

Pengaruh Aspal dan Ukuran Karet Bekas Terhadap Modulus Elastisitas Lapisan Balas Terstabilisasi

The Effect of Asphalt and Scrap Tire Size on The Elastic Modulus of Stabilized Ballast Layer

Aura Putri Kautsar, Sri Atmaja P. Rosyidi, Dian Setiawan M

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Jalur kereta api dengan material balas merupakan teknologi yang sudah umum digunakan di Indonesia, karena lebih praktis dalam pembangunan dan pemeliharaan. Namun, pada kenyataannya penggunaan teknologi ini menyebabkan banyaknya material balas yang tersebar dan mempengaruhi perubahan geometrik pada rel. Usaha stabilisasi dengan menggunakan aspal dan karet ban bekas disarankan dapat memperbaiki permasalahan pada balas. Pada penelitian ini karet ban bekas yang digunakan sebanyak 10% dan aspal sebanyak 2% dari berat total benda uji. Benda uji dibuat sebanyak empat sampel dengan modifikasi yang berbeda-beda, untuk mengetahui nilai dari beberapa parameter seperti volume pori, deformasi, abrasi dan modulus elastisitas. Hasil menunjukkan bahwa balas modifikasi menggunakan karet ban bekas dan aspal, mempunyai volume pori terkecil yakni 35,21%. Nilai deformasi vertikal terkecil terdapat pada balas modifikasi aspal sebesar 5 mm dengan beban 483,4 kPa. Nilai abrasi terkecil terdapat pada balas modifikasi aspal dan karet bekas yakni 19,6 gram. Selanjutnya, kekakuan yang dilihat dari nilai modulus elastisitas terbesar terdapat pada balas modifikasi aspal yakni 27,13 MPa.

Kata-kata kunci : Abrasi, deformasi, modulus elastisitas, stabilisasi, volume pori.

Abstract. Ballasted track is a technology that commonly used in Indonesia, due to the practical in build and maintenance. But in fact, the application of this technology causes much ballast degradation and influence into the rail track geometric changes. The rail track stabilization using bitumen and scrap tire recommended to make a solution to fix many problem of the ballasted track. In this research, scrap tire and bitumen used as much as 10% and 2% of total weight respectively. The specimen then be made for four samples with different mixes to know the value of some parameters such as void volume, deformation, abrasion, and elasticity modulus. Results show that ballast modified by scrap tire and bitumen has a smallest value of void volume by 35,21%. The smallest deformation value by 5 mm at the load of 483,4 kPa occurred on ballast modified by bitumen. The smallest value of abrasion by 19,6 grams occurred on ballast modified by bitumen and scrap tire rubber. Then, the stiffness that reviewed from higher elastic modulus value by 27,13 MPa.

Keyword : Abrasion, deformation, elastic modulus, stabilization, volume void.

1. Pendahuluan

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang banyak menarik peminat pada era sekarang ini. Faktor-faktor yang mempengaruhi hal tersebut terkait efisiensi waktu, kecepatan laju, kapasitas penumpang yang memadai dan minimnya pencemaran lingkungan, apabila dibandingkan dengan moda transportasi lain (D'Angelo, et al., 2016). Jalur balas konvensional merupakan sebuah metode yang sudah banyak digunakan di seluruh dunia, karena kelebihannya dalam hal biaya konstruksi yang relatif rendah, serta praktis dalam penerapannya dan perawatannya

di lapangan. Namun pada kenyataannya, yang kerap kali terjadi, penggunaan jalur balas menimbulkan masalah besar terhadap kekakuan dan abrasi pada partikel yang menyebabkan biaya perawatan tinggi serta daya tahan rendah. Lakusi et al. (2015) dalam penelitiannya memaparkan tentang stabilisasi balas menggunakan metode *ballast bounding* yang digunakan untuk mengikat suatu balas pada tiap sisi materialnya. Hal ini bertujuan untuk mencegah banyaknya material yang terabrasi, dan jika dibiarkan saja akan membahayakan perilaku pengemudi dan juga kenyamanan perjalanan. Hal tersebut berdampak pada perubahan geometrik jalan

rel, sehingga buruknya daya tahan pada lapisan balas dan singkatnya umur layanan. Penelitian terdahulu telah melaksanakan studi tentang penggunaan jalur balas tipe *slab track*. Tipe struktur yang dimiliki *slab track* mempunyai karakteristik yang lebih kuat dan kokoh, namun kendala utamanya ada pada biaya pembangunannya sangat tinggi, hingga mencapai dua kali lipat jika dibandingkan dengan jalan rel konvensional, untuk itu muncul ide baru mengenai stabilisasi balas dengan menggunakan aspal (Setiawan, dkk., 2013)

