

Pengaruh Gradasi Karet Ban Bekas terhadap Nilai Modulus Elastisitas pada Modifikasi Campuran Balas

The Effect of the Scrap Tires Rubber Size Against Elastic Modulus on a Modification of Ballast Mixture

Nikhmatusholihah, Sri Atmaja P. Rosyidi, Dian Setiawan M.

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Sebagai salah satu elemen struktur pada jalan rel, lapisan balas mempunyai peranan penting dalam menyalurkan dan mendistribusikan beban. Kerusakan pada lapisan balas akibat beban roda dinamis yang besar tidak dapat dihindari dan mengarah ke tingkat pemeliharaan yang tinggi. Maka dari itu, struktur balas konvensional yang digunakan masih perlu adanya pembaruan dengan metode stabilisasi lapisan balas. Penelitian ini memanfaatkan limbah karet ban bekas untuk campuran balas dengan harapan dapat meningkatkan umur layan struktur balas, mengurangi limbah ban bekas, mengurangi biaya konstruksi dan pemeliharaan jalan rel serta meningkatkan durabilitas. Dalam penelitian ini, digunakan metode pengujian tekan dengan alat uji tekan (UTM), dengan sampel benda uji yaitu balas tanpa modifikasi, balas dengan penambahan 10% karet dengan gradasi seragam dan balas dengan penambahan 10% karet dengan gradasi menerus. Tujuan yang ingin dicapai adalah mengukur nilai modulus elastisitas dan durabilitas modifikasi campuran balas dan karet. Nilai modulus elastisitas yang didapatkan untuk balas pada pengujian pertama sebesar 10,1 MPa dan pada pengujian kedua 5,38 MPa, balas dengan karet seragam pada pengujian pertama sebesar 5,74 MPa dan pada pengujian kedua sebesar 3,68 MPa, dan balas dengan karet menerus pada pengujian pertama sebesar 2,70 MPa dan pada pengujian kedua sebesar 1,62 MPa. Nilai abrasi yang didapatkan untuk balas sebesar 162,1gr atau 3,24%, balas dengan karet seragam sebesar 54,2gr atau 1,08%, balas dengan karet menerus sebesar 50,1gr atau 1%, maka nilai abrasi yang paling besar ada pada campuran balas dengan karet gradasi menerus. Modifikasi balas dengan penambahan karet dapat mengurangi nilai modulus elastisitas namun dapat meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan agregat.

Kata kunci: abrasi, karet ban bekas, modulus elastisitas, struktur jalan rel

Abstract. The deterioration of ballast structure due to large dynamic wheel loads is inevitable and lead to the high cost maintenance. Conventional railway structures needs to be renewed to increase its ability in distributing the load. This research used the scrap rubber in the ballast mixture in order to increase the service life and durability of ballast layer, to optimize the utilization of tires waste, and to decrease the construction and maintenance cost of the railway track structures. The compression test by Universal Testing Machine (UTM) was used in this research. The purpose of this research is to analyze the elastic modulus and durability of the ballast mixture modification. The results showed that the elastic modulus of sample 1 (ballast) was 10,10 MPa and 5,38 MPa with the abrasion was 162,1gr or 3,24%. Moreover, the elastic modulus of sample 2 (ballast with 10% of uniformly sized scrap rubber) was 5,74 MPa and 3,68 MPa with the abrasion was 54,2gr or 1,08%. While the elastic modulus of sample 3 (ballast with 10% of continuously graded scrap rubber) was 2,70 MPa and 1,62 MPa with the abrasion was 50,1gr or 1%. Modification of the ballast layer using the scrap rubber could decrease the elastic modulus. However, the scrap rubber utilization would increase the resilience of ballast materials.

