

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Balas adalah lapisan struktur granular dari substruktur kereta api dan terdiri dari partikel-partikel bergradasi antara 22 dan 63 mm. Fungsi utama lapisan balas adalah untuk memberikan fondasi yang solid dan seragam untuk bantalan, mentransmisikan dan mengurangi tekanan dari kereta yang dapat diterima untuk tanah dasar (D'Angelo et al., 2016). Menurut Indrarnatna et al. (2017), lapisan balas memberikan dukungan struktural terhadap tekanan dinamis tinggi yang ditransmisikan dari kereta yang bergerak. Lapisan balas juga memiliki struktur pori yang mendukung kemampuan drainase pada jalan rel kereta api (Tennakoon et al., 2012). Menurut D'Angelo et al. (2016), kemampuan balas untuk melakukan fungsi-fungsi ini sangat terkait dengan keadaan fisik perakitan, karakteristik material dan karakteristik beban. Struktur balas yang kotor dapat menyebabkan hilangnya kinerja mekanis dan percepatan penurunan geometri. Untuk menjaga stabilitas dan geometri trek pada tingkat kenyamanan dan keselamatan standar, sering diperlukan pemeliharaan, baik biasa (pemadatan) dan luar biasa (pembaruan). Namun, tindakan pemadatan yang sering dilakukan (pemeliharaan rutin konvensional), memberikan kontribusi yang signifikan terhadap degradasi balas. Proses degradasi balas dapat terjadi karena pecahnya partikel akibat tekanan internal yang tinggi antara partikel agregat yang berdekatan (Koozmishi et al., 2018).

Oleh karena itu untuk beralih ke infrastruktur kereta api yang berkelanjutan, metode baru pada tingkat desain dan strategi pemeliharaan harus diadopsi. Menurut D'Angelo et al. (2017), alternatif lebih lanjut untuk balas harus bertujuan untuk memperpanjang daya tahannya, terutama mengingat peningkatan yang pesat dalam kecepatan dan beban lalu lintas. Dalam beberapa dekade terakhir berbagai penulis telah mengusulkan solusi dan teknologi inovatif untuk memperkuat dan mengurangi degradasi pada lapisan balas. Dalam hal ini, penggunaan elemen elastis seperti karet remah yang dicampur dengan agregat balas dari bahan elastomer atau dari limbah karet ban, dapat memberikan pengurangan yang signifikan dalam kerusakan dan getaran. Menurut (Di Mino et al., 2012), lapisan balas dengan aspal

dapat mengurangi gaya dinamis di tanah dan dapat mengurangi getaran yang ditanggung oleh tanah sehingga mengurangi kemungkinan degradasi dan meningkatkan umur layanan jalan rel. Hal tersebut juga didukung oleh Mohammad et al. (2018), yang mengatakan bahwa solusi yang sangat efektif untuk meningkatkan stabilitas dan daya tahan struktur, mengurangi getaran, serta meminimalisir pemeliharaan yaitu penggunaan campuran aspal dalam konstruksi kereta api.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh D'Angelo et al. (2016), untuk meningkatkan daya tahan pada lapisan balas *Bitumen Stabilized Ballast (BSB)* dapat menjadi solusi baru untuk stabilisasi balas. Metode ini menggunakan cetakan *Precision Unbound Material Analyzer (PUMA)* dengan tinggi 150 mm dan diameter 150 mm. Material yang digunakan yaitu agregat, emulsi bitumen, dan air. Agregat yang digunakan adalah batu granit yang bersumber dari *Bardon Hill Quarry* di *Leicestershire*. Pemeriksaan fisik dan mekanik agregat dilakukan sesuai dengan Standar Eropa. Emulsi bitumen (BE) yang digunakan untuk menstabilkan balas adalah *Nymuls CP 50*, yang disediakan oleh *Nynas Bitumen*. Metode pemadatan yang digunakan adalah *vibration hammer (Kango)* dan pemadatan manual. Sampel diuji dengan menggunakan *NU loading frame*, yang umumnya digunakan di *UK* untuk pengujian sampel aspal dengan 200 Kpa pada tahap pertama dan 300 KPa pada tahap kedua. Perilaku yang lebih baik dan lebih stabil ketika dilakukan pemadatan dengan *vibration hammer*, sehingga pada tahap kedua hanya metode pemadatan tersebut yang digunakan. Balas kotor dan bersih dijadikan sebagai *baseline*. Hasil menunjukkan bahwa keseluruhan sampel yang ditambah emulsi bitumen menunjukkan regangan plastis yang lebih rendah daripada sampel *baseline*. *BSB* menunjukkan peningkatan kekakuan terkait dengan jumlah emulsi bitumen yang dituangkan (semakin tinggi semakin kaku) sehingga memiliki potensi umur layanan yang lebih tinggi pada lapisan balas.

