

Pengaruh Aspal Terhadap Nilai Modulus Elastisitas dan Abrasi Lapisan Balas

The Effect of Asphalt on The Elastic Modulus and Abrasion of Ballast Layer

Ahmad Fauzan Amiq, Sri Atmaja P. Rosyidi, Dian Setiawan M.

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Struktur jalan rel merupakan prasarana utama dalam industri perkeretaapian. Oleh karena itu, perlu dijaga keamanan dan kenyamanannya untuk mengurangi risiko kecelakaan kereta api. Struktur jalan rel di Indonesia sebagian besar masih menggunakan jalur yang konvensional, dimana jalur konvensional tersebut memiliki umur pelayanan yang pendek dari lapisan balas dan berdampak pada tingginya biaya pemeliharaan jalur kereta api. Berdasarkan masalah tersebut, perlu adanya upaya untuk meningkatkan kualitas struktur jalan rel, sehingga dapat mengoptimalkan umur pelayanan jalur rel kereta api tersebut. Pada penelitian ini pemanfaatan karet ban bekas dan aspal yang digunakan untuk campuran modifikasi balas pada struktur jalan rel dan diharapkan dapat memperbaiki permasalahan pada balas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik campuran melalui nilai deformasi vertikal, abrasi agregat, dan modulus elastisitas. Pada penelitian ini, digunakan aspal sebanyak 2% dan karet ban bekas sebanyak 10% dari berat total benda uji. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji tekan, dan terdapat tiga sampel benda uji. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa ketahanan terhadap deformasi vertikal terkecil terdapat pada sampel balas (sampel I) sebesar 5 mm dengan beban 377,48 kPa. Kemudian nilai abrasi terkecil terdapat pada balas modifikasi karet ban bekas dan aspal (sampel III) yaitu 16 gr (0,30%). Selanjutnya untuk nilai modulus elastisitas terbesar terdapat pada balas (sampel I) yaitu 23,72 MPa.

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

Abstract. The rail track structure is the primary infrastructure in the railways' industry. Therefore, its security and comfort need to be maintained to reduce the risk of train accidents. Rail track structures in Indonesia are mostly using conventional rail track type, which has a short service life of ballast layer and has high maintenance costs. Based on these problems, there needs to be an effort to improve the quality of the rail track structure, so that it can optimize the service life. In this study, the scrap rubber and asphalt was used for modification of ballast layer on the rail track structure and expected to fix problems on ballast. The purpose of this study is to analyze the characteristic of the ballast mixture through the value of vertical deformation, aggregate abrasion, and elastic modulus. This research used 2% bitumen and 10% scrap rubber from the total weight of the sample. The method used in this research was the compressive test with three (3) sample. The results of the study showed that the smallest vertical deformation value occurred on ballast unmodified (sample I) by 5 mm at the load of 377,48 kPa. Besides, the smallest value of abrasion occurred on ballast modified by bitumen and scrap rubber (sample III) by 16 grams (0,30%). Furthermore, the most significant elastic modulus value occurred on ballast unmodified (sample I) by 23,72 MPa.

Keywords: Abrasion aggregate, ballast, compressive test, elastic modulus, vertical deformation.

1. Pendahuluan

Kereta api merupakan salah satu alat transportasi darat antar kota yang diminati oleh seluruh lapisan masyarakat. Transportasi kereta api di Indonesia diselenggarakan suatu Badan Usaha Milik Negara bernama PT. Kereta Api Indonesia atau PT. KAI (Persero) dibawah naungan Kementerian Perhubungan.

Struktur jalan rel yang digunakan saat ini masih menggunakan struktur rel konvensional yang masih memiliki kelemahan diantaranya umur layanan yang tidak bertahan lama dalam jangka waktu yang panjang, dan diperlukan perawatan serta membutuhkan biaya yang relatif besar. Pengembangan struktur jalan rel konvensional dengan menggunakan bahan

material karet ban bekas dan aspal ini diharapkan dapat meningkatkan kualitas struktur balas. Setiawan *et al.* (2013) menyatakan bahwa kualitas struktur jalan rel yang hampir mendekati teknologi *slab track*, diharapkan dapat menurunkan biaya konstruksi dan dapat meningkatkan umur layanan dari jalan rel konvensional tersebut. Penelitian yang dilakukan oleh Giunta *et al.* (2018) ialah dengan penambahan material lain yang bersifat mengikat pada struktur balas dapat meningkatkan umur layanan dan mengurangi biaya perawatan.