Key word : abration, railways structure, scrap rubber tires

1. Pendahuluan

Dalam dunia perkereta apian Indonesia masih menggunakan jalan rel konvensional dengan konstruksi jalan rel menggunakan struktur balas. Padahal kebutuhan penggunaan kereta api semakin hari semakin meningkat. Lapisan balas berfungsi sebagai penahan konstruksi bantalan dan penerus beban dari bantalan sehingga menjadi beban merata (Rosyidi, 2015). Struktur balas merupakan lapisan jalan rel yang paling banyak digunakan karena keuntungannya dari segi ekonomis, praktis dan mudah. Namun, balas ini belum mampu memenuhi fungsinya sebagai penyalur beban. Kondisi material yang buruk dapat menjadi tolak ukur untuk perlakuan apa yang di butuhkan selanjutnya seperti pemeliharaan langsung atau pembatasan kecepatan (Setiawan et al., 2016). Metode baru dengan mengaplikasikan polimer poliuretan in-situ sedang di uji coba di Inggris untuk meningkatkan stabilitas lapisan balas (Woodward et al., 2012). Salah satu cara menghindari atau menanggulangi pembatasan kecepatan adalah dengan perkuatan struktur balas agar material balas tidak berhamburan dan meminimalisir kerusakan pada balas. Penggunaan karet ban bekas sebagai bahan tambah pada modifikasi balas merupakan salah satu cara mengurangi penggunaan agregat atau batu yang semakin hari semakin menipis. Dengan penambahan karet ini diharapkan mampu menahan deformasi permanen, mengurangi penggunaan agregat dan mengurangi gesekan antar agregat sehingga mengurangi kerusakan agregat.

Pemanfaatan limbah karet dari ban bekas yang sudah tidak terpakai merupakan salah satu solusi yang dapat mengurangi penggunaan agregat alam dan berfungsi juga untuk meningkatkan durabilitas dari struktur jalan rel tersebut (Sanchez et al., 2015). Dalam penelitian sebelumnya, Sanchez et al. (2014), mengatakan bahwa kadar karet optimal yang digunakan sebesar 10% jika lebih maka akan mengurangi kekakuan balas tersebut. Campuran bahan elastik ini juga dapat digunakan pada bantalan mengurangi keretakan pada bantalan sebesar 80-100% (Hameed dan Shashikala, 2016). Dalam penelitian lain Signes et al., (2016) melakukan uji triaksial untuk mendapatkan modulus resilien (M_r) pada

campuran karet balas. Penggunaan bahan campuran bahan karet dalam perkuatan lapisan balas, dapat mengurangi degradasi dan deformasi dalam jangka panjang (Indraratna et al., 2017).

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik modifikasi campuran balas karet melalui uji tekan dengan menganalisis modulus elastisitas, durabilitas dengan analisis abrasi dan deformasi vertikal. Dengan demikian dapat dilihat pengaruh dari penambahan karet dan perbedaan karakteristik campuran dengan karet bergradasi seragam dan menerus.

2. Metode Penelitian

Tahap Persiapan

Tahapan awal yang dilakukan untuk melakukan pengujian ini adalah studi literatur sebagai dasar pengujian. Setelah itu dilanjutkan dengan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan pada pengujian ini. Agregat yang digunakan berasal dari Kulon Progo (Gambar 1.). Ban bekas yang digunakan merupakan ban luar bekas kendaraan motor (Gambar 2.)



Gambar 1. Agregat



Gambar 2. Karet

Pengujian Bahan

Penting untuk melakukan pengujian terhadap fisis agregat dan karet yang akan digunakan pada penelitian. Untuk agregat, pengujian fisis yang dilakukan berupa uji berat jenis dan penyerapan, analisis saringan, kadar lumpur dan keausan dengan mesin *Los Angeles*. Untuk karet dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan dan analisis saringan.

Perencanaan Campuran

Campuran yang dibuat sebagai benda uji merupakan campuran antara balas dan karet dengan gradasi seragam juga balas dan karet dengan gradasi menerus. Kadar karet dalam campuran sebesar 10% yang merupakan kadar optimum karet dari total berat agregat.

