

Pengaruh Penambahan Aspal Terhadap Nilai Modulus Elastisitas, Deformasi Vertikal, dan Durabilitas Lapisan Balas

The Effect of Asphalt Addition on The Elastic Modulus, Vertical Deformation, and Durability of Ballast Layer

Muhammad Yusuf Hamzah, Sri Atmaja P. Rosyidi, Dian Setiawan M.

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Lapisan balas merupakan salah satu komponen utama dari struktur jalan rel konvensional yang mengalami pembebanan yang besar dalam menahan beban berulang dari lalu lintas kendaraan kereta api. Hal ini mengakibatkan umur pelayanan yang relatif pendek dari lapisan balas dan berdampak pada tingginya biaya pemeliharaan struktur jalan rel. Oleh karena itu, perlu adanya tindakan lebih lanjut berupa penelitian mengenai inovasi teknologi dalam material balas sebagai bahan tambah untuk meningkatkan kualitas lapisan balas. Penambahan aspal sebagai pengikat antara material balas diharapkan dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan durabilitas dan menambah umur pelayanan serta mengurangi biaya pemeliharaan jalur kereta api. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik deformasi vertikal, modulus elastisitas, dan durabilitas akibat penambahan aspal pada lapisan balas. Pengujian yang digunakan pada penelitian ini adalah uji kuat tekan dengan benda uji dimodelkan menjadi *box* balas yang terbuat dari plat baja berukuran 400mm x 200mm x 300mm. Selanjutnya digunakan tiga benda uji yaitu material balas tanpa campuran, material balas dengan aspal 2%, dan material balas dengan aspal 3%. Hasil dari penelitian yang telah dilakukan pada tiga benda uji menunjukkan durabilitas terbesar terdapat pada benda uji III dengan nilai kerusakan terkecil yaitu sebesar 39,4 gram. Ketahanan terhadap deformasi vertikal terkecil terdapat pada benda uji I yaitu sebesar 4 mm dengan beban 310 kPa. Kemudian nilai modulus elastisitas terbesar terdapat pada benda uji I yaitu sebesar 25,38 MPa.

Kata kunci: aspal, durabilitas, lapisan balas, modulus elastisitas, uji kuat tekan

Abstract. *The ballast layer is one of the main components from the conventional rail track structure that experienced the greatest load in resisting the repetitive loads from train vehicle traffic. This results in a relatively short service life of ballast layer and impact on the high maintenance costs of the rail track structure. Therefore, further action need in the form of research on technological innovation in ballast material as added material to enhance the quality of the ballast layer. The asphalt addition as a binder between on ballast material expected be alternative to increase the durability, service life and to reduce the maintenance cost of the rail track. The purpose of this research is to analyze the characteristics of vertical deformation, elastic modulus, and durability due to the addition of asphalt in the ballast layer. The method used in this research was the compressive strength test method with the test sample modeled into a ballast box made of steel with the dimension 400mm x 300mm x 200mm. There are three specimens, which are ballast without modification (sample I), ballast with 2% asphalt (sample II), and ballast with 3% asphalt (sample III). The results of the research that has been done on 3 sample showed that the most significant durability occurred on the sample 3 with the smallest damage value of 39,4 grams. The smallest vertical deformation can be found on the sample I by 4 mm at the load of 310 kPa. Moreover, the most significant elastic modulus value occurred on the sample I by 25,38 MPa.*

Keywords: ballast layer, bitumen, compressive strength test, durability, elastic modulus

1. Pendahuluan

Transportasi kereta api dinilai menjadi solusi dari semakin meningkatnya kemacetan yang ada di Indonesia. Dengan daya tampung yang besar, penggunaan jalur khusus, menghemat ruang dan bahan bakar yang menjadikan moda transportasi kereta api lebih

unggul dibandingkan dengan transportasi darat lainnya. Namun, masih banyaknya permasalahan yang perlu diperbaiki agar moda transportasi kereta api menjadi transportasi yang aman, nyaman, dan efisien baik dari waktu maupun biaya. Moda transportasi kereta

