji 1	196,59	5,72
2	Benda Uji 2	77,27	9,12
3	Benda Uji 3	176,29	5,56
4	Benda Uji 4	121,97	6,04



Gambar 7 Grafik hubungan penurunan dan tegangan

Dari Tabel 6 dan grafik pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa benda uji 2 yakni modifikasi material balas dan potongan karet ban bekas mempunyai nilai deformasi paling besar yaitu sebesar 9,12 mm, dengan tegangan sebesar 77,27 kPa, nilai tersebut meningkat sebanyak 83,71% dari benda uji ke 1 dapat di lihat pada Tabel 7. Penambahan potongan karet ban bekas sebanyak 10% dari berat total sangat berpengaruh terhadap sifat benda uji ke 2 karena material elastis yang disebabkan oleh potongan karet ban bekas dapat mengisi setiap rongga pada setiap sisi balas.

Sedangkan, pada Benda uji ke 3 yaitu modifikasi balas dan aspal penetrasi 60/70 menghasilkan nilai deformasi yang lebih kecil yaitu 14,41% dibandingkan dengan benda uji ke 2, hal ini dibuktikan pada Tabel 6 dan grafik pada Gambar 7 yang mengalami kenaikan pada sumbu Y namun tidak mengalami pelebaran pada sumbu X. Perilaku aspal yang ditambahkan pada lapisan balas ditujukan sebagai bahan pengikat pada setiap materialnya.

Keadaan yang sama juga ditunjukkan pada benda uji ke 4 dimana penambahan aspal pada modifikasi balas dan potongan karet ban bekas menghasilkan nilai deformasi sebesar 41,39% dapat di lihat pada Tabel 7, nilai tersebut lebih rendah dibandingkan benda uji ke 2. Sedangkan nilai deformasi pada benda uji ke 4 bisa lebih tinggi dibandingkan benda uji ke 3 karena adanya potongan karet ban bekas di dalamnya. Jadi dapat dilihat pada benda uji ke 4 bahwasannya tegangan yang berada pada sumbu Y menurun dibandingkan benda uji ke 3 penurunan penurunan pada sumbu X cenderung melebar dibandingkan benda uji ke 2, dikarenakan penambahan potongan karet ban bekas.

Tabel 2 Nilai deformasi vertikal pada penurunan 5 mm

No.	Benda Uji	Penurunan (mm)	Tegangan (kPa)	% Penurunan
1.	Benda Uji 1	5	163,369	0 %
2.	Benda Uji 2	5	26,618	83,71 %
3.	Benda Uji 3	5	139,825	14,41 %

4.	Benda Uji 4	5	95,746	41,39 %
----	-------------	---	--------	---------

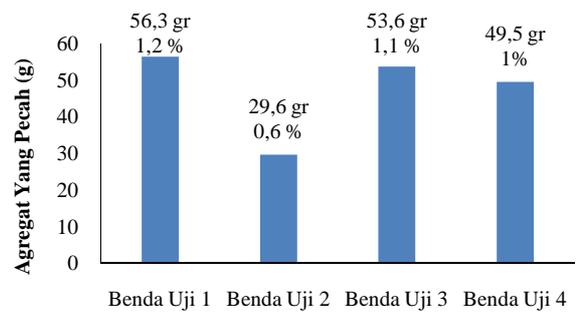
Pengaruh balas modifikasi terhadap gradasi dan abrasi

Nilai abrasi didapat dari material balas sebelum pengujian dan setelah pengujian. Material yang digunakan untuk pengujian abrasi sebanyak ± 5 kg atau sama dengan 5000 gram dari total keseluruhan benda uji. Modifikasi material balas bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap kekakuan tinggi, yang berakibat keausan pada material balas dengan umur penggunaan material pendek.

Uji ketahanan diawali pada tahap persiapan yaitu pemadatan sebanyak 50 kali tumbukan pada setiap sepertiga lapisannya, kemudian pada tahap selanjutnya diuji menggunakan alat kuat tekan vertikal. Dari langkah persiapan hingga pengujian adalah faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan distribusi gradasi pada material balas. Sehingga, secara tidak langsung dapat mengidentifikasi banyaknya abrasi yang dihasilkan. Adapun distribusi gradasi sebelum dan sesudah pengujian ditampilkan pada Tabel 8 dan diagram batang yang terdapat pada Gambar 8, masing-masing benda uji mempunyai nilai abrasi yang berbeda-beda terutama pada balas modifikasi.