Pembuatan Benda Uji dan Pengujian

Tahap pembuatan benda uji ini hal pertama yang dilakukan adalah menyiapkan agregat dan karet yang akan digunakan. Jika karet masih dalam potongan besar maka potonglah sesuai dengan ukuran yang dikendaki yaitu dengan ukuran lolos saringan 3/8" untuk gradasi seragam, dan lolos saringan 1", 1/2", 3/4", dan saringan No. 4. Timbang berat karet sampai 10% dari berat agregat. Agregat dimasukkan kedalam cetakan uji per 1/3 tinggi cetakan, ditumbuk sebanyak 25 kali dan dilapisi dengan karet setiap lapisannya. Sampel ditimbang lalu dilakukan uji tekan dengan mesin UTM, pengujian tekan dilakukan dengan metode *load unload* atau ditekan, setelah mencapai titik puncaknya, beban di lepaskan, lalu dilakukan penekanan yang kedua. Setelah di uji tekan, sampel dikeluarkan dari cetakan lalu dilakukan penimbangan untuk agregat kasar sesuai dengan nomor saringannya. Sampel uji yang digunakan terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sampel uji modifikasi balas

No.	Jenis Benda Uji	Material Penyusun	Gradasi Karet
1	Sampel I	Balas	-
2	Sampel II	Balas + Karet (10%)	+ Seragam
3	Sampel III	Balas + Karet (10%)	+ Menerus

Hasil dari pengujian ini adalah nilai tegangan, regangan dan deformasi vertikal. Lalu dilakukan analisis dengan kurva hubungan tegangan dan regangan dan kurva hubungan pembebanan dan deformasi vertikal.

3. Hasil Penelitian

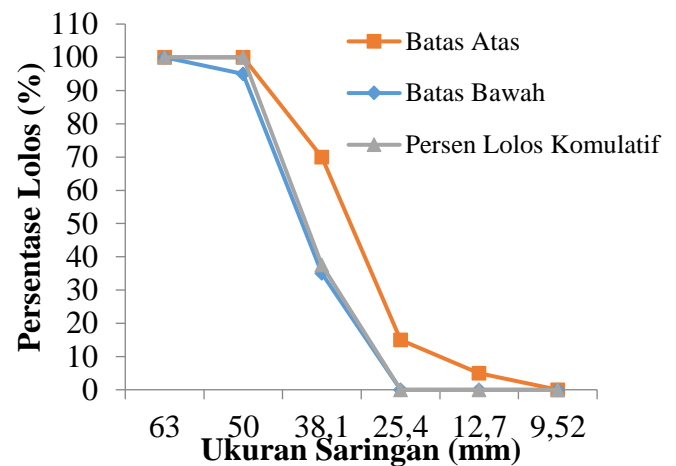
Hasil Pemeriksaan Agregat

Pada Tabel 2, ditunjukkan hasil pengujian fisis dari agregat yang digunakan dan telah memenuhi spesifikasi yang ditetapkan oleh

SNI. Distribusi ukuran agregat terdapat pada Gambar 3.

Tabel 2. Hasil pemeriksaan agregat

No	Pemeriksaan	Spesifikasi	Hasil	Satuan
Agregat Kasar				
1.	Berat Jenis Curah Kering	$\geq 2,5$	2,63	-
2.	Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan	$\geq 2,5$	2,66	-
3.	Berat Jenis Semu	$\geq 2,5$	2,70	-
4.	Penyerapan Air	≤ 3	0,95	%
5.	Kadar Lumpur		1,88	%
6.	Keausan Agregat	≤ 40	17,66	%



Gambar 3. Gradasi butiran agregat

Karakteristik Campuran

Setiap sampel memiliki karakteristik campuran yang berbeda, hal ini terjadi karena material penyusun yang juga berbeda (Tabel 4).