api di Indonesia yang masih menggunakan struktur jalan rel konvensional memiliki kelemahan diantaranya yaitu umur pelayanan yang tidak bertahan lama dari lapisan balas dan diperlukan pemeliharaan serta membutuhkan biaya perawatan yang relatif besar. Hal ini juga berkaitan dengan penelitian yang dilakukan oleh Setiawan dkk. (2013) mengenai perkembangan jalan rel konvensional dengan kualitas mendekati *slab track*, tetapi dengan biaya yang tidak terlalu mahal akan tetapi dapat menambah umur layanan dari struktur jalan rel. Lapisan balas merupakan salah satu komponen utama dalam struktur jalan rel kereta api. Rosyidi (2015) mengatakan lapisan balas terletak di daerah yang mengalami konsentrasi tegangan terbesar akibat lalu lintas kereta api pada jalan rel, oleh karenanya material lapisan balas haruslah terpilih dengan memiliki kekuatan maupun daya tahan yang baik. Oleh karena itu, diperlukan suatu tindakan lebih lanjut berupa penelitian mengenai inovasi teknologi dalam material sebagai bahan tambah untuk perbaikan kualitas lapisan balas pada struktur jalan rel.

Penelitian yang dilakukan oleh Giunta dkk. (2018) menyimpulkan bahwa penambahan material lain yang bersifat mengikat pada struktur balas dapat meningkatkan umur layanan dan biaya perawatan. Rose dkk. (2009) mengatakan penggunaan aspal pada struktur jalan rel berdampak positif pada pencapaian hemat biaya operasi jangka panjang dan efisien yang dicapai dengan tidak adanya pelapukan atau kemerosotan material yang dapat mempengaruhi kinerja untuk jangka waktu yang lama. D'Angelo dkk. (2016) melakukan penelitian dengan memodifikasi lapisan balas dengan campuran aspal untuk mengurangi deformasi serta menekan biaya perawatan dengan meningkatkan ketahanan pada lapisan balas pada saat kondisi bersih maupun kotor. Persentase material aspal yang digunakan sebesar 2% dan 3% dari total berat benda uji. alat yang digunakan berdasarkan PUMA (*Precision Unbound Material Analyser*) yaitu silinder dengan dimensi cetakan 150 mm untuk tinggi dan diameter 150 mm. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban

dinamik sebesar 200 kPa dan 300 kPa yang dianggap sesuai untuk mensimulasi pembebanan kereta biasa. Pengujian ini juga menggunakan 2 metode pemadatan yaitu pemadatan manual dan *vibrator hammer*. Hasil menunjukkan bahwa pemadatan menggunakan *vibrator hammer* dapat mengurangi terjadinya deformasi namun dengan kondisi balas yang terkotori, sedangkan untuk penggunaan aspal dengan persentase 2% dapat mengurangi deformasi sebesar 50% dan meningkatkan kekakuan sebesar 20%. Kemudian dalam penelitian lainnya, penggunaan bahan bitumen pada lapisan balas dan sub-balas, memperoleh hasil bahwa lapisan material balas dan sub-balas dapat mengurangi gaya dinamis, berdasarkan nilai modulus kekakuan dari tegangan yang terjadi pada balas (Mino dkk., 2012).

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 yang hanya tersusun material agregat. D'Angelo dkk. (2017) melanjutkan penelitian dalam mengoptimalkan aspal emulsi dalam campuran lapisan balas. Berdasarkan nilai modulus resilien (MR), *flowability index*, energi yang hilang, jenis dan jumlah bitumen yang digunakan memperoleh hasil yang menunjukkan bahwa keseluruhan optimalisasi dan penstabilan aspal emulsi dapat meningkatkan ketahanan lapisan balas terhadap deformasi. Dengan demikian, penambahan aspal pada lapisan balas dapat dijadikan alternatif solusi untuk meningkatkan kualitas struktur jalan rel guna tercapainya umur pelayanan yang lama dan biaya pemeliharaan yang tidak besar.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik balas dengan ditamahnya material aspal melalui pengujian kuat tekan dalam menganalisis besarnya nilai deformasi vertikal, modulus elastisitas, dan durabilitas pada lapisan balas dari struktur jalan rel.