Tabel 3 Abrasi sesudah dan sebelum pengujian

No	Benda uji	Berat Total	Berat Abrasi	Persen Abrasi
1	Benda Uji 1	5095,7	56,3	1,20%
2	Benda Uji 2	5004	29,6	0,60%
3	Benda Uji 3	5040	53,6	1,10%
4	Benda Uji 4	5114,9	49,5	1%



Gambar 8 Distribusi gradasi benda uji sesudah pengujian

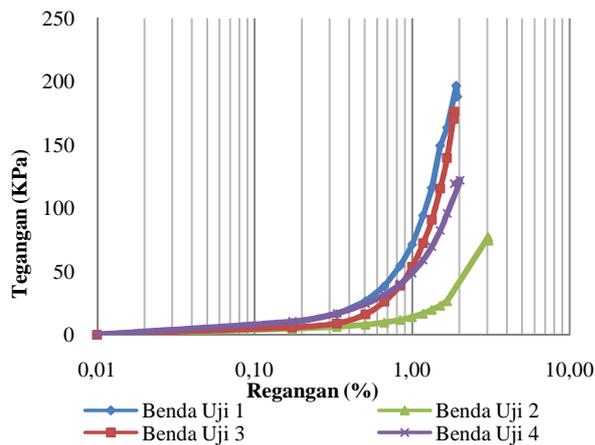
Apabila diperhatikan pada Tabel 8 dan diagram pada Gambar 8 dapat ditarik suatu hasil bahwa secara keseluruhan, balas modifikasi dapat meminimalisir abrasi. Nilai abrasi paling kecil terdapat pada modifikasi balas dan potongan karet ban bekas yaitu sebanyak 29,6 gr atau sebanyak 0,6% dari total material yang diuji dan mengalami penurunan abrasi sebanyak 47,5% dari benda uji ke 1 dapat di lihat pada Tabel 9. Dari data hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa penambahan potongan karet ban bekas dan aspal dapat melindungi material balas karena aspal memiliki sifat yang mengikat ketika sudah memadat.

Tabel 4 Persen abrasi

No	Benda uji	Berat Total	Berat Abrasi	Persen Abrasi
1	Benda Uji 1	5095,7	56,3	0,0%
2	Benda Uji 2	5004	29,6	47,5%
3	Benda Uji 3	5040	53,6	5,0%
4	Benda Uji 4	5114,9	49,5	12,1%

Pengaruh balas modifikasi terhadap modulus elastisitas

Pada pengujian ini modulus elastisitas diperoleh dari 4 jenis campuran yang berbeda – beda. Adapun grafik tegangan regangan terdapat pada Gambar 9



Gambar 9 Grafik hubungan tegangan dan regangan setiap benda uji

Semakin tinggi nilai modulus elastisitas yang dihasilkan, menunjukkan sifat benda uji tersebut semakin kaku (Soleman, 2005). Nilai modulus elastisitas pada setiap benda uji disajikan dalam Tabel 10.

Tabel 5 Nilai modulus elastisitas

No	Benda Uji	Stress (kPa)	Strain (%)	E (kPa)
1	Benda Uji 1	149,276	1,507	9907,644
2	Benda Uji 2	6,082	0,333	1824,678
3	Benda Uji 3	115,562	1,507	7670,014
4	Benda Uji 4	16,939	0,333	5082,088

Pada balas modifikasi, nilai tegangan paling tinggi terdapat pada benda uji ke 3 yaitu modifikasi balas dan aspal. Hal ini menunjukkan bahwa pencampuran aspal pada suatu benda uji membuat sifat kaku dan kuat. Kekompakan pada benda uji ke 3 didukung juga dengan adanya pemadatan secara manual sebelum dituangkan aspal. Pada benda uji ke 4 kembali menegaskan bahwa aspal mempunyai kemampuan untuk meningkatkan kekakuan suatu bahan dan memungkinkan mengurangi keretakan dari balas seperti pada penelitian Lee dkk. (2014).

Akan tetapi pada benda uji ke 4 yakni balas modifikasi karet dan aspal menunjukkan perilaku yang lebih elastis dari benda uji ke 3, dikarenakan adanya potongan karet ban bekas

di dalam modifikasi ini. Selain itu penggunaan potongan karet ban bekas pada lapisan balas ini juga digunakan pada struktur bantalan untuk mengurangi keretakan sebesar 80-100% pada bantalan rel akibat distribusi beban yang besar dari rel (Hameed dan Shashikala, 2016).