Aspal merupakan bahan hidro-karbon yang bersifat melekat dan dimanfaatkan sebagai lapis permukaan perkerasan lentur. Penggunaan bahan bitumen juga dapat digunakan sebagai modifikasi lapisan balas. Penelitian yang dilakukan oleh D'Angelo *et al.* (2016) ialah dengan aplikasi penggunaan lapisan beraspal (*bituminous*) pada bagian sub-struktur untuk meningkatkan performa, distribusi tegangan, menahan beban dinamik yang berlebihan serta meredam getaran. D'Angelo *et al.* (2016) penggunaan bahan bitumen sebagai campuran balas sebanyak 2-3% ini diuji dengan menggunakan beban dinamik untuk mengetahui karakteristik campuran balas.

Sanchez *et al.* (2015), memodifikasi struktur jalan rel dengan menggunakan karet ban bekas sehingga meningkatkan umur pelayanan jalan rel, upaya tersebut merupakan salah satu solusi untuk mengurangi pemakaian dari agregat alam yang juga berfungsi sebagai peningkatan durabilitas dari struktur jalan rel. Menurut Indraratna *et al.* (2017), dengan penggunaan geosintetik dan karet daur ulang yang ditempatkan pada antarmuka balas dan subbalas telah terbukti dan efektif dapat mengurangi degradasi dan meningkatkan umur pemakaian trek kereta api. Penelitian pencampuran antara bahan bitumen dan bahan karet dari Hyeok *et al.* (2014) dan D'Andrea *et al.* (2012) menyimpulkan bahwa campuran tersebut dapat mengurangi degradasi dan dapat meredam getaran akibat beban lalu lintas kereta api. Menurut Asgharzadeh *et al.* (2018), penggunaan campuran aspal dan karet memiliki peran positif terhadap daya dukung, stabilitas, dan meningkatkan peredaman getaran pada struktur jalan rel. Namun adanya

pembebanan yang berulang-ulang mengakibatkan lelehnya lapisan aspal. Dengan demikian penggunaan aspal dan karet ban bekas untuk modifikasi balas dalam penelitian ini dapat dijadikan solusi untuk meningkatkan umur layanan dari lapisan balas, dan mengurangi pengeluaran biaya untuk pemeliharaan berkala dari struktur jalan rel di Indonesia.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik dari masing-masing sampel benda uji berupa balas nonmodifikasi dan balas modifikasi melalui uji kuat tekan. Parameter yang dihasilkan dari pengujian ini adalah nilai deformasi vertikal, abrasi dan nilai modulus elastisitas lapisan balas.

2. Metode Penelitian

Bahan

Material Balas

Agregat kasar ini diperoleh dari perusahaan distributor batu pecah yang berada di Kecamatan Clereng, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Jenis batuan yang digunakan yaitu batuan andesit dengan ukuran butiran dari balas yang digunakan adalah 2" - $\frac{3}{4}$ " berdasarkan persyaratan gradasi untuk material balas dari PD No.10 tahun 1996, material ini termasuk dalam kelas jalan III. Berikut bentuk agregat kasar yang digunakan tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Agregat kasar

Aspal

Dalam penelitian ini menggunakan tipe aspal penetrasi 60/70 dalam bentuk aspal padat yang akan dicairkan dalam oven selama 4 jam, dipanaskan hingga mencapai suhu 155 C.

Aspal yang digunakan untuk campuran balas ini sebesar 2% ini mengacu pada penelitian yang dilakukan D'Angelo *et al.* (2016) yaitu sebesar 2-3%, penambahan aspal dengan persentase 2-3% ini dimaksudkan sebagai

bahan pengikat dan pengisi antar material balas. Penggunaan aspal juga dapat mengurangi degradasi dari struktur balas seperti yang dijelaskan oleh D'Angelo *et al.* (2017) dan Mino *et al.* (2012).

Aspal yang digunakan tersaji pada Gambar 2.