2. Metode Penelitian

Bahan

Material Agregat

Material agregat yang digunakan sebagai bahan lapisan balas pada penelitian ini adalah agregat kasar yang diambil dari daerah Clereng, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi D.I. Yogyakarta. Ukuran material agregat yang digunakan sesuai dengan persyaratan gradasi untuk material balas menurut penjelasan Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986. Adapun sifat fisik dari agregat kasar yang digunakan tersaji pada Tabel 1. di bawah ini.

Tabel 1 Hasil pengujian agregat kasar

| No | Pengujian | Hasil | Spesifikasi |
|----|-------------------|-------|-------------|
| 1 | Berat Jenis (BJ): | | |
| | a. BJ Bulk | 2,65 | Min 2,6 |
| | b. BJ SSD | 2,67 | Min 2,6 |
| | c. BJ Semu | 2,71 | Min 2,6 |
| 2 | Penyerapan air | 0,85 | Max 3,0% |
| 3 | Kadar Lumpur | 1,7 | Max 0,5% |
| 4 | Keausan Agregat | 17,3 | Max 25% |

Menurut Rosyidi (2015), agregat kasar yang digunakan sebagai lapisan balas untuk kelas jalan I dan II menggunakan minimal ukuran nominal $2\frac{1}{2}$ " - $\frac{3}{4}$ ", sedangkan untuk kelas jalan III dan IV dapat menggunakan ukuran minimal 2" - 1". Berikut ini bentuk agregat kasar yang digunakan tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Agregat kasar

Aspal

Penelitian ini menggunakan aspal dengan penetrasi 60/70 yang umumnya digunakan untuk perkerasan lentur pada jalan di Indonesia. Untuk material aspal sendiri langsung diambil dari Laboatorium Transportasi dan Jalan Raya Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Kondisi material aspal yang sudah dilakukan pengujian fisik dan telah memenuhi standar yang ditentukan kemudian dimasukkan kedalam oven dengan suhu 155°C. Kadar aspal yang digunakan untuk modifikasi lapisan balas pada penelitian ini adalah sebesar 2% dan 3%. Hal ini mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh D'Angelo dkk. (2016) tentang stabilisasi balas aspal dengan persentase aspal 2% - 3%. Karakteristik serta aspal yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2. dan gambar 2. di bawah ini.

Tabel 2 Hasil pengujian material aspal

| No | Pengujian | Spesifikasi | Hasil |
|----|-----------------------------------|-------------|---------|
| 1 | Penetrasi | 60-70 | 63,4 mm |
| 2 | Berat jenis | ≥ 1 | 1,043 |
| 3 | Titik lembek | ≥ 48 | 48,5°C |
| 4 | Daktilitas | ≥ 100 | 147 cm |
| 5 | Kehilangan berat minyak dan aspal | $\leq 0,8$ | 0,39% |



Gambar 2. Aspal

3. Prosedur Pengujian

Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji ini menggunakan material balas berkisar antara 35 kg - 40 kg tiap benda uji yang diletakkan dalam *ballast box* dengan ukuran box 40 cm × 20 cm × 30 cm. Agregat dipadatkan dengan tumbukan 25 tiap lapisan dimana masing-masing benda uji terdapat 3 lapisan. Bahan tambah aspal yang digunakan merupakan aspal penetrasi 60/70 yang sudah dipanaskan dengan kadar persentase yang telah ditentukan yaitu 2% dan 3%. Adapun 3 benda uji yang akan dibuat dapat dilihat pada Tabel 3. di bawah ini.

Tabel 3 Sampel uji modifikasi balas

| No | Jenis Benda Uji | Material Penyusun |
|----|-----------------|----------------------|
| 1 | Benda Uji I | Agregat |
| 2 | Benda Uji II | Agregat + Aspal (2%) |
| 3 | Benda Uji III | Agregat + Aspal (3%) |

Benda uji I

Agregat kasar yang telah memenuhi persyaratan SNI (Standar Nasional Indonesia) dimasukkan ke dalam *ballast box* sebanyak 1/3 bagian, kemudian ditumbuk sebanyak 25 tumbukan tiap lapisan dengan menggunakan alat penumbuk manual. Begitu seterusnya sampai terisi penuh.