Berbeda dengan benda uji ke 2 yang mempunyai nilai tegangan yang rendah yaitu sebesar 6,08 kPa dengan regangan sebesar 0,3%. Keadaan ini menunjukkan benda uji ke 2 yang mempunyai perilaku elastis disebabkan oleh modifikasi balas dan potongan karet ban bekas. Pada benda uji ke 2, nilai modulus menurun secara signifikan, bukan hanya fakta tentang penggunaan karet sebagai agregat elastis yang menjadikan sampel menjadi lebih lentur.

6. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pengujian deformasi benda uji ke 2 memiliki nilai tertinggi yaitu 83,71% di susul benda uji ke 4 yaitu 41,39% dan benda uji ke 3 yaitu 14,41% dari nilai balas yang tidak di modifikasi. Hal ini menunjukkan tingkat penurunan paling tinggi disebabkan oleh material elastis yang berasal dari material karet bekas, sehinggaketika diberikan pembebanan, benda uji cenderung mengalami penurunan yang signifikan walaupun dengan pembebanan kecil.
2. Pada pengujian abrasi benda uji 2 dapat menurunkan sebanyak 47,5%, benda uji ke 3 5% dan benda uji ke 4 12,1% dari benda uji ke 1. Jadi semakin tinggi gesekan atau tumbukan antara material balas maka abrasi akan semakin tinggi.
3. Pada modifikasi balas karet penggunaan material elastis cenderung menurunkan nilai modulus elastisitas. Berbeda halnya dengan modifikasi balas karet aspal, penggunaan material aspal sebagai pengikat justru dapat meningkatkan nilai modulus elastisitas.

7. Daftar Pustaka

- Abadi, T., Pen, L. L., Zervous, A., dan Powrie, W., 2016, A Review And Evaluation of Ballast Settlement Models Using Result Form The

- Southampton Railway Testing Facility (SRTF), *Procedia Engineering*, 143, 999-1006.
- Abbas, S., 2004, *Manajemen Transportasi*, Raja Grafindo Persada, Jakarta.
- Adhikari, B., dan Maiti, S., 2000, Reclamation and Recycling of Waste Rubber, India, Science Centre Institute of Technology Kharangpur.
- Alvarez, A. E., Espinosa, L. V., Caro, S., Rueda, E. J., Aguiar, J. P. dan Loria, L. G., 2018, Differences in Asphalt Binder Variability Quantified Through Traditional and Advanced Laboratory Testing. *Construction and Building Materials*, 176, 500-508.
- Asgharzadeh, S.M., Sadeghi, J. dan Pedram, M., 2018, Fatigue Properties of Crumb Rubber Asphalt Mixtures Used in Railway, *Construction and Building Materials*, 184, 248-257.
- Bressi, S., Santos, J., Giunta, M., Pistonesi, L. dan Presti, D. L., 2018, A Comparative Life-Cycle Assessment of Asphalt Mixture for Railway Sub-Ballast Containing Alternative Materials, Resources, *Conservation and Recycling*, 137, 76-88.
- BSN, 1990, SNI 03-1974-1990, Metode Pengujian Kuat Tekan Beton, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1991, SNI 06:2432:1991, Metode Pengujian Daktilitas Bahan – Bahan Aspal, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1991, SNI 06:2440:1991, Metode Pengujian Berat Minyak dan Aspal Dengan Cara A, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1996, SNI 03:4142-1996, Metode Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir Mudah Pecah Dalam Agregat, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2008a, SNI 1969:2008, Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2008b, SNI 2417:2008, Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011a, SNI 2441:2011, Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011b, SNI 2432:2011, Cara Uji Penetrasi Aspal, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011d, SNI 2434:2011, Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring And Ball), Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2012, SNI ASTM C136-2012, Metode Uji Untuk Analisis Saringan Agregat Halus dan Agregat Kasar, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- D'Andrea, A., Loprencipe, G. dan Xhixha, E., 2012, *Vibration Induced By Rail Traffic: Evaluation Of Attenuation Properties In A Bituminous Sub-Ballast Layer*, *Procedia - Social And Behavioral Sciences*, 53, 245-255.
- D'Angelo, G., Presti, D.L. dan Thom, N., 2016, *Bitumen Stabilized Ballast: A potential Solution For Railway Track Bed*, *Construction And Building Materials*, 124, 118-126.
- D'Angelo, G., Presti, D.L. dan Thom, N., 2017, *Optimisation Of Bitumen Emulsion Properties For Ballast Stabilisation*, *Materiales De Construcción*, 67, 124-133.
- Farhan, A. H., Dawson, A. R., Thom, N. H., Adam, S. dan Smith, M. J., 2015, Flexural Characteristics of Rubberized Cement-Stabilized Crushed Aggregate for Pavement Structure. *Materials & Design*, 88, 897-905.
- Lee, S. H., Lee, J. W., Park, D. W. dan Vo, H. V., 2014, Evaluation of Asphalt Concrete Mixtures for Railway Track. *Construction and Building Materials*, 73, 13-18.
- Mino, G.D., Liberto, M. D., 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.
- Hameed, A.S., dan Shashikala, A.P., 2016, Suitability of Rubber Concrete for