Penelitian lanjutan yang dilakukan oleh D'Angelo et al. (2017) mengoptimalkan sifat emulsi bitumen dengan menyesuaikan kondisi balas di lapangan. Hasil menunjukkan bahwa stabilisasi bitumen secara keseluruhan meningkatkan ketahanan balas terhadap deformasi permanen dengan meningkatkan sifat kekakuan dan redaman.

Metode *Bitumen Stabilized Ballast (BSB)* kembali dikaji dalam penelitian Giunta et al. (2018) sebagai solusi inovatif yang dirancang untuk meningkatkan daya tahan balas dan mengurangi beban perawatan secara keseluruhan. Teknologi ini dapat digunakan untuk lapisan balas baru serta untuk memperkuat yang sudah ada. Terdiri dari penggunaan *bitumen emulsion (BE)* yang dituangkan atau disemprotkan ke lapisan balas, sehingga tidak diperlukan metode pemeliharaan konvensional balas yang cenderung mahal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi *BSB* yang digunakan sejak tahap konstruksi dan selama masa perawatan dapat memberikan penghematan ekonomis.

Penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh Lee et al. (2014) melakukan campuran aspal untuk lapisan balas menggunakan tiga pengikat aspal yang berbeda yaitu *PG64-22*, aspal modifikasi karet (*Crumb Rubber Modified*), dan aspal modifikasi *Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)* yang dikaji dalam parameter kerentanan kelembaban, deformasi permanen, dan retak kelelahan campuran aspal. *Dynamic Modulus* dan *Uniaxial Creep Test* dilakukan untuk mengetahui karakter sifat material campuran aspal. Hasil menunjukkan bahwa campuran aspal yang mengandung karet (*Crumb Rubber Modified*) dan aspal modifikasi *Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan aspal *PG64-22*. Elemen elastis seperti karet jika diaplikasikan pada jalur rel terutama lapisan balas memungkinkan pengurangan kerusakan dan getaran serta mendapatkan kekakuan vertikal yang optimal (Sanchez et al., 2014). Mohammad et al. (2018), mengatakan bahwa penggunaan remah karet dalam penggunaan campuran aspal akan meningkatkan umur kelelahan aspal hingga 7,2 kali pada tegangan rendah, dan dapat ditingkatkan lagi menjadi 9,4 kali pada tekanan tinggi dan 18,2 kali pada tekanan rendah ketika kandungan rongga udara pada campuran aspal modifikasi karet remah dikurangi dari 4% menjadi 2%.

Penggunaan aspal pada penelitian selanjutnya menggunakan karet ban bekas sepeda motor pada campuran lapisan balas. Analisa karakteristik campuran balas dengan aspal dan karet ban bekas (ukuran seragam 3/8" dan ukuran bergradasi (No.4, 3/8", 1/2", 3/4", 1") menggunakan alat uji kuat tekan *Micro-Computer Universal Testing Machine (UTM)* dengan beban 3000 kg. Kadar aspal yang digunakan adalah 3% dan penggunaan karet sebanyak 10%. Parameter dari

