

# Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas Pada Modifikasi Lapisan Balas Dengan Campuran Karet Bekas dan Aspal

*The Comparison of Elastic Modulus on Modification of Ballast Layer with Scrap Rubber and Asphalt Mixture*

**Egi Maulidyanto, Sri Atmaja P. Rosyidi, Dian Setiawan M**

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

**Abstrak.** Moda transportasi berbasis jalan rel di Indonesia saat ini mulai mengalami perkembangan yang cukup pesat. Namun, permasalahan pada umur pelayanan dan biaya pemeliharaan jalur rel konvensional menjadi isu penting infrastruktur jalan rel Indonesia. Oleh karena itu, penting melakukan inovasi teknologi dalam material campuran pada lapisan balas yang dapat meningkatkan durabilitas material balas dan mengoptimalkan kinerja struktur jalan rel. Pada penelitian ini, digunakan campuran karet ban bekas dan aspal dengan masing-masing presentase sebesar 10% dan 2% terhadap berat total benda uji. Adapun metode pengujian yang digunakan yaitu uji kekuatan tekan dengan 3 benda uji, yaitu balas, balas dengan karet bekas, dan balas dengan aspal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik deformasi vertikal, abrasi agregat, dan modulus elastisitas pada setiap benda uji. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa nilai deformasi vertikal terbesar (5 mm), dengan tegangan yang dicapai oleh benda uji 2 sebesar 96,72 kPa (balas modifikasi karet ban bekas). Selanjutnya nilai abrasi terkecil terdapat pada benda uji 2 (balas modifikasi karet ban bekas) sebesar 53,3 gr (1,06%). Sedangkan untuk nilai modulus elastisitas terbesar terdapat pada benda uji 1 (balas) sebesar 26,52 MPa.

Kata kunci: Abrasi agregat, balas, deformasi vertikal, modulus elastisitas, uji tekan.

**Abstract.** Current modes of railroad-based transportation in Indonesia are beginning to experience rapid development. However, problem related to the service life and maintenance costs for conventional rail track become important issues in the Indonesia's railroad infrastructure. Therefore, it is important to initiate an innovation in technology of the mixed material in ballast layers which can increase the ballast material durability and optimize the performance of railroad structures. In this study 10% scrap rubber from waste tires and 2% asphalt were utilised and the compressive strength test was conducted with 3 types of specimens, namely ballast (1), ballast with scrap rubber (2), and ballast with asphalt (3). The purpose of this study was to analyze the characteristics of vertical deformation, aggregate abrasion, and elastic modulus of each sample. The results obtained from this study indicate that at the largest vertical deformation value (5 mm), with the stress achieved by specimen 2 is 96,72 kPa (ballast with scrap rubber). Furthermore, the lowest ballast abrasion was found in specimen 2 (ballast with scrap rubber), 53.3 gr (1.06%). Also, the large modulus of elasticity is achieved by specimen 1 (ballast), 26.52 MPa.

Keywords: Aggregate abrasion, ballast, compressive test, elastic modulus, vertical deformation.

## 1. Pendahuluan

Lapisan balas adalah material penting yang terdapat pada struktur jalan rel, material tersebut berupa material granular bebas yang bertindak sebagai lapisan pembawa beban menuju lapisan dibawahnya hingga tanah dasar (Indraratna dkk., 2017). Material yang baik untuk digunakan sebagai material balas yaitu batuan yang memiliki bentuk bersudut, tidak mudah hancur, memiliki gradasi yang sama, bersih dan tidak pipih, namun pada kenyataannya material yang memiliki standar yang baik pada saat ini sukar ditemukan, oleh karena itu penelitian dan pengkajian perlu

dilakukan agar permasalahan pemilihan material dapat diatasi (Rosyidi, 2015).