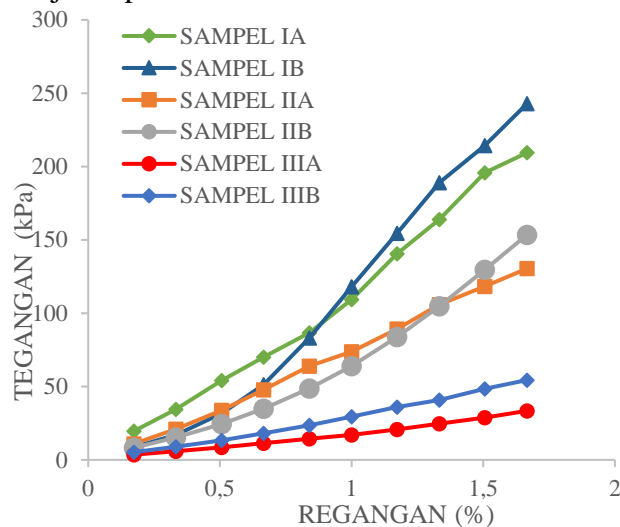
Tabel 4. Karakteristik campuran

No	Parameter	S I	S II	S III
1	Berat Vol (gr/cm ³)	1,60	1,46	1,43
2	Vol. Karet (%)	-	13,29	13,00
3	Vol. Balas (%)	60,07	49,47	48,37
4	Vol. Pori (%)	39,93	37,24	38,63

4. Pembahasan

Modulus Elastisitas

Kurva hubungan tegangan regangan disajikan pada Gambar 4 berikut ini:



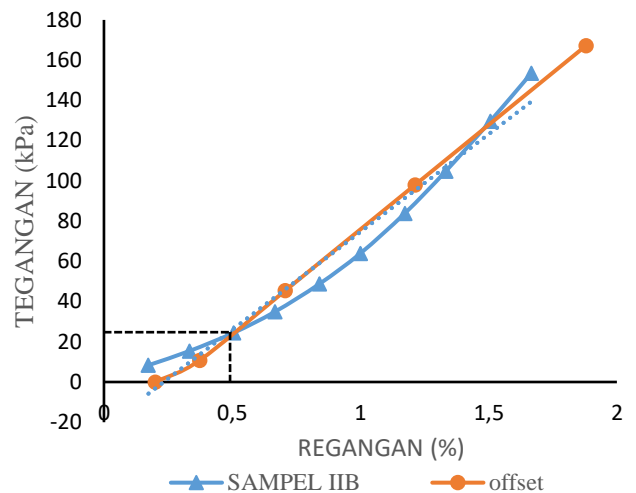
Gambar 4. Kurva hubungan tegangan dan regangan

Penambahan karet pada campuran balas dapat mengurangi tingkat kekakuan balas tersebut. Dapat dilihat pada gambar diatas bahwa balas tanpa modifikasi memiliki tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan balas dengan penambahan karet.

Nilai modulus elastisitas dapat diperoleh dengan pendekatan grafik hubungan tegangan dan regangan dengan garis *offset* sebesar 2% dari nilai regangan (Gambar 5).

Tabel 5. Nilai modulus elastisitas sampel

No	Benda Uji	Stress (kPa)	Strain (%)	E (MPa)
1	Sampel IA	50,50	0,50	10,10
2	Sampel IB	19,90	0,37	5,38
3	Sampel IIA	22,40	0,39	5,74
4	Sampel IIB	21	0,57	3,68
5	Sampel IIIA	10	0,37	2,70
6	Sampel IIIB	6	0,37	1,62



Gambar 5. Penarikan garis *offset* pada grafik sampel IIB

Modulus elastisitas yang terbesar ditunjukkan oleh sampel pertama yaitu balas tanpa campuran karet pada pengujian pertama. Pada pengujian kedua, sampel satu mengalami penurunan karena sudah mendapatkan pembebanan sebelumnya (Tabel 5).