Stabilisasi lapisan balas adalah upaya untuk mengurangi deformasi yang berkaitan dengan kekakuan yang dimiliki, serta mengurangi abrasi dan kemampuannya dalam meredam energi dari beban kereta api (D'Angelo, et al., 2016; Sanchez, et al., 2014; D'Angelo, et al., 2017; Signes, et al., 2016; Indraratna, et al., 2014; Navaratnarajah dan Indraratna, 2017). Lapisan balas merupakan struktur granular pada bagian substruktur. Terdiri dari gradasi beragam antara 22- 63mm. Fungsinya adalah untuk menyediakan fondasi yang kompak, dapat menerima beban dari bantalan yang kemudian disalurkan pada lapisan subbalas, menyediakan drainase yang memadai, memberikan tingkat elastisitas yang diinginkan serta mengurangi tingkat kebisingan dan banyaknya getaran (D'Angelo, et al., 2016; Sanchez, et al., 2014; Soto, et al., 2018).

Balas modifikasi dengan aspal akan menghasilkan nilai modulus yang diinginkan (Soto, et al., 2017), karena aspal digunakan sebagai bahan pengikat antar partikel material balas (D'Angelo, et al., 2017). Balas yang sudah tercampur dengan aspal akan menghasilkan sesuatu yang kompak dan kaku sehingga menghasilkan nilai modulus yang baik (D'Angelo, et al., 2016), serta dapat meningkatkan kekakuan meski pada suhu yang tinggi (Lee et al., 2014)

Bahan lainnya berupa karet atau bahan elastis digunakan dalam hal stabilisasi karena merupakan komponen yang ditujukan untuk memberikan sifat elastis secara vertikal pada jalur balas. Selain itu, daya tahan yang tinggi dapat menambah kinerja dan mengurangi kerusakan pada balas dikarenakan kontak antar agregat juga semakin minim, sehingga akan

mengurangi biaya maupun beban perawatan pada lapisan balas (Sanchez, et al., 2015; Farhan et al., 2015; Guinta et al., 2018). Namun penggunaannya yang berlebihan dapat mempengaruhi kurangnya nilai kepadatan pada lapisan balas (Signes et al, 2016).

Modulus elastisitas (E) merupakan besaran yang menggambarkan tingkat elastisitas suatu bahan dan dihasilkan antara dua hubungan tegangan (σ) dan regangan (ϵ) (Sehonanda, et al., 2013). Dua parameter tersebut didapatkan dari hasil pengujian tekan dengan menggunakan mesin UTM (*Universal Testing Machine*) serta akan berpengaruh terhadap banyaknya kerusakan yang dihasilkan pada campuran setiap sampel. Beberapa parameter yang dihasilkan dari pengujian kuat tekan adalah tegangan, regangan, perubahan panjang dan pembebanan.

Tujuan pada penelitian ini adalah untuk mengukur besarnya nilai deformasi, abrasi dan modulus elastisitas yang dihasilkan oleh balas biasa, maupun balas yang telah dimodifikasi melalui pengujian kuat tekan.

2. Metode Penelitian

Bahan

Material Balas

Balas yang digunakan pada penelitian didapatkan dari Clereng, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kondisi balas dalam keadaan bersih, serta telah mengalami pembersihan pada kadar lumpurnya. Balas dimasukkan ke dalam oven selama 24 jam, hingga kondisi benar-benar kering, agar sesuai dengan rencana pengujian yang telah disusun sebelumnya. Bentuk balas yang digunakan tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Balas

Aspal

Penelitian ini menggunakan aspal yang biasa digunakan pada jalan raya yakni aspal dengan penetrasi 60/70. Aspal dimasukkan ke dalam oven selama 4 jam, dipanaskan hingga mencapai suhu 155 °C. Aspal yang digunakan adalah sebanyak 2% dari berat total benda uji. Aspal yang digunakan tersaji pada Gambar 2.