Benda uji II

Pembuatan benda uji dilakukan sama halnya pada benda uji I, hanya saja setelah agregat kasar dimasukkan 1/3 bagian dari *ballast box*, ditambahkan aspal diatas agregat dengan merata dan begiti seterusnya sampai terisi penuh. Aspal yang digunakan pada benda uji sebanyak 2% yaitu 786,67 gram dari berat total benda uji yang dibagi antara 0,6% - 0,7% tiap lapisan.

Benda uji III

Proses dan langkah-langkah pembuatan benda uji III sama halnya dengan benda uji II. Akan tetapi, pada benda uji III menggunakan campuran tambahan aspal penetrasi 60/70

dengan kadar persentase 3% yaitu 1180 gram dari berat total benda uji.

Adapun benda uji yang telah dibuat dapat dilihat pada gambar 3. di bawah ini.



Gambar 3 Benda uji yang selesai dibuat

Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan alat uji tekan vertikal yaitu *Micro-computer Universal Testing Mechine* (UTM). Pengujian dilakukan dengan menempatkan benda uji pada alat uji kuat tekan kemudian ditekan dengan beban maksimal sebesar 3000 kg dan kecepatan yang disesuaikan dengan rencana. Pada alat uji tekan digunakan pelat besi sebagai landasan yang diletakkan di bawah benda uji dan pelat besi penekan sebagai pelat pembebanan sehingga beban yang tersalurkan lebih merata.



Gambar 4 Pengujian kuat tekan

Analisis Data Hasil Pengujian

Parameter yang dikaji dalam penelitian ini adalah pengaruh besar beban vertikal terhadap deformasi vertikal (penurunan) yang diperoleh dari uji kuat tekan, durabilitas material agregat, dan nilai modulus elastisitas

(E). Nilai modulus elastisitas diperoleh berdasarkan pengujian kuat tekan yang dianalisis dari hasil tegangan (σ) dan regangan (ϵ). Nilai tegangan dan regangan ini berdasarkan hasil output dari mesin uji kuat tekan yaitu *force* (gaya), *stress* (tegangan), *strain* (regangan), dan *elongation* (perubahan panjang / dalam tinggi). Nilai modulus elastisitas benda uji (E) dapat dihitung dengan persamaan 1.

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

Keterangan: E = modulus elastisitas (MPa),

σ = Tegangan leleh (kPa),

ϵ = Regangan leleh (%).

Hasil pengujian yang telah dianalisis berupa modulus elastisitas (E), durabilitas material agregat, dan deformasi vertikal akibat pembebanan akan diplotkan dalam sebuah grafik. Selanjutnya dari grafik yang telah didapat akan dilakukan perbandingan antar benda uji satu dengan yang lainnya. Hasil akhir yang didapat yaitu disimpulkan manakah benda uji yang tepat untuk digunakan sebagai lapisan balas guna memperbaiki kualitas dari struktur jalan rel.

4. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Benda Uji

Identifikasi karakteristik pada masing-masing benda uji dilakukan untuk mengetahui setiap volume bahan serta volume pori yang mengisinya. Setiap benda uji mempunyai karakteristik yang berbeda-beda, hal tersebut terjadi karena setiap benda uji memiliki material penyusun yang tidak sama. Dari ketiga sampel benda uji memiliki karakteristik campuran yang tersaji pada Tabel 2.