Penurunan yang terjadi pada sampel I sebesar 46,73% (dari A = 10,10 MPa menjadi B = 5,38 MPa), sampel II 35,86% (dari A = 5,74 MPa menjadi B = 3,68 MPa) dan sampel III 40% (dari A = 2,70 MPa menjadi B = 1,62 MPa). Nilai modulus elastisitas pada sampel III lebih kecil dibandingkan kedua sampel lainnya, hal ini terjadi karena sampel III lebih elastis dengan adanya penambahan karet ban bekas dengan beragam ukuran sehingga volume pori sampel III menjadi lebih kecil namun kekakuan dari campuran balas tersebut berkuang. Kekakuan lapisan balas berbeda pada tiap lapisannya, kekakuan terbesar terdapat pada lapisan paling bawah dan bagian yang lentur terdapat pada bagian paling atas dari lapisan (Zakeri et al., 2016).

Penambahan karet dapat mengurangi kekakuan dari campuran balas, sehingga menurunkan nilai modulus elastisitas. Sanchez et al., (2014) dan Signes et al., (2016) mengatakan bahwa bahan elastis dapat meningkatkan deformasi dan menurunkan kekakuan.

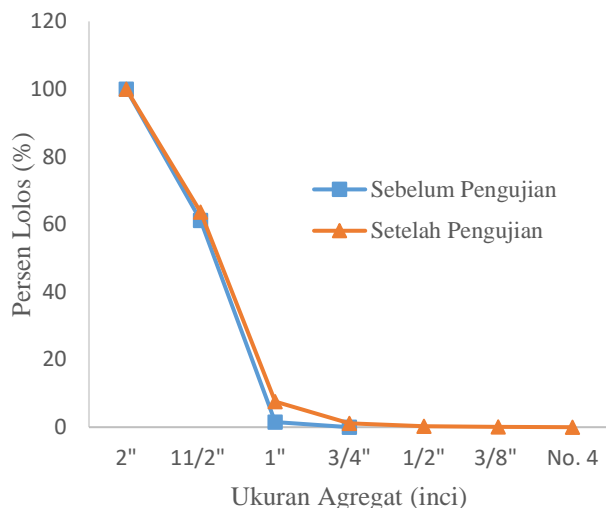
Modulus elastisitas pada campuran balas karet dengan gradasi seragam memiliki nilai modulus elastisitas lebih besar dibandingkan dengan balas karet dengan gradasi menerus. Hal ini disebabkan karena balas karet dengan

gradasi menerus memiliki ukuran karet yang lebih besar dan beragam, maka dari itu persebaran karet pada permukaan balas menjadi lebih tidak teratur yang menyebabkan kekakuan menjadi berkurang.

Penurunan nilai moodulus elastisitas bukan hanya dipengaruhi oleh bahan elastis pada karet, namun juga nilai kepadatan. Penurunan nilai kepadatan terjadi karena pantulan yang terjadi pada alat penumbuk pada saat pemadatan. Kurangnya nilai kepadatan inilah yang juga memengaruhi turunnya nilai modulus elastisitas (Signes et al., 2016).

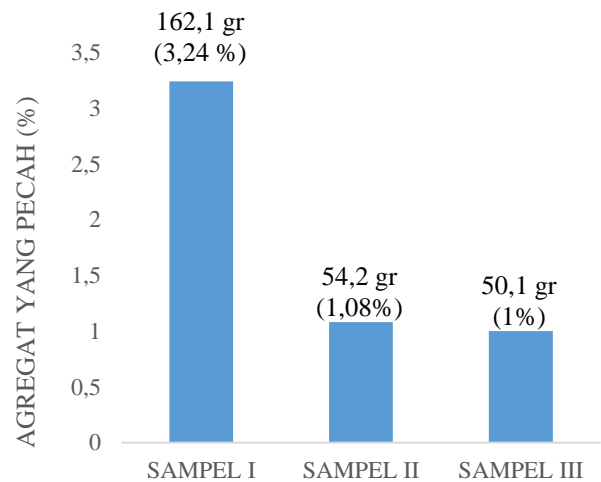
Nilai Abrasi

Ketahanan balas terhadap kerusakan akibat pembebanan yang terjadi dapat dilihat melalui nilai abrasi sampel uji. Besar dan kecilnya nilai abrasi merupakan perbandingan antara gradasi butir agregat sebelum pengujian (mendapatkan pembebanan) dan sesudah pengujian.