Gambar 2. Aspal

Karet Ban Bekas

Penelitian ini menggunakan karet ban luar dari kendaraan bermotor yang sudah tidak terpakai. Karet ban dipotong hingga berukuran 3/8” atau jika dianalisis menggunakan saringan yang tertahan saringan 3/8”. Tampilan potongan karet ban bekas kendaraan bermotor, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Karet ban bekas

3. Prosedur Pengujian

Pembuatan benda uji

Penelitian ini menggunakan benda uji yang dicampur didalam *ballast box* sebanyak empat sampel dimana setiap sampel tersebut mempunyai material yang berbeda. Dengan

menggunakan bahan sebagai bahan utamanya dan aspal serta karet bekas sebagai bahan campurannya. Sampel penelitian disajikan pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Sampel penelitian

| No. | Nama Sampel | Campuran |
|-----|----------------|-----------------------|
| 1. | Sampel 1 (S.1) | Balas |
| 2. | Sampel 2 (S.2) | Balas + Aspal |
| 3. | Sampel 3 (S.3) | Balas + Karet |
| 4. | Sampel 4 (S.4) | Balas + Aspal + Karet |

Sampel 1

Balas dituangkan ke dalam *ballast box* sebanyak 1/3 bagian, lalu ditumbuk dengan penumbuk manual sebanyak 25 kali. Begitu seterusnya hingga 3/3 bagian dari *ballast box*.

Sampel 2

Balas dituangkan ke dalam *ballast box* seperti halnya pada sampel 1, namun setelah dilakukan pemadatan, aspal dituangkan di atasnya hingga merata. Tahapan yang sama digunakan pada lapisan berikutnya.

Sampel 3

Balas dan karet dituangkan ke dalam *ballast box* secara merata dan dilakukan tumbukan sebanyak 25 kali pada setiap lapisannya. Hal yang sama dilakukan pada dua lapisan berikutnya.

Sampel 4

Penuangan balas dan karet dilakukan seperti ketika mempersiapkan sampel 3. Namun setelah proses pemadatan, aspal dituangkan pada aspal dan karet ban bekas secara merata. Begitu seterusnya hingga *ballast box* terpenuhi.

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. Benda uji berupa beton segar yang berbentuk silinder dan sudah mengalami pematangan diuji kuat tekannya sehingga dapat ditentukan seberapa besar kekuatan yang dimiliki beton tersebut dalam menahan beban (BSN, 1990). Metode kuat tekan menggunakan mesin UTM (*Universal Testisting Machine*). Seperti yang tersaji pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian kuat tekan

4. Analisis Data

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

Dari keempat data tersebut dapat memberikan penjelasan tentang besarnya deformasi yang terjadi dengan menarik garis pada sebuah grafik antara pembebanan dengan perubahan panjang yang. Selain itu, nilai modulus elastisitas juga dapat diketahui dengan membandingkan nilai tegangan dan regangan.

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). Konsep sebuah konstanta modulus elastisitas dengan persamaan 1.

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

Dimana : E : Nilai modulus elastisitas (N)

σ : Tegangan (MPa)

ϵ : Regangan (mm)

5. Hasil dan Pembahasan

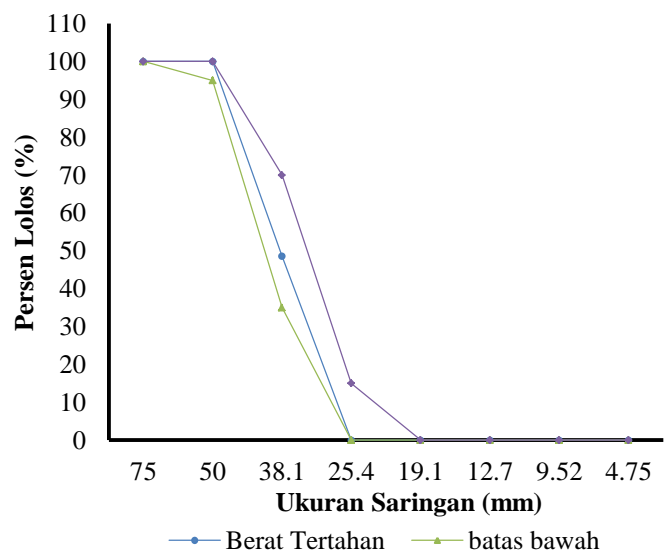
Pengujian Fisik Balas

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

Tabel 2. Sifat fisik material balas

| No. | Variabel | Nilai | Spesifikasi | Ket. |
|-----|-----------------|-------|-------------|----------------|
| 1. | Berat Jenis | | | |
| | Bulk | 2,63 | Min. 2,6 | Memenuhi |
| | SSD | 2,66 | Min. 2,6 | Memenuhi |
| | Semu | 2,70 | Min. 2,6 | Memenuhi |
| | Serapan Agregat | 0,95% | Max. 3% | Memenuhi |
| 2. | Kadar Lumpur | 1,8% | Max. 0,5% | Tidak memenuhi |
| 3. | Keausan Agregat | 17.7% | Max. 25% | Memenuhi |