Pengembangan jalan rel konvensional yang hampir mendekati *slab track* diharapkan dapat menurunkan biaya konstruksi dan dapat meningkatkan umur layanan dari jalan rel konvensional tersebut (Setiawan, 2013). Beragam penelitian telah dilakukan salah satunya yaitu dengan penambahan karet bekas dengan tujuan meningkatkan nilai elastisitas dari lapisan balas, sehingga dapat mengurangi degradasi pada lapisan balas (Sol-Sanchez dkk., 2015). Untuk meminimalkan kerusakan

jalur rel kereta api yaitu dengan penambahan karet di bawah lapisan balas (Navaratnarajah, 2017). Penggunaan elemen elastis berupa karet yang dicampurkan dengan agregat balas dapat memperkecil penurunan dan getaran pada jalan rel (D'Angelo dkk., 2016). Elemen elastis yang terdapat pada lapisan balas jalan rel memberikan elastisitas dalam arti vertikal, khususnya pada penampang melintang, dengan penambahan ban karet ini dapat juga mengurangi biaya produksi dan juga mengurangi limbah karet bekas yang berlimpah (Sol-Sanchez dkk., 2014).

Sedangkan material aspal sendiri terdiri dari senyawa hidrokarbon, nitrogen, dan logam lain sesuai jenis minyak bumi dan proses pengolahannya (Sukirman, 2003). Dalam penelitian D'Angelo dkk. (2016) penggunaan lapisan beraspal pada lapisan balas dapat meningkatkan performa, distribusi tegangan, menahan beban dinamik yang berlebihan dan meredam getaran. Namun dengan adanya pembebanan yang terjadi berulang-ulang dapat mengakibatkan lelehnya lapisan aspal (Asgharzadeh dkk., 2018). Untuk kadar optimum yang diperoleh dari pengujian yang dilakukan oleh D'Angelo dkk. (2016) adalah 2% - 3% dari berat benda uji.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji karakteristik dari penggunaan karet bekas dan aspal pada lapisan balas terhadap deformasi vertikal, abrasi agregat, dan modulus elastisitas pada setiap benda uji.

## 2. Metode Penelitian

### Bahan

#### Balas

Lapisan balas adalah lapisan yang berada di atas tanah dasar. Lapisan ini terletak di daerah yang mengalami konsentrasi tegangan yang sangat besar yang diakibatkan oleh beban lalu lintas kereta api yang berjalan di atasnya, maka dari itu lapisan ini harus menggunakan material yang terpilih dan memenuhi persyaratan (Rosyidi, 2015). Material yang digunakan untuk lapisan balas harus memenuhi kriteria yang mampu menahan getaran, memiliki ketahanan

terhadap gaya dinamis, memiliki elastisitas guna meningkatkan stabilitas struktur dan memiliki kemudahan dalam pemeliharannya (Zakeri dan Mosayebi, 2016). Balas yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Clereng, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta yang sebelumnya dilakukan pembersihan terlebih dahulu dan dioven selama 24 jam, hingga benar-benar kering. Balas yang siap digunakan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Balas

Adapun hasil pengujian sifat fisis yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Uji Fisik Material Balas

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Berat Jenis (BJ) :		
	a. BJ Bulk	2,63	-
	b. BJ SSD	2,65	-
	c. BJ Semu	2,69	-
2	Penyerapan air	0,8	%
3	Kadar Lumpur	2,2	%
4	Keausan	17,3	%

### Karet Bekas

Karet bekas yang digunakan pada yaitu karet bekas ban kendaraan bermotor yang dipotong menjadi beberapa ukuran, yaitu 1", ¾", ½", ⅜", dan No. 4 seperti pada Gambar 2. Penggunaan karet pada campuran balas diharapkan meningkatkan elastisitas dari lapisan balas.



Gambar 2 Karet bekas

## Aspal

Dalam penelitian ini menggunakan tipe aspal penetrasi 60/70 dalam bentuk aspal padat yang akan dicairkan seperti Gambar 3. Dengan presentase 2% bertujuan untuk mengisi rongga yang ada dan mengikat antara material balas.