Gambar 6. Gradasi agregat sampel II

Hasil uji analisis saringan pada sampel setelah dilakukan pengujian, terdapat perubahan pola distribusi ukuran agregat (Gambar 6). Hal ini dikarenakan adanya perilaku pembebanan saat pemadatan atau penumbukkan dan pembebanan saat pengujian menggunakan alat UTM. Balas yang hancur dapat dilihat dari perubahan ukuran butir agregat menjadi lebih kecil karena lolos saringan 3/4" atau berukuran lebih kecil dari 25,4 mm. Masing-masing sampel memiliki nilai abrasi yang berbeda tergantung dengan modifikasi yang diberikan.



Gambar 7. Nilai abrasi

Berbeda dengan balas dengan modifikasi, jumlah agregat yang terabrasi pada balas tanpa modifikasi lebih besar dibandingkan dengan balas yang dimodifikasi (Gambar 7). Nilai abrasi yang kecil menyebabkan durabilitas balas dengan modifikasi dengan karet lebih besar karena adanya pengurangan gesekan atau kontak antar agregat dan digantikan dengan kontak dari agregat ke karet yang ditambahkan. Karet ban bekas dapat dengan mudah mengisi rongga atau pori yang ada didalam campuran benda uji, dengan begitu modifikasi balas karet mengurangi kerusakan lebih besar dibandingkan dengan kerusakan yang terjadi pada sampel modifikasi balas. Sanchez et al., (2014) pada penelitiannya menambahkan bahwa karet dengan ukuran yang lebih kecil dapat mengisi rongga dengan baik sehingga dapat mengurangi kekakuan yang mengakibatkan gesekan antar agregat.

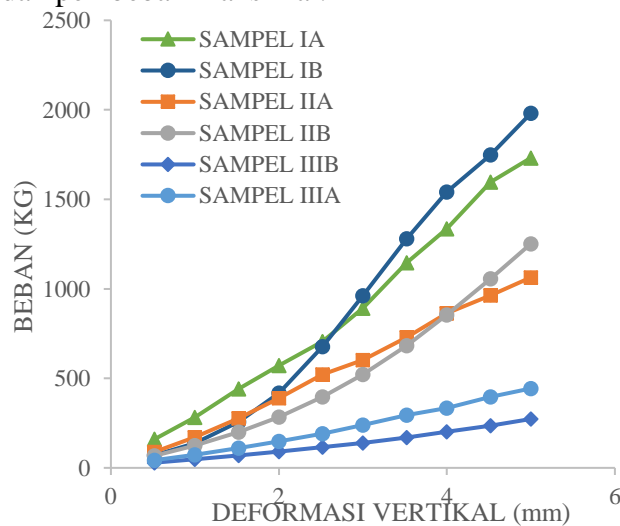
Agregat yang terabrasi lebih banyak pada sampel I yaitu balas tanpa modifikasi sebesar 3,24% dan paling sedikit adalah sampel III yaitu balas dengan modifikasi karet bergradasi menerus. Perbedaan prosentase antara sampel II dan sampel III sangat tipis antara 1,08% dengan 1%, hal ini dikarenakan balas dengan karet gradasi menerus memiliki ukuran karet yang beragam sehingga dapat mengisi rongga dengan baik.