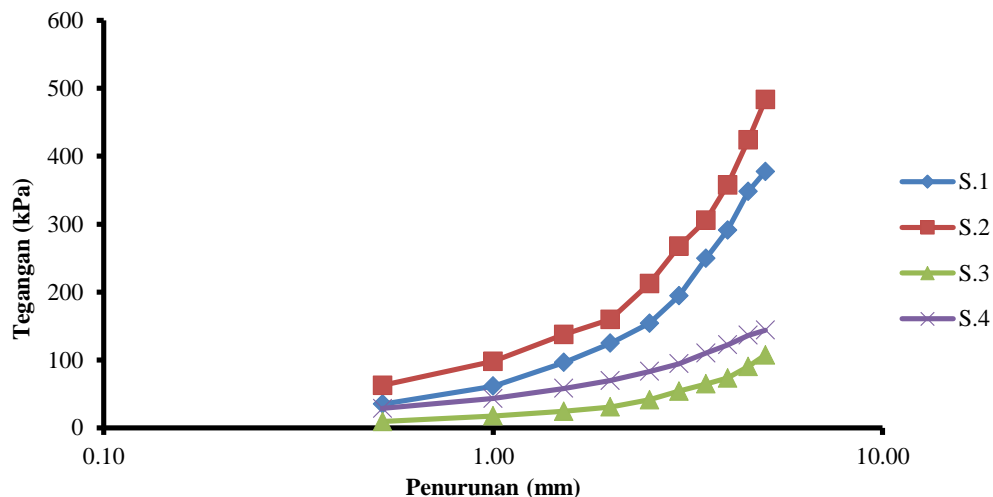
Pengujian analisis saringan juga dilakukan untuk mengetahui distribusi gradasi. Dalam penelitian ini ukuran balas yang digunakan berkisar antara 25-60 mm sebagaimana telah ditetapkan pada Peraturan Menteri Nomor 60 Tahun 2012. Distribusi ukuran balas tersaji pada Gambar 5.



Gambar 5. Distribusi gradasi balas

Pengujian Fisik Aspal

Pengujian fisik aspal pada tahap persiapan benda uji dilakukan untuk mengetahui kelayakan penggunaan aspal penetrasi 60/70. Hasil pengujian fisik aspal telah memenuhi spesifikasi Bina Marga dan telah tersaji pada Tabel 3.



Gambar 6. Grafik hubungan penurunan dan pembebanan

Tabel 3. Hasil pengujian fisik aspal

| No. | Variabel | Nilai | Spek. | Ket. |
|-----|-------------------|--------|-----------|----------|
| 1. | Berat Jenis | 1,05 | Min. 1,0 | Memenuhi |
| 2. | Penetrasi | 63,6 | 60 - 79 | Memenuhi |
| 3. | Titik Lembek | 49 °C | 50 - 58 | Memenuhi |
| 4. | Daktilitas | 147 | Min. 100 | Memenuhi |
| 5. | Kehilangan Minyak | 0,397% | Maks. 0,8 | Memenuhi |

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. Hal ini disebabkan karet ban bekas dan aspal yang dicampurkan menjadi satu didalam *ballast box* berfungsi untuk mengisi rongga-rongga kecil disela-sela balas. Volume rongga pada masing-masing sampel modifikasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai volume pori setiap sampel

| No. | Nama Sampel | Volume Pori |
|-----|-------------|-------------|
| 1. | Sampel 1 | 47,16 % |
| 2. | Sampel 2 | 40,45 % |
| 3. | Sampel 3 | 40,71 % |
| 4. | Sampel 4 | 35,21 % |

Pengaruh balas modifikasi terhadap deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk posisi dan ukuran dari suatu sampel setelah

mengalami pengujian. Dari definisi tersebut, dapat dimaksudkan sebagai perubahan tinggi suatu sampel setelah diberikan pembebanan.

Pada penelitian ini, nilai deformasi pada setiap sampel didapatkan dari suatu grafik hubungan penurunan dan tegangan yang dapat diketahui dari perubahan tinggi suatu sampel pada pembebanan tertentu. Nilai deformasi yang terjadi pada setiap sampel sangat berbeda, akibat dari pencampuran bahan seperti yang telah tersaji pada Gambar 6.

Dari Gambar 6 dapat diketahui bahwa sampel 3 yakni balas modifikasi karet ban bekas mempunyai nilai deformasi paling besar, namun beban yang menumpu pada sampel tersebut tidak terlalu tinggi. Penambahan karet sebanyak 10% dari berat total sangat berpengaruh terhadap sifat sampel 3.