pengujian berupa deformasi vertikal dan abrasi material agregat dari lapisan balas. Hasil pengujian didapatkan bahwa penggunaan karet bekas sebanyak 10% dapat meningkatkan nilai deformasi vertikal karena dapat meningkatkan elastisitas lapisan balas, sedangkan penambahan aspal 3% dalam campuran balas sebagai pengikat dapat meningkatkan kekakuan lapisan balas. Selanjutnya, penggunaan karet bekas 10% dan aspal 3% dapat mengurangi nilai abrasi material pada lapisan balas secara signifikan dari 47% menjadi 80%. Maka penggunaan karet bekas 10% dan aspal 3% memiliki peran positif terhadap ketahanan balas dalam struktur jalur kereta api sehingga berpotensi digunakan sebagai solusi untuk meningkatkan umur layanan dan mengurangi biaya perawatan jalur kereta api (Setiawan et al., 2019a).

Selanjutnya Setiawan et al. (2019b) melakukan penelitian menggunakan material karet yang sama dengan penelitian sebelumnya sebagai campuran pada lapisan balas dengan variasi ukuran karet dan metode pemadatan yang berbeda pada tiap sampelnya. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa variasi ukuran karet bekas memiliki peran penting dalam meningkatkan durabilitas balas. Kemudian peningkatan pemadatan yang dilakukan hingga 100% hanya mampu meningkatkan modulus elastisitas sebesar 6% pada lapisan balas, namun dapat meningkatkan durabilitas balas hingga 38% dan kemampuan lapisan balas menahan beban hingga 70%.

Pada penelitian saat ini, campuran yang digunakan untuk modifikasi lapisan balas adalah aspal penetrasi 60/70 dengan kadar aspal sebanyak 2% dari berat benda uji yang dituang pada 1/3 dan 3/3 lapisan balas. Benda uji menggunakan balas bersih dan balas kotor dengan variasi lapisan aspal yang berbeda. Metode pemadatan dilakukan secara manual sebanyak 50 kali pada tiap 1/3 lapisan. Parameter pada penelitian saat ini yaitu berat benda uji, deformasi vertikal, tegangan dan regangan, modulus elastisitas, serta abrasi yang dianalisis dari hasil pembebanan sebesar 4000 kg pada dua siklus menggunakan alat *Micro-computer Universal Testing Machine (UTM)*.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Balas

Lapisan balas merupakan lapisan di atas tanah dasar yang berfungsi untuk menahan konstruksi bantalan sekaligus mampu meneruskan beban dari bantalan menuju ke tanah dasar dengan pola distribusi beban yang lebih merata (Rosyidi, 2015). Beberapa jenis material batuan yang dapat dijadikan sebagai material balas yang diklasifikasikan oleh AREA (*American Railway Engineering Assosiaton*) adalah batuan granit, *traprock*, *quartize*, karbon, dan *slag*.

Menurut Peraturan Menteri Perhubungan (PM No.60 Tahun 2012), persyaratan teknis yang harus dipenuhi oleh material pembentuk balas adalah:

1. Balas harus terdiri dari batu pecah (25 - 60) mm dan memiliki kapasitas ketahanan yang baik, ketahanan gesek yang tinggi dan mudah dipadatkan.
2. Material balas harus bersudut banyak dan tajam.
3. Porositas maksimum 3%.
4. Kuat tekan rata-rata maksimum 1000 kg/cm².
5. Berat jenis minimum 2,6.
6. Kandungan tanah, lumpur, dan organik maksimum 0,5%.
7. Kandungan minyak maksimum 0,2%.
8. Keausan balas sesuai hasil pengujian *Los Angeles* tidak boleh lebih dari 25%.