Gambar 3 Aspal

Adapun hasil pengujian sifat fisik aspal penetrasi 60/70 ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Uji Fisik Aspal

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Penetrasi Aspal	63,4	0,1 mm
2	Titik Lembek	48,5	°C
3	Berat Jenis	1,043	-
4	Daktilitas	147	cm
5	Kehilangan Minyak	0,39	%

### 3. Prosedur Pengujian

#### *Pembuatan Benda Uji*

Desain campuran pada penelitian ini menggunakan 3 benda uji yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Desain Campuran

No.	Benda Uji
1.	Balas
2.	Balas + 10% Karet Bekas
3.	Balas + 2% Aspal

Adapun tahapan pembuatan benda uji adalah sebagai berikut:

- Material balas dibersihkan terlebih dahulu setelah kering diambil  $\pm 5000$  gram untuk diuji durabilitasnya. Sampel ini diletakkan pada lapisan paling atas pada benda uji. Mempersiapkan karet bekas yang sudah dipotong-potong sesuai dengan kebutuhan dan mempersiapkan aspal dengan cara dioven hingga mencair.
- Selanjutnya balas dan karet atau aspal dimasukkan ke dalam box secara merata. Kemudian dilakukan penumbukan secara manual sebanyak 25 kali pada setiap lapisan seperti pada Gambar 4, proses ini dilakukan terus menerus hingga mencapai 3 lapisan. Proses ini juga berlaku untuk benda uji lainnya seperti balas, balas + karet bergradasi menerus, dan balas + aspal, perbedaannya terdapat pada material yang dicampurkan yang disesuaikan dengan desain yang sudah direncanakan.



Gambar 4 Pembuatan Benda Uji

- Setelah box terpenuhi dan selesai penumbukan selanjutnya benda uji ditimbang terlebih dahulu seperti Gambar 5 di bawah, sebelum dilakukan uji kuat tekan.



Gambar 5 Penimbangan Benda Uji

## Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan menggunakan alat uji tekan *Universal Testing Mechine* merk Hung Ta 9501 sebagai alat uji tekan dengan kekuatan tekan maksimalnya mencapai 45 kPa.

Adapun tahapan-tahapan yang ada pada pengujian kuat tekan adalah sebagai berikut:

- Sebelum dilakukannya pengujian, benda uji ditimbang terlebih dahulu.
- Selanjutnya pada dasar alat uji diberi pelat besi setebal 3 cm dengan dimensi  $30 \times 30$  cm. pada bagian penekan diberikan pelat besi dengan tebal 2 cm berdimensi  $30 \times 15$  cm seperti pada Gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6 Pelat Besi

- Benda uji diletakkan secara sentris agar saat dilakukan pengujian, tekanan yang diberikan dapat diterima secara merata oleh benda uji seperti pada Gambar 7.



Gambar 7 Benda Uji Siap Diuji

- Selanjutnya data dimensi dan luas penampang dari benda uji dimasukkan ke sistem operasi pada alat uji tekan.

- Setelah itu pengujian dapat dilakukan dengan beban 2000 kg atau dengan beban maksimal yang mampu diterima oleh benda uji seperti pada Gambar 8.



Gambar 8 Benda Uji Saat Diuji

- Benda uji yang sudah selesai dilakukan pengujian tekan selanjutnya dilakukan



pengujian durabilitas material dengan hasil seperti pada Gambar 9.

Gambar 9 Hasil Abrasi Benda Uji

## Analisis data

Parameter yang dikaji dalam penelitian ini adalah nilai modulus elastisitas ( $E$ ) yang didapatkan dari hasil pengujian tekan yang dilakukan pada benda uji, dengan menggunakan analisis dari hasil tegangan ( $\sigma$ ) dan regangan ( $\varepsilon$ ) yang terjadi selama pengujian tekan. Nilai modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan 1.

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

Dimana :  $E$  : Modulus Elastisitas (MPa)

$\sigma$  : Tegangan (kPa)

$\varepsilon$  : Regangan (%)

Adapun parameter lain yang dikaji dalam penelitian ini yaitu abrasi material balas yang dihasilkan setelah dilakukan pengujian tekan, dengan membandingkan jumlah material balas yang pecah/hancur sebelum pengujian dengan sesudah pengujian dan nilai deformasi vertikal yang diperoleh melalui grafik hubungan antara pembebanan dan penurunan yang terjadi selama pengujian.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### *Karakteristik Campuran*

Setiap sampel mempunyai karakteristik campuran yang berbeda, dikarenakan bahan yang digunakan sebagai campuran pada tiap benda uji juga berbeda. Nilai karakteristik campuran dirangkum pada Tabel 4.