Tabel 2 Karakteristik pada setiap benda uji

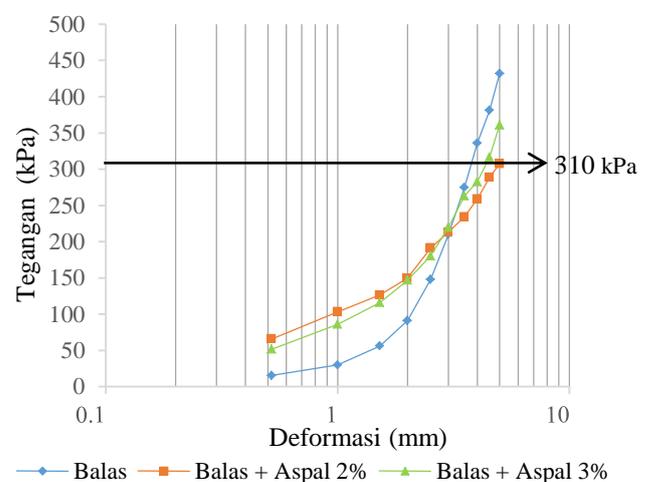
| No | Parameter | B.U.I | B.U.II | B.U.II I |
|----|---------------------------------------|-------|--------|----------|
| 1 | Berat Vol (gr/cm^3) | 1,659 | 1,539 | 1,642 |
| 2 | Vol. Aspal (%) | - | 2 | 3 |
| 4 | Vol. Balas (%) | 61,66 | 56,08 | 59,22 |
| 5 | Vol. Pori (%) | 38,34 | 41,21 | 36,14 |

Nilai Deformasi Vertikal

Nilai deformasi diambil dari grafik hubungan antara tegangan dan penurunan pada benda uji akibat pembebanan. Angka penurunan dari masing-masing benda uji berbeda-beda tergantung dari komposisi materialnya. Berikut ini adalah nilai pada penurunan yang sama dan grafik dari nilai deformasi dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 5 berikut ini.

Tabel 3. Nilai deformasi benda uji

| Sampel | Beban (kPa) | Deformasi (mm) |
|------------------|-------------|----------------|
| Balas | 310 | 4,00 |
| Balas + Aspal 2% | 310 | 5,00 |
| Balas + Aspal 3% | 310 | 4,52 |



Gambar 5. Grafik hubungan tegangan dan penurunan

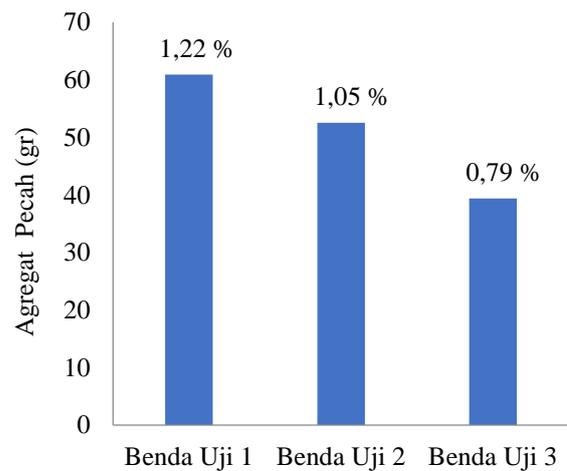
Seperti yang terlihat dalam Gambar 5 di atas, hasil pengujian kuat tekan memperoleh nilai deformasi yang berbeda. Ketika nilai tegangan yang diberikan sebesar ± 148 kPa didapatkan nilai deformasi sebesar 2,52 mm untuk benda uji 1 dan nilai deformasi sebesar 2 mm untuk benda uji 2 dan benda uji 3. Deformasi terbesar terjadi pada benda uji 1 dimana dengan nilai tegangan yang kurang lebih sama, tetapi didapatkan nilai deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan 2 benda uji lainnya yaitu 2,52 mm. Hal ini menunjukkan fungsi aspal bekerja dengan baik yaitu mengikat antara material agregat, sehingga timbul adanya peningkatan kekakuan dengan ditambahkan aspal pada benda uji. Namun, hal itu berbeda ketika nilai tegangan yang diberikan sebesar ± 310 kPa, yang mana didapatkan nilai deformasi sebesar 4 mm untuk benda uji 1, 5 mm untuk benda uji 2, dan 4,52 mm untuk benda uji 3. Nilai deformasi terbesar didapatkan pada benda uji 2 diikuti benda uji 3 dan benda uji 1. Hal ini menunjukkan hilangnya fungsi aspal sebagai bahan pengikat antara material agregat, sehingga timbul adanya penurunan kekakuan pada benda uji.