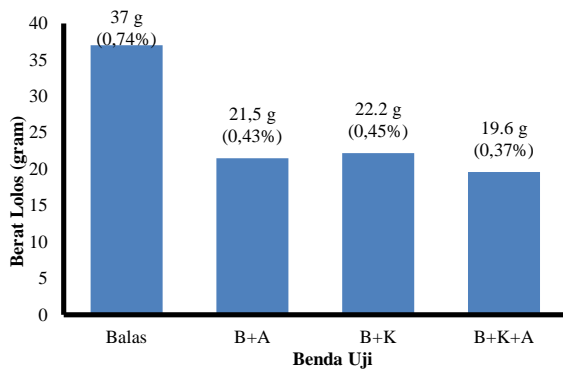
Sebaliknya, minimnya nilai deformasi dihasilkan pada sampel 2, dengan menunjukkan perilaku yang kuat. Sampel tersebut tidak mudah mengalami deformasi meskipun ditempa beban yang tinggi sekalipun. Perilaku aspal yang ditambahkan pada balas memang ditujukan sebagai pengikat pada setiap materialnya.

Keadaan yang sama juga ditunjukkan pada sampel 4, dimana penambahan aspal membuat grafik pembebanan pada sumbu Y menjadi lebih tinggi, artinya semakin kuat sampel tersebut dalam menahan beban, sehingga nilai deformasi yang dihasilkan tidak terlalu besar. Penelitian terdahulu yang

dilakukan oleh D'Angelo et al. (2017) memaparkan bahwa sifat emulsi pada aspal memang diketahui dapat menurunkan nilai deformasi.

Pengaruh balas modifikasi terhadap gradasi dan abrasi

Abrasi pada balas terjadi akibat beberapa langkah-langkah persiapan hingga pengujian sehingga mempengaruhi perubahan distribusi gradasi pada sampel tersebut. Sehingga, secara tidak langsung dapat mengidentifikasi banyaknya abrasi yang dihasilkan. Masing-masing sampel mempunyai nilai abrasi yang berbeda-beda terutama pada balas modifikasi. Hal ini terangkum dan disajikan pada diagram batang Gambar 6.



Gambar 7. Nilai abrasi setiap sampel

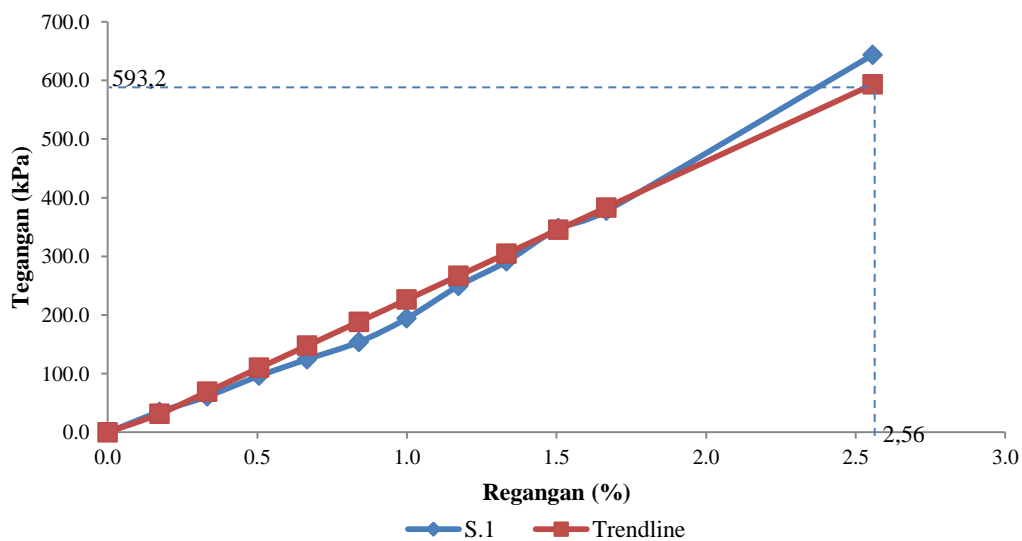
Pada Gambar 5 dapat disimpulkan bahwa kerusakan yang terjadi pada balas modifikasi jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan balas biasa. Balas tanpa modifikasi menghasilkan nilai abrasi mencapai 37 gram. Pada balas modifikasi aspal dan karet

ban bekas menghasilkan nilai abrasi terendah hingga 19,6 gram. Hal ini disebabkan oleh banyaknya kontak yang terjadi antara agregat pada saat dikenai beban. Namun dengan penambahan material seperti karet ban bekas dan aspal, kontak antar agregat menjadi berkurang karena posisinya banyak tergantikan oleh material yang lain seperti aspal dan karet ban bekas.