Penambahan karet pada campuran balas dapat mengurangi kerusakan pada material balas tersebut, Indraratna et al., (2017) mengatakan bahwa balas modifikasi dapat meminimalisir kerusakan materialnya dengan

sangat baik karena gerak material menjadi terbatas dan gesekan menjadi berkurang. Nimbalkar et al. (2012) mengatakan, penambahan *shock mat* dapat pula mengurangi kebisingan dan getaran sehingga meningkatkan kenyamanan pengguna kereta. Penambahan karet bekas dapat mengurangi benturan material sehingga durabilitas material meningkat, dan degradasi material menurun (D'Angelo et al., 2016).

Deformasi Vertikal

Nilai deformasi vertikal didapatkan dari hasil pengujian berupa pembebanan dan penurunan yang terjadi pada benda uji. Data yang digunakan adalah penurunan maksimal dan pembeban maksimal.



Gambar 8. Kurva hubungan beban dengan deformasi vertikal

Hasil pengujian (lihat Gambar 8) menunjukkan nilai yang bervariasi. Material balas tanpa campuran menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan balas balas modifikasi. Material elastis berupa karet yang ditambahkan pada modifikasi campuran balas menyebabkan kenaikan sifat elastis dari campuran.

Sifat elastis yang dimiliki karet menyebabkan besarnya perubahan bentuk apabila diberi gaya seperti pada sampel dua dan tiga, hal ini dikuatkan oleh penelitian Signes et al., (2016), dimana disebutkan bahwa penggunaan karet bekas dapat meningkatkan deformasi permanen pada lapisan balas maupun sub-balas.

5. Kesimpulan

Penelitian ini merupakan pengamatan terhadap potensi karet ban bekas yang dapat dimanfaatkan untuk stabilisasi lapisan balas. Dari hasil penelitian yang dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Nilai modulus elastisitas pada balas tanpa modifikasi adalah 10,10 MPa, modifikasi balas dengan karet seragam memiliki nilai modulus elastisitas sebesar 5,74 MPa dan modifikasi dengan karet bergradasi menerus sebesar 2,70 MPa, ini menunjukkan bahwa penambahan karet pada campuran balas dapat mengurangi sifat kekakuan akibat material elastis yang ditambahkan. Penambahan karet dengan ukuran seragam memiliki kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan karet dengan gradasi menerus yang menyebabkan nilai modulus elastisitas yang lebih besar. Penurunan nilai modulus elastisitas pada sampel I sebesar 46,73%, sampel II 35,86% dan sampel III 40%.
- Balas dengan modifikasi memiliki nilai durabilitas yang tinggi dibandingkan dengan balas konvensional. Dengan nilai abrasi balas dan karet seragam sebesar 1,08%, balas dan karet bergradasi menerus sebesar 1% dan balas konvensional sebesar 3,24%. Balas karet dengan gradasi menerus memiliki nilai durabilitas yang lebih besar dibandingkan dengan balas karet dengan gradasi seragam karena pengaruh dari ukuran karet yang berbeda sehingga gesekan yang terjadi semakin kecil.
- Deformasi yang paling besar dialami oleh sampel III dan sampel II dimana balas mengalami modifikasi dengan penambahan karet ban bekas yang memiliki sifat elastis yang menyebabkan perubahan bentuk apabila diberikan gaya. Beban yang dapat ditahan oleh balas tanpa modifikasi lebih besar dibandingkan dengan yang dapat ditahan oleh balas dengan modifikasi penambahan karet ban bekas.
- Modifikasi balas dengan menambahkan karet atau material elastis dapat mengurangi kekakuan pada campuran balas dan menyebabkan modulus elastisitas menurun, serta meningkatkan

nilai deformasi vertikal. Namun, modifikasi dengan karet ini pun dapat meningkatkan durabilitas, mengurangi gesekan antar pertikel agregat dan dapat mengurangi kerusakan material yang digunakan.