Berdasarkan uraian di atas, penambahan aspal pada lapisan balas sebagai pengikat material dapat mengurangi nilai deformasi, akan tetapi juga bisa memperbesar nilai deformasi dari lapisan balas. Oleh karena itu, perlunya evaluasi dan pembahasan lebih lanjut terkait metode pemadatan, pembuatan, serta pengujian kuat tekan dari penambahan aspal pada lapisan balas dalam menentukan metode pembuatan maupun pengujian yang paling tepat untuk penelitian selanjutnya.

Durabilitas Lapisan Balas

Durabilitas merupakan kemampuan suatu material dalam menghadapi kerusakan yang disebabkan dari berbagai perilaku dan kondisi. Pada penelitian ini, pembebanan pada tahap pengujian kuat tekan menyebabkan rusaknya sebagian dari material agregat. Untuk kriteria kerusakan pada agregat ditentukan dari agregat yang lolos saringan di bawah nomer $\frac{3}{4}$ ". Berikut ini grafik kerusakan pada masing-

masing benda uji yang dapat dilihat pada Gambar 6 berikut ini.



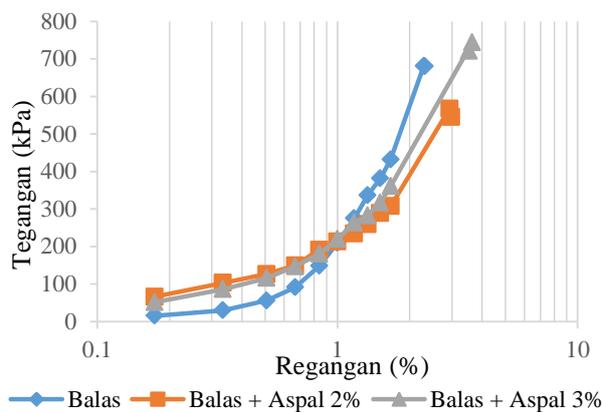
Gambar 6. Peningkatan durabilitas material benda uji

Hasil menunjukkan bahwa penambahan aspal dapat mengurangi nilai kerusakan pada material yang berdampak pada meningkatnya durabilitas benda uji 2 dan benda uji 3. Pada benda uji 1 yang tersusun dari material agregat tanpa campuran memperoleh hasil yang paling besar yaitu 60,9 gram (1,22%). Benda uji 2 dengan material agregat ditambah aspal 2% memperoleh hasil yang lebih kecil yaitu 52,5 gram (1,05%). Kemudian benda uji 3 dengan material agregat ditambah aspal 3% memperoleh hasil yang paling kecil yaitu 39,4 gram (0,79%). Berdasarkan hasil yang diperoleh dapat diketahui bahwa penambahan aspal dengan prosentase 2% maupun 3% dari berat total benda uji, secara keseluruhan dapat meningkatkan durabilitas material lapisan balas. hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh D'Angelo dkk. (2016) yang menyatakan bahwa penggunaan bahan tambah bitumen pada lapisan balas dapat meningkatkan ketahanan/durabilitas dan meningkatnya umur layanan.

Nilai Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan nilai yang menunjukkan kekakuan suatu bahan dalam menghadapi perilaku dan kondisi tertentu. Modulus elastisitas merupakan besaran nilai yang menggambarkan tingkat elastisitas bahan material dan dihasilkan berdasarkan hubungan

tegangan dan regangan (Sehonanda dkk., 2013). Material bahan yang kaku cenderung memiliki nilai modulus elastisitas yang tinggi dengan kata lain bahan atau material mempunyai tingkat kekakuan yang tinggi, sehingga nilai modulus elastisitas juga semakin tinggi. Nilai modulus elastisitas diambil dari regangan dan tegangan yang didapat setelah melakukan pengujian kuat tekan pada masing-masing benda uji. Berikut adalah Gambar 7 dan Tabel 4 yang menunjukkan nilai tegangan dan regangan hasil pengujian.