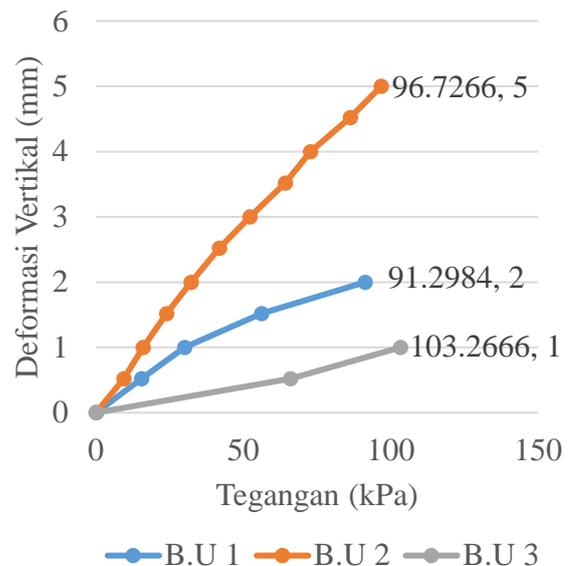
No	Parameter	B.U 1	B.U 2	B.U 3
1	Berat Vol (gr/cm <sup>3</sup> )	1,7	1,7	1,5
2	Vol. Karet (%)	-	14,5	-
3	Vol. Aspal (%)	-	-	3,71
4	Vol. Balas (%)	62,4	56,1	56,1
5	Vol. Pori (%)	37,6	29,3	40,2

##### *Deformasi Vertikal*

Deformasi adalah perubahan bentuk dari segi ukuran suatu benda uji setelah mengalami pemberian beban atau pengujian. Hasil dari tegangan untuk masing-masing benda uji pada nilai penurunan tersaji pada Tabel 5. Sedangkan grafik hubungan antara tegangan dan deformasi disajikan pada Gambar 10.

Tabel 5 Nilai Tegangan Dan Deformasi Pada Benda Uji

Benda Uji	Beban (kPa)	Deformasi (mm)
B.U 1	431,84	5
B.U 2	96,73	5
B.U 3	307,38	5



Gambar 10 Grafik Hubungan Antara Tegangan Dan Deformasi

Dari Gambar 10 menunjukkan bahwa pada benda uji 2 mengalami deformasi paling besar, sebesar 5 mm pada tegangan 96,7 kPa. Sedangkan untuk tegangan terbesar 103,2 kPa yang diberikan hingga mengalami deformasi sebesar 1 mm terjadi pada benda uji 3. Kemudian untuk benda uji 1 mengalami deformasi sebesar 2 mm pada tegangan 91,2 kPa. Material karet bekas memberikan sifat elastis pada campuran, sekaligus membuktikan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sol-Sanchez dkk., (2014), bahwa penambahan material karet dalam prosentase tertentu dapat meningkatkan sifat elastis dari lapisan balas.

##### *Modulus Elastisitas*

Kekakuan dari setiap bahan dapat diketahui dengan mencari nilai modulus elastisitasnya. Pada penelitian ini modulus elastisitas didapatkan setelah pengujian tekan selesai dan diolah menjadi grafik hubungan antara tegangan dan regangan, adapun nilai modulus elastisitas tersebut disajikan pada Tabel 5.