Gambar 2. Aspal

Karet Ban Bekas

Penelitian ini juga memanfaatkan karet ban bekas, karet ban bekas tersebut difungsikan sebagai material elastik pada campuran material balas. Navaratnarajah dan Indraratna (2017) menyatakan bahwa penambahan karet untuk meminimalkan kerusakan jalur rel kereta api yaitu dengan penambahan karet dibawah lapisan balas. Penelitian juga dilakukan oleh Hameed dan Shashikala (2016) yang menyatakan bahwa penambahan karet juga dapat mengurangi kerusakan pada bantalan sebesar 80-100% akibat distribusi beban yang besar dari rel. Ukuran karet ban bekas di modifikasi menjadi ukuran butiran antara 1"- No.4. Material elastik ini diperoleh dari bengkel-bengkel kendaraan bermotor yang berlokasi di Kecamatan Kasihan, Kabupaten Bantul, DIY dan diambil bagian luarnya (ban luar kendaraan bermotor). Dalam penelitian ini penggunaan karet sebagai bahan elastik ini adalah sebesar 10% berdasarkan penelitian-penelitian internasional terdahulu. Berikut karet ban bekas yang digunakan tersaji pada Gambar 3.



Gambar 3. Karet ban bekas

3. Prosedur Pengujian

Pembuatan dan Pencampuran Benda Uji

Pembuatan benda uji ini menggunakan balas yang sudah diletakkan dalam *ballast box* dengan ukuran box 40 cm × 20 cm × 30 cm. Pencampuran benda uji ini dilakukan secara manual dengan persentase material yang sebelumnya telah ditentukan. Terdapat tiga sampel benda uji yang masing masing sampel mempunyai material campur yang berbeda. Dengan menggunakan agregat kasar sebagai bahan utamanya dan aspal penetrasi 60/70 serta karet ban bekas sebagai bahan campuran dari modifikasi lapisan balas. Berikut komposisi sampel benda uji disajikan pada Tabel 1.

No	Nama Sampel	Campuran
1	Sampel I	Balas
2	Sampel II	Balas + Aspal (2%)
3	Sampel III	Balas + Aspal (2%) + Karet (10%)

Sampel I

Agregat kasar dituangkan dalam *ballast box* sebanyak 1/3 bagian, selanjutnya ditumbuk dengan alat penumbuk manual sebanyak 25 kali tumbukan. Begitu seterusnya hingga 3/3 bagian dari *ballast box* terisi penuh.

Sampel II

Seperti pada langkah-langkah pembuatan sampel I, setelah agregat tersebut dipadatkan 1/3 bagian dari *ballast box* lalu dituangkan aspal diatas agregat tersebut hingga merata. Begitu seterusnya sehingga 3/3 bagian dari *ballast box* tersebut terisi penuh oleh agregat dan aspal sebagai bahan campuran.

Sampel III

Seperti pembuatan sampel II, pembuatan sampel III ini ditambahkan campuran tambah yaitu aspal dan karet ban bekas. Setelah agregat tersebut dipadatkan 1/3 bagian dari *ballast box* lalu ditambahkan aspal dan karet ban bekas. Begitu seterusnya sehingga 3/3 bagian dari *ballast box* terisi penuh oleh agregat, aspal dan karet ban bekas.

Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan adalah kekuatan yang dihasilkan oleh mesin kuat tekan dan berupa besarnya gaya yang diterima oleh suatu bahan per satuan luas. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan alat Micro-Computer *Universal Testing Machine* (UTM), dengan luas plat beban berukuran 30 cm × 15 cm. Benda uji yang akan diuji akan ditimbang terlebih dahulu untuk selanjutnya diletakkan pada alat uji kuat tekan. Pembebanan akan dihentikan apabila benda tersebut telah diberi beban sesuai yang telah direncanakan. Kondisi sampel benda uji berada di dalam *ballast box* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian kuat tekan

Hasil dari pengujian kuat tekan ini berupa data tegangan dan regangan, hasil tersebut berbeda-beda pada setiap sampel, data tegangan dan regangan pada setiap sampel dibandingkan dalam bentuk kurva hubungan tegangan dan regangan. Nilai modulus elastisitas (E) didapatkan dari nilai tegangan leleh dan regangan leleh melalui pendekatan dengan metode *trendline*. Nilai modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan 1.

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

Dengan σ adalah tegangan leleh dan ϵ adalah regangan leleh.

Pemeriksaan Deformasi Vertikal

Deformasi vertikal adalah perubahan bentuk akibat gaya yang terjadi pada skala satu dimensi. Dari definisi tersebut, dapat dimaksudkan sebagai perubahan tinggi suatu sampel benda uji setelah diberikan pembebanan. Pemeriksaan deformasi vertikal ini diperoleh berdasarkan angka penurunan benda uji yang terjadi akibat proses pembebanan vertikal yang diterima benda uji.