Gambar 7. Grafik hubungan antara tegangan dan regangan

Tabel 4. Nilai modulus elastisitas benda uji

| Benda Uji | Tegangan (kPa) | Regangan (%) | E (MPa) |
|---------------|----------------|--------------|-----------|
| Benda Uji I | 582,06 | 2,29 | 25,38 |
| Benda Uji II | 578,09 | 2,93 | 19,71 |
| Benda Uji III | 764,18 | 3,64 | 20,99 |

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan nilai modulus elastisitas atau kekakuan yang paling tinggi didapatkan pada benda uji I sebesar 25,38 MPa. Sedangkan nilai modulus elastisitas pada benda uji II sebesar 19,71 MPa dan pada benda uji III sebesar 20,99 MPa. Penambahan material aspal pada benda uji II dan benda uji III yang direncanakan meningkatkan nilai modulus elastisitas justru mendapatkan nilai yang lebih

rendah dibandingkan benda uji I yang material penyusunnya adalah agregat tanpa campuran. Penurunan nilai modulus elastisitas pada benda uji yang ditambahkan material aspal berbeda dengan apa yang dinyatakan D'Angelo dkk. (2016) bahwa aspal dapat meningkatkan kekakuan. Penambahan aspal yang difungsikan sebagai pengikat antar material agregat guna meningkatkan kekakuan, akan tetapi membuat menurunnya nilai modulus elastisitas dari benda uji. Hal ini bisa disebabkan oleh tidak maksimalnya proses penumbukan/pemadatan maupun pencampuran aspal dengan material agregat yang hanya dituangkan pada tiap layer dan juga faktor-faktor lain selama proses penelitian seperti lamanya waktu yang dibutuhkan aspal untuk mengeras setelah dicampurkan pada benda uji. Sehingga, perlu adanya pembahasan lebih lanjut mengenai hal ini agar penambahan material aspal selaras dengan fungsinya yaitu sebagai material pengikat yang dapat meningkatkan kekakuan.

5. Kesimpulan

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

1. Hasil pengujian kuat tekan pada tegangan ± 310 kPa dari masing-masing benda uji yaitu agregat tanpa campuran, agregat tambah aspal 2%, dan agregat tambah aspal 3% didapatkan deformasi paling rendah terjadi pada benda uji 1 dengan nilai deformasi sebesar 4 mm. Hal tersebut terjadi karena material tambah aspal yang difungsikan sebagai pengikat antara material tidak berfungsi dengan baik, sehingga penurunan pada benda uji 2 dan benda uji 3 lebih besar dibandingkan dengan benda uji 1 yang tersusun dari agregat tanpa campuran. Dengan demikian, penambahan material aspal sebagai pengikat pada lapisan balas selain dapat mengurangi nilai deformasi vertikal juga dapat menambah nilai deformasi vertikal berkaitan dengan kadar persentase aspal, metode pembuatan, dan cara pengujian benda uji.
2. Penambahan aspal pada benda uji 2 maupun benda uji 3 dapat meningkatkan

durabilitas dibandingkan dengan benda uji 1 yang tersusun dengan material agregat tanpa campuran. Durabilitas benda uji dengan penambahan material aspal yaitu sebesar 52,5 gram pada benda uji 2 dan 39,4 gram pada benda uji 3, lebih kecil dibandingkan dengan benda uji 1 sebesar 60,9 gram. Oleh karena itu, penambahan aspal pada lapisan balas dapat meningkatkan durabilitas lapisan balas dengan menurunkan kerusakan material agregat sehingga mengurangi biaya pemeliharaan dan menambah umur layanan dari struktur jalan rel.

3. Nilai modulus elastisitas terbesar didapatkan pada benda uji 1 sebesar 25,38 MPa. Penambahan aspal pada benda uji 2 dan benda uji 3 yang direncanakan meningkatkan kekakuan justru mengurangi tingkat kekakuan dari benda uji dengan nilai modulus elastisitas sebesar 19,71 MPa pada benda uji 2 dan 20,99 MPa pada benda uji 3. Hal ini disebabkan oleh tidak maksimalnya proses penumbukan/pemadatan maupun pencampuran aspal dengan material agregat yang hanya dituangkan pada tiap layer dan juga faktor-faktor lain selama proses penelitian seperti lamanya waktu yang dibutuhkan aspal untuk mengeras setelah dituangkan dan dicampurkan pada benda uji.