- Railway Sleepers, *Perspectives In Science*, 8, 32-35.
- Haq, S. dan Tunafiah, H., 2015, *Analisis Kondisi Jalan Rel dan Sarana-Prasarana Stasiun pada Beberapa Stasiun di Jabodetabek*, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Tangerang, Vol 4, No 2, 2302-8734.
- 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.
- Navaratnarajah, S.K., dan Indraratna, B., 2017, *Use of Rubber Mats To Improve The Deformation and Loading*, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1943-5606.
- Ointu, B.M.M., Tamboto, W.J., dan Pandeleke, R.R., 2013, *Kajian Uji Laboratorium Nilai Modulus Elastis Bata Merah Dalam Sumbangan Kekakuan Pada Struktur Sederhana*, *Jurnal Sipil Statik*, 1, 797-800.
- Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986 tentang *Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel*.
- Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 tentang *Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*.
- Pirozzolos, L., Sanchez M.S., Navarro, F.M, Montes, G.M., dan Gámez, M.C.R., 2017, *Evaluation of Bituminous Sub-Ballast Manufactured At Low Temperatures As An Alternative for The Construction of More Sustainable Railway Structures*, *Materiales De Construcción*, Vol 67, No 327.
- Rosyidi, S.A.P., 2015, *Rekayasa Jalan Kereta Api*, Yogyakarta: Lembaga Penelitian, Publikasi dan Pengabdian Masyarakat (LP3M).
- Sánchez, M.S., Navarro, F.M. dan Gámez, M.C.R., 2014, *The Use Of Deconstructed Tires As Elastic Elementsin Railway Tracks*, *Materials*, 7, 5903-5919.
- Sánchez, M.S., Thom, N.H., Navarro, F.M., Gámez, M.C.R. dan Airey, G.D., 2015, *A Study Into The Use Of Crumb Rubber In Railway Ballast*, *Construction And Building Materials*, 75, 19-24.
- Setiawan, D.M., Ghataora, G.S. dan Muthohar, I., 2013, *Conventional and Unconventional Railway Track for Railways on Soft Ground In Indonesia (Case Study: Rantau Prapat - Duri Railways Development)*, *The 16th International Symposium of Indonesia Inter University Transportation Studies Forum (FSTPT)*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, Indonesia.
- Setiawan, D.M., 2016, *Pembatasan Kecepatan Maksimum dan Kaitannya Terhadap Kapasitas Lintas Jalur Kereta Api Muara Enim – Lahat Sumatera Selatan*, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil Ke-IV 2016*, ISSN:2459-9727.
- Setiawan, D.M. dan Rosyidi, S.A.P., 2016, *Track Quality Index As Track Quality Assessment Indicator*, *Symposium XIX FSTPT*, Universitas Islam Indonesia.
- Signes, C.H., Hernandez, P.M., Roca, J.G., Torre, M.E.D. dan Franco, R.I., 2016, *An Evaluation of The Resilient Modulus And Permanent Deformation of Unbound Mixtures of Granular Materials and Rubber Particles From Scrap Tyres To Be Used In Sub-Ballast Layers*, *Transportation Research Procedia*, 18, 384 – 391.
- Soleman, Y., 2005, *Evaluasi Modulus Elastisitas Beton (Ec) Berdasarkan Analisis Karakteristik Agregat*, Sintuwu Maroso University, Poso, Indonesia.
- Soto, F.M. dan Mino, G.D., 2017, *Increased Stability of Rubber Modified Asphalt Mixtures To Swelling Expansion and Rebound Effect During Post Compaction*, *Transport and Vehicle Engineering*, 1307 - 6892.
- Tjokrodinuljo, K., 1996, *Teknologi Beton*. Yogyakarta.