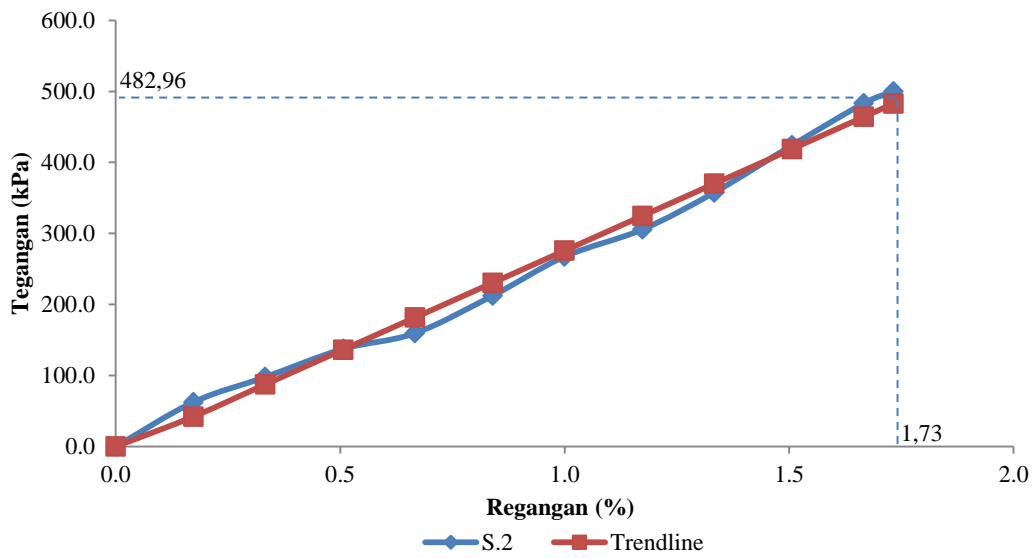
Pengaruh balas modifikasi terhadap kekakuan

Modulus elastisitas merupakan nilai suatu bahan pada kondisi elastis. Nilai tersebut didapatkan dari perbaikan garis menggunakan *trendline*. Hal ini dilakukan karena pembebanan sebanyak 3 Ton pada setiap sampel, menghasilkan nilai tegangan dan regangan yang semakin tinggi, dan masih memungkinkan untuk sampel menerima beban yang lebih besar. Namun terkendala pada *ballast box* yang tidak mampu menerima desakan dari agregat, apabila ditambahkan beban melebihi 3 Ton. Serta data yang diperoleh dari hasil pengujian kuat tekan, saat digambarkan pada sebuah grafik setiap sampelnya, sulit untuk menentukan kondisi plastis dan elastis. Untuk itu, metode perbaikan garis *trendline* digunakan untuk asumsi sampel masih dalam keadaan elastis hingga tegangan dan regangan puncak.

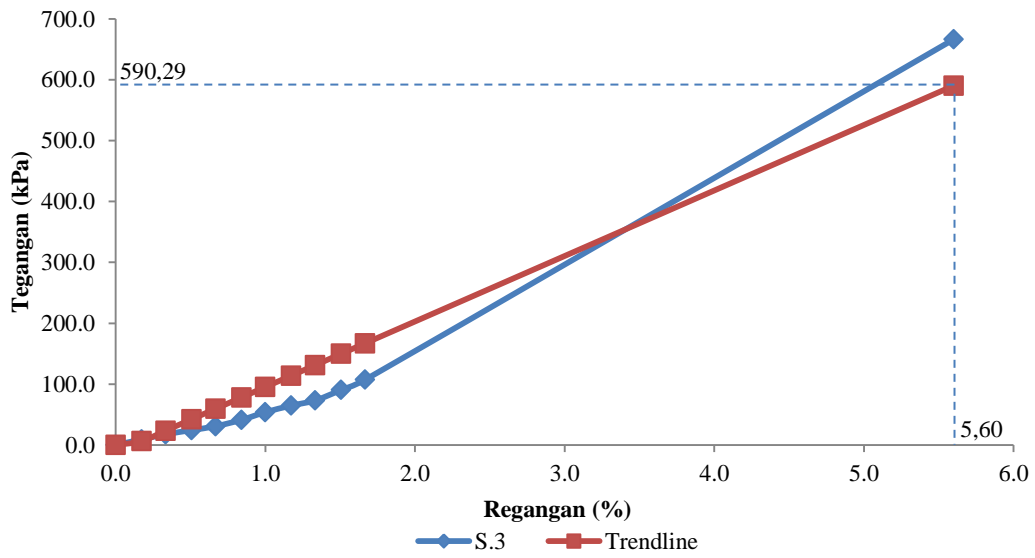
Penggunaan perbaikan garis *trendline* untuk mengetahui nilai modulus elastisitas telah tersaji pada Gambar 8, Gambar 9, Gambar 10 dan Gambar 11 sebagai berikut.