Pengujian Abrasi Agregat

Untuk mengetahui nilai abrasi material agregat pada campuran adalah berdasarkan keausan yang terjadi setelah proses uji kuat tekan dan dilanjutkan dengan melakukan perbandingan jumlah material agregat yang hancur setelah uji kuat tekan selesai dilakukan. Dengan mengambil agregat kasar sebesar 5000 gram pada masing-masing benda uji dari berat total campuran sebelum dan sesudah uji kuat tekan untuk dibandingkan.

Sampel yang telah dibandingkan dengan menggunakan analisis saringan dengan ukuran 2" – No.4, kemudain digambarkan dengan grafik persentase ukuran butir agregat. Perhitungan abrasi material agregat dihitung dari material yang memiliki ukuran butir agregat yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ " dari balas yang digunakan saat dilakukan uji tekan.

4. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Campuran Benda Uji

Identifikasi karakteristik pada campuran dilakukan untuk mengetahui setiap volume bahan serta volume pori yang mengisi sebuah *ballast box*. Setiap sampel uji memiliki karakteristik yang berbeda-beda, hal tersebut terjadi karena setiap sampel memiliki bahan material tambah yang berbeda-beda. Dari ketiga sampel benda uji memiliki karakteristik campuran yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik campuran pada setiap sampel benda uji

No	Parameter	S.I	S.II	S.III
1	Berat Vol (gr/cm^3)	1,40	1,54	1,47
2	Vol. Aspal (%)	-	2	2
3	Vol. Karet (%)	-	-	10
4	Vol. Balas (%)	100	98	88
5	Vol. Pori (%)	47,75	40,21	36,30

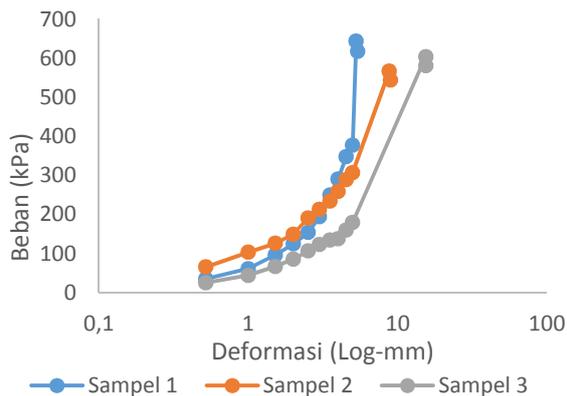
Deformasi Vertikal

Setiap sampel benda uji memiliki angka penurunan yang berbeda-beda, angka penurunan yang berbeda tersebut bergantung pada jenis benda uji yang diberikan pembebanan melalui uji tekan. Hasil dari perbandingan antara pembebanan dan angka

penurunan benda uji tersaji pada Tabel 3 Dan Gambar 5 sebagai berikut.

Tabel 3. Nilai deformasi benda uji

Sampel	Beban (kPa)	Penurunan (mm)
Sampel I	377,48	5,00
Sampel II	307,38	5,00
Sampel III	179,33	5,00

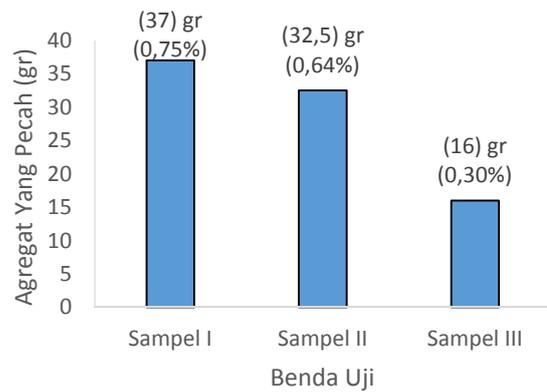


Gambar 5. Grafik tegangan dan deformasi vertikal

Dari grafik hasil pengujian kuat tekan diatas menunjukkan nilai deformasi yang berbeda-beda pada penurunan yang sama sebesar 5 mm. Pada sampel I menghasilkan nilai tegangan sebesar 377,48 kPa, sampel II sebesar 307,48 kPa, dan sampel III 179,33 kPa. Nilai tersebut dipengaruhi karena adanya material tambah pada masing-masing sampel benda uji berupa aspal yang memiliki fungsi untuk mengurangi sifat elastis yang mempengaruhi campuran balas dan karet yang mempunyai sifat dapat menurunkan tingkat kekakuan dari balas.

Abrasi Material Agregat

Abrasi agregat pada balas terjadi akibat beban yang diterima melalui pengujian kuat tekan dan mengakibatkan kerusakan material seperti pecahnya agregat atau mengalami pengikisan (aus), sehingga kualitas dari agregat tersebut menurun. Sampel benda uji yang telah melalui proses uji tekan menghasilkan variasi tingkat abrasi material agregat yang berbeda-beda seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6 sebagai berikut.