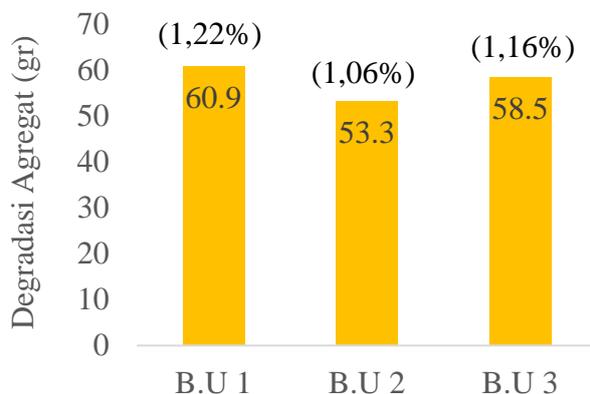
Tabel 5 Nilai Modulus Elastisitas

Benda Uji	Tegangan (kPa)	Regangan (%)	E (MPa)
B.U 1	607,27	2,29	26,52
B.U 2	557,90	6,32	8,73
B.U 3	561,10	2,93	19,13

Pada benda uji 2 berupa balas dan karet bergradasi, hasilnya menunjukkan bahwa nilai tegangan dan regangan lebih kecil jika dibandingkan dengan benda uji 1 berupa material balas tanpa ada campuran ataupun benda uji 3 berupa balas dan aspal. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi campuran material menjadi elastis, dikarenakan penambahan material karet bekas yang mengakibatkan campuran benda uji menjadi elastis. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sol-Sanchez dkk. (2014), meskipun dalam penelitiannya karet yang digunakan adalah remahan karet, tidak seperti penelitian ini yang menggunakan karet bekas berupa karet bergradasi menerus pada benda uji 2.

### ***Abrasi Material Balas***

Penambahan karet bekas dan aspal pada campuran balas yang dilakukan pada penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan ketahanan dari material balas. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi ketahanan agregat pada penelitian kali ini yaitu dengan dilakukannya penumbukan sebanyak 25 kali per *layer* dan pengujian tekan pada setiap benda uji. Benda uji yang telah selesai diuji kemudian dianalisis saringan untuk mengetahui nilai sebaran abrasi dari material balas yang pecah/hancur lolos saringan 1/2", 3/8", dan No. 4 dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Grafik Sebaran Abrasi

Pada benda uji 1 berupa agregat tanpa campuran apapun menunjukkan angka abrasi material yang paling tinggi yang disebabkan oleh adanya gesekan atau benturan pada

agregat yang pada saat mengalami tekanan yang mengakibatkan abrasi pada agregat. Berbeda halnya dengan benda uji 2 dan 3 dimana benda uji 2 mengalami abrasi agregat paling kecil disebabkan oleh adanya karet bergradasi menerus yang mampu mengisi rongga-rongga dengan lebih baik dibandingkan dengan benda uji 3 berupa aspal sebagai campurannya sehingga tidak terlalu baik untuk menahan gesekan atau benturan antar agregat pada saat pengujian berlangsung tetapi sedikit lebih baik dibandingkan dengan benda uji 1 dimana agregat mengalami benturan atau gesekan secara langsung.

## **5. Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Secara umum, penambahan material elastis berupa karet bekas ataupun material pengikat berupa aspal dapat menghasilkan nilai deformasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran balas saja. Pada penurunan yang sama yaitu 5 mm, penambahan material elastis berupa karet bekas meningkatkan nilai deformasi dari lapisan balas. Nilai deformasi vertikal tertinggi terdapat pada campuran material balas dan karet bergradasi (B.U 2) dengan nilai deformasi pada penurunan 5 mm dengan tegangan sebesar 96,73 kPa, dan benda uji dengan campuran material balas dan aspal (B.U 3) dengan nilai deformasi pada penurunan 1 mm dengan beban sebesar 103,26 kPa, kemudian campuran balas saja (B.U 1) dengan nilai deformasi pada penurunan 2 mm dengan beban sebesar 91,29 kPa.
- b. Terdapat pengaruh penambahan karet bekas dan aspal terhadap nilai modulus elastisitas pada masing-masing benda uji. Nilai modulus elastisitas tertinggi terdapat pada benda uji 1 berupa material balas saja dengan nilai modulus elastisitas mencapai 26,52 MPa, kemudian benda uji 3 berupa campuran material balas dan aspal dengan nilai modulus elastisitas mencapai 19,13 MPa, dan nilai modulus elastisitas terendah didapat pada campuran material balas dan karet bekas bergradasi dengan

nilai modulus elastisitas mencapai 8,73 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan pada benda uji 1 lebih baik dari pada benda uji 2 maupun benda uji 3. Semakin banyak penambahan material elastis pada campuran maka akan mengurangi nilai modulus kekakuan.