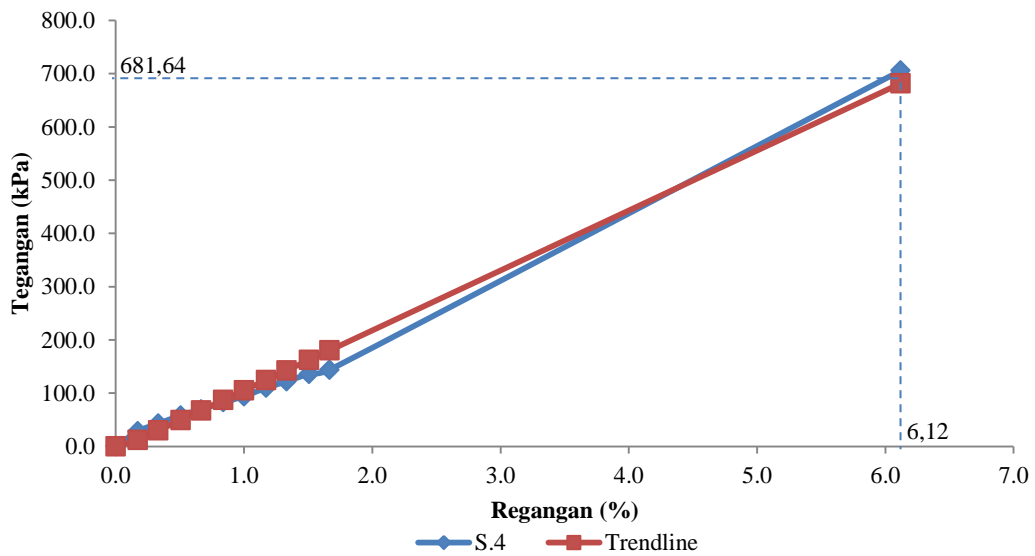
Gambar 8. Penarikan garis *offset* 2% pada sampel 1



Gambar 9. Penarikan garis *offset* 2% pada sampel 2



Gambar 10. Penarikan garis *offset* 2% pada sampel 3



Gambar 11. Penarikan garis *offset* 2% pada sampel 4

Nilai modulus elastisitas pada setiap sampel, tersaji dalam Tabel 5 berikut.

Tabel 5 Nilai modulus elastisitas setiap sampel

| No. | Nama Sampel | Strain (kPa) | Stress (%) | Modulus Elastisitas (kPa) |
|-----|-------------|--------------|------------|---------------------------|
| 1. | Sampel 1 | 593,20 | 2,56 | 23.196 |
| 2. | Sampel 2 | 482,96 | 1,73 | 27.87 |
| 3. | Sampel 3 | 590,29 | 5,60 | 10.541 |
| 4. | Sampel 4 | 681,64 | 6,12 | 11.138 |

Pada Tabel 5. menunjukkan nilai modulus elastisitas tertinggi dihasilkan pada balas modifikasi sampel 2 dimana aspal difungsikan sebagai bahan pengikat antar agregat, sehingga sampel menjadi lebih kaku. Nilai modulus pada sampel 2 menegaskan bahwa aspal mempunyai kemampuan untuk meningkatkan kekakuan pada balas. D'Angelo et al., (2016) pada penelitiannya memaparkan kemampuan balas yang dimodifikasi menggunakan aspal dapat meningkatkan nilai modulus resilien dengan menggunakan metode triaksial. Hal ini menunjukkan bahwa perbandingan dua metode kuat tekan maupun triaksial, yang menghasilkan nilai modulus resilien ataupun modulus elastisitas pada balas modifikasi aspal meningkat jika dibandingkan dengan campuran balas biasa atau sampel 1.