Gambar 6. Degradasi material agregat

Seperti yang ditunjukkan pada diagram degradasi material agregat pada Gambar 6, setiap sampel menghasilkan variasi tingkat abrasi yang berbeda. Penambahan karet dan aspal pada sampel III mendapatkan nilai abrasi terkecil yaitu dengan hasil 16 gram, itu terjadi karena adanya penambahan karet dengan persentase 10% yang akan menurunkan nilai degradasi dari balas, seperti penelitian yang dilakukan Farhan *et al.* (2015), kelebihan penambahan *crumb rubber* dapat meningkatkan durabilitas. Sampel II mendapatkan nilai abrasi sebesar 32,5 gram nilai tersebut nilainya lebih kecil daripada sampel I, dikarenakan penambahan aspal sebanyak 2%. Dengan hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan aspal dan karet akan mengurangi nilai abrasi (keausan) agregat dari lapisan balas.

Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah angka yang digunakan untuk mengukur objek atau ketahanan bahan untuk mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada benda itu. Ointu *et al.* (2013) menyatakan bahwa modulus elastisitas merupakan besaran yang menggambarkan tingkat elastisitas suatu bahan dan dihasilkan antara dua hubungan tegangan dan regangan. Modulus elastisitas diperoleh berdasarkan data pengujian yang diolah dalam bentuk kurva tegangan dan regangan dengan menggunakan pendekatan metode *trendline*. Nilai modulus elastisitas yang diperoleh menghasilkan nilai yang berbeda-beda, hal tersebut disebabkan karena sifat bahan yang terdapat pada setiap sampel benda uji juga berbeda tingkat keelastisannya. Berikut hasil nilai modulus elastisitas dari ketiga sampel

benda uji ditunjukkan pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Nilai modulus elastisitas benda uji

Benda Uji	Tegangan (kPa)	Regangan (%)	E (MPa)
Sampel I	610,24	2,57	23,72
Sampel II	556,17	2,93	18,96
Sampel III	594,77	5,15	11,55

Hasil nilai modulus elastisitas pada Tabel 4 menunjukkan bahwa penambahan aspal sebanyak 2% dan karet sebanyak 10% pada campuran balas dapat mengakibatkan kekakuan pada material menurun dengan hasil 11,55 MPa yang terdapat pada sampel III. Nilai yang didapat sampel III cenderung kecil karena terdapat bahan tambah karet, seperti penelitian yang dilakukan Sanchez *et al.* (2015) dan Signes *et al.* (2016), yang menyatakan bahwa karet yang terdapat pada agregat dapat meningkatkan deformasi dan menurunkan kekakuan. Untuk sampel II cenderung mengalami peningkatan dibandingkan sampel III dengan nilai modulus elastisitas yang didapatkan sebesar 18,96 MPa karena penambahan aspal sebanyak 2%, hal tersebut juga membuktikan penelitian yang dilakukan oleh Soto dan Mino (2017), yang menyatakan jika aspal bercampur dengan agregat maka aspal akan menjadikan agregat tersebut lebih terikat satu dengan yang lainnya. Nilai modulus elastisitas dengan balas tanpa campuran menghasilkan nilai yang paling besar yaitu 23,72 Mpa. Sehingga modifikasi balas dengan penambahan aspal dan karet dapat menurunkan kekakuan dari lapisan balas.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan pada penelitian ini, diperoleh hasil bahwa:

1. Karena adanya penambahan aspal 2%, karet ban bekas 10% dan kemampuan agregat kasar pada sampel III, menjadikan sampel uji tersebut memiliki volume pori paling kecil yaitu dengan nilai 36,30%.
2. Pada angka penurunan yang sama, menjadikan sampel III memiliki nilai

deformasi vertikal yang paling besar yaitu dengan nilai penurunan 5 mm dan beban yang diterima yaitu 179,33 kPa. Hal tersebut terjadi karena adanya penambahan material karet bekas yang sifatnya elastis yang ada pada campuran balas. Berbeda dengan penambahan aspal pada campuran balas (sampel II) memberikan sifat yang lebih kaku sehingga menghasilkan nilai deformasi vertikal dengan nilai penurunan 5 mm dan beban yang diterima sebesar 307,38 kPa. Dengan kata lain, material karet bekas memberikan sifat elastis pada campuran balas dan menghasilkan nilai deformasi vertikal yang tinggi dibandingkan tanpa menggunakan material elastis. Sebaliknya penambahan bahan pengikat seperti aspal menjadikan sampel uji memiliki nilai deformasi vertikal yang lebih rendah.