6. Daftar Pustaka

- Alvarez, A. E., Espinosa, L. V., Caro, S., Rueda, E. J., Aguiar, J. P., dan Loria, L. G., 2018, Differences in Asphalt Binder Variability Quantified Through Traditional and Advanced Laboratory Testing, *Construction and Building Materials*, 176, 500-508.
- Asgharzadeh, S. M., Sadeghi, J., Peivast, P., dan Pedram, M., 2018, Fatigue Properties of Crum Rubber Asphalt Mixtures Used in Railways, *Construction and Building Materials*, 184, 248-257.
- Bressi, S., Santos, J., Giunta, M., Pistonesi, L., dan Presti, D. L., 2018, A Comparative Life-Cycle Assessment of Asphalt Mixture for Railway Sub-Ballast Containing Alternative Materials, *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 76-88.
- 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: A Potential Solution for Railway track-bed, *Construction and Building Materials*, 124, 118-126.
- D'Angelo, G., Sanchez, M. S., Thom, N., Presti, D. L., dan Gamez, C. R., 2017, Bitument Stabilized Ballast: A Full-Scale Investigation on its Use for Existing and Newly Constructed Railway Trackbeds, *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, Washington DC, United States, 8-12 Januari 2017, 1-15.
- D'Angelo, G., Thom, N., dan Presti, D. L., 2017, Optimisation of Bitumen Emulsion Properties for Ballast Stabilisation, *Materiales De Construccion*, 67(327), 124-133.
- EAPA, 2003, *Asphalt in Railway Tracks*, European Asphalt Pavement Association. Breukelen, Netherlands.
- Giunta, M., Bressi, S., dan D'Angelo, G., 2018, Life Cycle Cost Assessment of Bitumen Stabilized Ballast: A Novel Maintenance Strategy for Railway Track-bed, *Construction and Building Materials*, 172, 751-759.
- Kaya, M., 2004, A Study on the Stress-Strain Behavior of Railroad Ballast Materials by Use of Parallel Gradation Technique, Doctor of Philosophy thesis, School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University.
- Lee S. H., Lee, J. W., Park, D. W., dan Vo, H. V., 2014, Evaluation of Asphalt Concrete Mixture for Railway Track, *Construction and Building Materials*, 73, 13-18.
- Mino, G. D., Di Liberto, M., Maggiore, C., dan Noto, S., 2012, A Dynamic Model of Ballasted Rail Track with Bituminous

- Sub-Ballast Layer, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 366-378.
- Rose, J. G., dan Bryson, L. S., 2009, Hot Mix Asphalt Railway Trackbeds: Trackbed Materials, Performance Evaluations, and Significant Implications, *The International Conference on Perpetual Pavement*, Columbus, Ohio, 1-18.
- Rosyidi, S. A. P., 2015, *Rekayasa Jalan Kereta Api*. Yogyakarta: Lembaga Penelitian, Publikasi & Pengabdian Masyarakat (LP3M).
- Sánchez, M. S., Navarro, F. M., dan Gamez, C. R., 2014, The Use of Deconstructed Tires as Elastic Elements in Railway Tracks, *Materials*, 7, 5903-5919.
- Sehonanda, O., Ointu, B. M. M., Tamboto, W. J., dan 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.
- Setiawan, D. M., Muthohar, I., dan Ghataora, G. S., 2013, Conventional and Unconventional Railway for Railways on Soft Ground in Indonesia (Case Study: Rantau Prapat – Duri Railway 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., 2016, Pembatasan Kecepatan Maksimum dan Kaitannya Terhadap Kapasitas Lintas Jalur Kereta Api Muara Enim – Lahat Sumatra Selatan, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil ke-VI*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, Indonesia, Mei 2016, 36-45.
- Setiawan, D. M., dan 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.
- Sukirman, S., 2003, *Perkerasan Jalan Raya*, Bandung: NOVA.
- Wiyono, A. W. W., Setiawan, A., dan Nurhidayat, N., 2012, Pengaruh Suhu terhadap Modulus Elastisitas dan Angka Poisson Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC) dengan Kapur sebagai Filler, *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Transportasi*, 2(2), 105-114.
- Zakeri, J. A dan Mosayebi, S. A., 2016, Study of Ballast Layer Stiffness in Railway Tracks. *Gradevinar*, 4, 311-381.