Sebaliknya pada sampel 3, nilai modulus menurun secara signifikan pada balas modifikasi karet ban bekas. Sanchez et al., (2015) meninjau modulus kekakuan dalam penelitiannya menggunakan balas modifikasi karet ban bekas, yang hasilnya membuktikan penurunan nilai modulus disebabkan oleh karet ban bekas yang berperan sebagai agregat elastis. Bukan hanya fakta tentang penggunaan karet sebagai agregat elastis yang menjadikan sampel menjadi lebih lentur, namun ketika proses pemadatan dengan tumbukan manual, sampel cenderung memantul sehingga tidak benar-benar memiliki kepadatan yang baik. Kurangnya nilai kepadatan inilah yang mempengaruhi turunnya nilai modulus elastisitas (Signes et al., 2016)

6. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan aspal dan karet ban bekas membuat sampel 4 mempunyai angka pori yang paling kecil dibandingkan dengan ketiga sampel yang lainnya, yakni mencapai 35,21%.
2. Balas modifikasi aspal maupun karet ban bekas, dapat mengurangi nilai abrasi sebesar 40-47% (19,6 gram – 21,5 gram).
3. Penambahan aspal pada sampel 2 terbukti dapat meningkatkan nilai modulus sebesar 39% (27,126 kPa) karena kemampuannya untuk merekat pada agregat sehingga membuat sampel menjadi lebih padat. Hal yang sama terjadi pada sampel 4. Nilai modulus elastisitas meningkat sebesar 23% (9,167 kPa). Sebaliknya, penggunaan karet ban bekas justru menurunkan nilai modulus elastisitas hingga mencapai 65% (4,828 kPa) karena sifat bahannya yang lentur. Penambahan aspal sebanyak 2% terbukti dapat meningkatkan kekakuan pada sampel sehingga tidak menghasilkan regangan yang tinggi namun dapat menumpu beban hingga 483,4 kPa.

7. Daftar Pustaka

- BSN, 1990, SNI 03-1974-1990 *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1991, SNI 06-2440-1991 *Metode Pengujian Kehilangan Berat Minyak dan Aspal dengan Cara A*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1991, SNI 06-2432-1991 *Metode Pengujian Daktilitas Bahan-Bahan Aspal*, 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, 2008, SNI 1969-2008 *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2008, SNI 2417:2008 *Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011, SNI 2441-2011 *Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

- BSN, 2011, SNI 2432-2011 *Cara Uji Penetrasi Aspal*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2011, SNI 2434-2011 *Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- D'Angelo, G., Presti, D. L., & 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., & Thom, N. (2017). Optimisation of bitumen emulsion properties for ballast stabilisation. *Materiales de Construcción*, 67, 124-133.
- Direktorat Jenderal Bina Marga, 2010, *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan (revisi III)*, Kementerian Pekerjaan Umum. Jakarta
- 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., & 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.
- 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.
- Lakusi, S., Ahac M., & Haladin, I. (2010). Track Stability Using Ballast Bounding Method. *Proceeding of The 10th Slovenian Road and Transportation Congress*, Portoroz, Slovenia, 20-22 Oktober 2010.
- Lee, S. H., Lee, J. W., Park, D. W., & Vo, H. V. (2014). Evaluation of asphalt concrete mixtures for railway track. *Construction and Building Materials*, 73, 13-18.
- Navaratnarajah, S. K., Indraratna, B. (2017). Use of Rubber Mats to Improve the Deformation and Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143-5606.
- Nimbalkar, S., & Indraratna, B. (2016). Improved performance of ballasted rail track using geosynthetics and rubber shockmat. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(8), 04016031.
- 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*.
- Rosyidi, S. A. P. (2016). *Rekayasa Jalan Kereta Api*. Yogyakarta: LP3M-UMY 2015.
- Sánchez, M. S., Navarro, F. M., & 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., & 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., Muthohar, I., & Ghataora, G. (2013). Conventional and Unconventional Railway for Rail Ways on Soft Ground in Indonesia (Case study: Rantau Rapat-Duri Railways Development). *Proceeding of The 16th FSTPT International Symposium*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 1-3 November 2013, 610-620.
- Signes, C. H., Hernández, P. M., Roca, J. G., de la Torre, M. E. G., & 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, G. D. (2017). Increased Stability of Rubber-Modified Asphalt Mixtures to Swelling, Expansion and

Rebound Effect during Post-Compaction.
Transport and Vehicle Engineering, 11,
1307 – 6892.

Soto, F. M., & Mino, G. D. (2018).
Characterization of Rubberized Asphalt
For Railways. *International Journal of
Engineering Sciences & Research
Technology*, 7(2), 284-302.