3. Penambahan aspal pada sampel II dan penambahan karet bekas + aspal pada sampel III dapat meningkatkan daya tahan balas terhadap abrasi dengan nilai masing-masing didapat yaitu sebesar 32,5 gr (0,64%) untuk sampel uji II dan 16 gr (0,30%) untuk sampel uji III. Nilai abrasi tersebut nilainya lebih kecil dibandingkan nilai abrasi yang didapatkan pada sampel I yaitu sebesar 37 gr (0,75%).
4. Nilai modulus elastisitas yang didapatkan sampel I adalah 23,72 MPa. Penambahan aspal pada sampel II sebanyak 2% meningkatkan nilai modulus elastisitas dengan nilai yang didapat sebesar 18,96 MPa. Nilai modulus elastisitas terendah terdapat pada sampel III yang nilainya 11,55 MPa. Penambahan karet bekas dapat mengurangi nilai modulus elastisitas karena sifat elastis dari karet tersebut. Sedangkan dengan adanya penambahan bahan pengikat seperti aspal pada campuran balas akan memberikan nilai modulus elastisitas lebih tinggi dari pada hanya menggunakan karet bekas sebagai material elastis.

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.
- D'Andrea, A., Loprencipe, G., & 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., & Presti, D. L., 2016, Bitumen Stabilized Ballast: A Potential Solution for Railwaytrack-bed. *Construction and Building Materials*, 124, 118-126.
- D'Angelo, G., Thom, N., & Presti, D. L., 2017, Optimisation of Bitumen Emulsion Properties for Ballast Stabilisation. *Materiales De Construccions*, 67(327), 124-133.
- Farhan, A. H., Dawson, A. R., Thom, N. H., Adam, S., & Smith, M. J., 2015, Flexural Characteristics of Rubberized Cement-Stabilized Crushed Aggregate for Pavement Structure. *Materials & Design*, 88, 897-905.
- Giunta, M., Bressi, S., dan D'Angelo, G., 2018, Life Cycle Cost Assessment of Bitumen Stabilised Ballast: A Novel Maintenance Strategy for Railway Track-bed. *Construction and Building Materials*, 172, 751-759.
- Hameed, A. S., & Shashikala, A. P., 2016, Suitability of rubber concrete for railway sleepers. *Perspectives in Science*, 8, 32-35.
- Hyeok, L. S., Lee, J. W., Park, D. W., & Vo, H. V., 2014, Evaluation of Asphalt Concrete Mixture for Railway Track. *Construction and Building Materials*, 73, 13-18.
- Indraratna, B., Ngo, N. T., & Rujikiatkamjorn, C., 2017, Improved Performance of Ballasted Rail Tracks Using Plastics and Rubber Inclusions. *Proceeding in Transportation Geotechnics and Geoecology*, Saint Petersburg, Russia, 17-19 Mei 2017, 207-214.
- Mino, D. G., Liberto, M. D., Maggiore, C., & Noto, S., 2012, A Dynamic Model of Ballasted Rail Track with Bituminous Sub-Ballast Layer. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 366-378.
- Navaratnarajah, S. K., & Indraratna, B., 2017, Use of Rubber Mats to Improve the Deformation and Degradation Behavior of Rail Ballast Under Cycling Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(6), 1943-5606.
- Ointu, B. M. M., Tamboto, W. J., & Pandelege, R. R., 2013, Kajian Uji Laboratorium Nilai Modulus Elastisitas Bata Merah Dalam Sumbangan Kekakuan Pada Struktur Sederhana. *Jurnal Sipil Statik*, 1(12), 797-800.
- Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986 tentang Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel.
- Sanchez, M. S., Thom, N. H., Navarro, F. M., Gamez, M. C. R., & 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., 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), *Proceeding of The 16th International Symposium of Indonesian Inter University Transportasion Studies Forum (FSTPT)*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, Indonesia, 1-3 November 2013, 610-620.
- Signes, C. H., Hernandez, P. M., Roca, J. G., De La Torre, M. E., & 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.
- Soto, F. M., & Mino, D. G., 2017, Increased Stability of Rubber-Modified Asphalt Mixtures to Swelling, Expansion and Rebound Effect During Post-Compaction. *Transport and Vehicle Engineering*, 11, 1307-6892.