- c. Penggunaan material elastis berupa karet bekas dan aspal dapat menurunkan nilai abrasi. hal ini disebabkan karena adanya pengisian pori oleh karet bekas ataupun aspal pada campuran tersebut sehingga agregat tidak saling berbenturan atau bergesekan secara langsung. Dalam penelitian ini nilai abrasi dari masing-masing benda uji yaitu benda uji 1 sebesar 60,9 gr (1,22 %), benda uji 2 sebesar 53,3 gr (1,06 %), dan benda uji 3 sebesar 58,5 gr (1,16 %). Dari data abrasi tersebut maka benda uji 2 berupa campuran balas dan karet bekas bergradasi adalah campuran yang paling baik untuk mengurangi nilai dari abrasi butiran agregat.

## 6. Daftar Pustaka

- Asgharzadeh, S.M., Sadeghi, J., Peivast, P., dan Pedram, M., 2018, Fatigue Properties of Crum Rubber Asphalt Mixtures Used in Railways, *Construction and Building Materials*, 184, 248-257.
- Batayneh, M.K., Asi, I., and Marie, I., 2008, Promoting the Use of Crumb Rubber Concrete In Developing Countries, *Waste Management*, 28, 2171-2176.
- Bina Marga, 2010, *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan (revisi III)*, Direktorat Jendral Bina Marga Kementrian Pekerjaan Umum, Jakarta.
- BSN, 1991a, SNI 06-2440-1991: *Metode Pengujian Kehilangan Minyak dan Aspal*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1991b, SNI 06-2432-1991: *Metode Pengujian Daktilitas Bahan-Bahan Aspal*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1996, SK SNI 03-4141-1996: *Metode Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir Mudah Pecah Dalam Agregat*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2008a, SK SNI 1969-2008: *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2008b, SK SNI 2417-2008: *Cara Uji Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011a, SNI 2441-2011: *Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011b, SNI 2456-2011: *Cara Uji Penetrasi Aspal*. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011c, SNI 2434-2011: *Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*, Badan Standarisasi 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., 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 Stabilisation, *Materiales De Construcción*, 67, 124-133.
- 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.
- Karim, S., 2007, Analisis Pengaruh Kewirausahaan Korporasi terhadap Kinerja Perusahaan pada Pabrik

- Pengolahan Crumb Rubber di Palembang. *Manajemen & Bisnis Sriwijaya*, 5, 42-78.
- 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), 1-15.
- Peraturan Dinas Nomor 10 Tahun 1986 tentang Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel, Perusahaan Jawatan Kereta Api, Bandung.
- Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, Departemen Perhubungan, Jakarta.
- Rosyidi, S.A.P., 2015, *Rekayasa Jalan Kereta Api*, Lembaga Penelitian, Publikasi dan Pengabdian Masyarakat (LP3M), Yogyakarta.
- Sanchez, M.S., Navarro, F.M., dan Gamez, 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., Navarro, F.M., Gamez, 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.
- Satyarno, I., 2006, Penggunaan Serutan Karet Ban Bekas untuk Campuran Beton. *Media Teknik*, 4, 45-51.
- Setiawan, D.M., Muthohar, I., Ghataora, G.S., 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 Indonesian Inter University Transportation Studies Forum (FSTPI)*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, Indonesia, 1-3 November 2013, 610-620.
- Setiawan, D.M., Rosyidi, S.A.P., 2016, Track Quality Index as Track Quality Assessment Indicator, *Simposium XIX FSTPT*, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia, 11-13 Oktober 2016, 1-10.
- Signes, C.H., Hernandez, P.M., Roca, J.G., Torre, M.E., 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 Subballast Layers, *Transportation Research Procedia*, 18, 384-391.
- Sukirman, S., 2003, *Perkerasan Jalan Raya*, NOVA, Bandung.
- Zakeri, J.A., dan Mosayebi, S.A., 2016, Study of Ballast Layer Stiffness in Railway Tracks, *Gradevinar*, 4, 311-318.