6. Daftar Pustaka

- 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.
- D'Angelo, G., Thom, N., dan Presti, D. L. (2016). *Bitumen stabilized ballast: Apotential solution for railwaytrack-bed. Construction and Building Materials*, 124, 118-126.
- D'Angelo, G., Thom, N., dan Presti, D. L. (2017). *Optimisation of bitumen emulsion properties for ballast. Materiales De Construction*, 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 and Design*, 88, 897-905.
- Hameed, A. S., dan Shashikala, A. P. (2016). *Suitability od rubber concrete for railway sleepers. Perspectives in Science*, 8, 32-35.
- Indraratna, B., Ngo, N. T., dan Rujikiatkamjorn, C. (2017). *Improved Performance of Ballasted Rail Tracks using Plastics and Rubber Inclusions. Proceeding in Transportation Geotechnics and Geoecology*, Saint Petersburg, Rusia, 17-19 Mei 2017, 207-214.
- Indraratna, B., Nimbalkar, S., Navaratnarajah, S. K., Rujikiatkamjorn, C., dan Neville, T. (2014). Use of Shock Mats for Mitigating Degradation of Railroad Ballast. *Sri Lankan Geotechnical Journal - Special Issue on Ground Improvement*, 32-41.
- Navaratnarajah, S. K. dan Indraratna, B. (2017). Use of Rubber Mats to Improve the Deformation and Degradation Behavior of Rail Ballast Under Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(6), 1943-5606.
- Nimbalkar, S., Indraratna, B., Dash, S. K., dan Christie, D. (2012). *Improved Performance of Railway Ballast Under Impact Loads Using Shock Mats. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3), 281-294.
- Rosyidi, S. A.P. (2016). *Rekayasa Jalan Kereta Api*. Yogyakarta: LP3M-UMY 2015.
- Sanchez M. S., Navaro, F. M., dan Gomez, M. C. R. (2014). *The Use of Deconstructed Tires as Elastic Elements in Railway Tracks. Materials*, 7, 5903-5919.
- Sanchez, M.. S., Thom, N. H., Navaro, F. M., Gomez, 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.
- Sehonanda, O., Ointu, B. M., Tamboto, W. J., & Pandaleke, R. R. (2013). Kajian Uji Laboratorium Nilai Modulus Elastisitas Bata Merah Dalam Sumbangan Kekakuan Pada Struktur Sederhana. *Jurnal Sipil Statik*, 1(12)., 797-800.
- 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-VI 2016*. Surakarta, 25 Mei 2016, 36-46. ISSN: 2459-9727.
- Setiawan, D. M. dan Rosyidi, S. A. P. (2016). Track Quality Index As Track Quality Assessment Indicator. *Simposium XIX FSTPT*. Yogyakarta, 11-13 Oktober 2016.
- Setiawan, D. M., Muthohar, I. dan Ghataora, G. (2013). Conventional and Unconventional Railway for Rail Ways on Soft Ground in Indonesia (Case Study: Rantau Prapat-Duri Railways Development). *Proceeding of The 16th FSTPT International, Symposium*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 1-3 November 2013, 610-620.

- Signes, C., H., Hernandez, P. M., Roca, J. G., de la Torre, M. E., dan Franco, R. I. (2016). *An Evaluation of the Resilient Modulus and Permanent Deformation of Unbound Mixture of Granular Materials and Rubber Particles from Scrap Tyres to Be Used in Subballast Layers*. *Transportation Research Procedia*, 18, 384 – 3
- Soto, F. M., & Mino, G. D. (2018). Characterization of Rubberized Asphalt For Railways. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 7(2), 284-302.
- Woodward, P. K., El Kacimi, A., Laghrouche, O., Medero, G., dan Banimahd, M. (2012). Application of Polyurethane Geocomposites to Help Maintain Track Geometry for High Speed Ballasted Railway Tracks. *Journal of Zhejiang University Science A*, 13 (11), 836-849.
- Zakeri, J. A., dan Mosayebi, S. A. (2016). Study of ballast layer stiffness in railway tracks. *Gradevinar*, 68(4), 311-318.