Menambahkan persyaratan di atas, menurut Peraturan Dinas (PD No.10 Tahun 1986), gradasi material agregat pada lapisan balas yang diperbolehkan untuk Kelas Jalan I dan II digunakan ukuran nominal 2½” – ¾”, sedangkan untuk Kelas Jalan III dan IV digunakan ukuran nominal 2” – 1” sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Persyaratan Gradasi Untuk Material Balas (Rosyidi, 2015)

Ukuran Nominal	Persen Lolos Saringan									
	3”	2½”	2”	1½”	1”	¾”	½”	⅜”	No.4	No.8
2½” – ¾”	100	90-100	25-60	25-60	-	0-10	0-5	-	-	-
2” – 1”	-	100	95-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-
1½” – ¾”	-	-	100	90-100	20-15	0-15	-	0-5	-	-

Untuk mendapatkan material pembentuk balas sesuai persyaratan yang telah disebutkan diatas dilakukan beberapa pengujian fisik dan mekanik yang diambil dalam Rosyidi (2015) pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Pengujian Fisik dan Mekanik Untuk Material Balas (Rosyidi, 2015)

No	Nama Pengujian	Deskripsi	Standar
1	Metode	Pengambilan sampel	ASTM C 702
	Persampelan	di lapangan	SNI 03-6802-2002
2	Analisis Saringan	Menguji gradasi material	ASTM C 136 SNI 03-1968-1990 SNI ASTM- C136:2012
		Material halus yang lolos saringan no.200	Menguji substansi material yang lolos saringan no.200
4	Berat jenis <i>bulk</i> dan absorpsi	Menentukan nilai BJ	ASTM C 127
		<i>Bulk</i> dan prosen material yang terabsorpsi	SNI 1969:2008 SNI 1970:2008
5	Prosen kandungan lempung dan partikel halus lain	Menentukan kadar prosen kandungan lempung dalam material dan partikel halus lainnya	ASTM C 142 RSNI3 4141:2014
		Ketahanan terhadap degradasi	Menguji nilai degradasi/kehancuran material
7	Ketahanan terhadap sodium sulfat atau dengan natrium sulfat	Menguji bahan agregat yang tahan terhadap reaksi sodium sulfat	ASTM C 88 SNI 3407:2008
		8	Berat unit

Tabel 2.2 (Lanjutan)

	Prosen partikel	Menentukan jumlah	
9	yang tipis dan panjang	partikel yang tipis dan panjang	ASTM D4791 RSNI T-01-2005

Pada penelitian tugas akhir ini, agregat yang dipakai sebagai material balas berukuran 2^{1/2}" hingga 3/4". Pengujian fisik yang dilakukan untuk memenuhi persyaratan material agregat balas pada penelitian ini adalah analisis saringan, pemeriksaan kandungan material halus yang lolos saringan No.200, berat jenis dan penyerapan air, serta ketahanan terhadap degradasi. Berikut pemaparan pengujian fisik pada material agregat balas:

1. Analisis saringan

Pemeriksaan material dengan metode analisis saringan ini ditujukan untuk mengetahui distribusi ukuran dari butir material balas. Untuk rentang ukuran butir material balas menurut Peraturan Menteri No.60 Tahun 2012 adalah 25 – 60 mm.

2. Pemeriksaan kandungan material halus yang lolos saringan No.200

Pemeriksaan kandungan material halus yang lolos saringan No.200 ini bertujuan untuk mengetahui persentase atau jumlah kandungan lempung pada agregat. Pengujian ini mengacu pada SNI 03-4142-1996 (BSN, 1996).

3. Berat Jenis

Berat jenis digunakan untuk mengetahui konversi dari berat dan volume bahan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui berat jenis curah kering (*bulk specific gravity*), berat jenis jenuh kering permukaan (*saturated surface dry*), berat jenis semu (*apparent specific gravity*), dan penyerapan air. Pengujian berat jenis ini sesuai dengan standar yang digunakan yaitu SNI 1969-2008 (BSN, 2008), tentang cara uji berat jenis dan penyerapan air dari agregat.

4. Ketahanan terhadap degradasi

Material balas memerlukan pemeriksaan durabilitas/ketahanan terhadap degradasi yang diperiksa dengan menggunakan percobaan abrasi *Los Angeles*. Pengujian ini dilakukan dengan standar acuan SNI 2417:2008 (BSN,2008), tentang cara uji keausan dengan mesin abrasi *Los Angeles*. Pengujian ini untuk mengetahui

ketahanan material balas terhadap proses pencampuran, pemadatan, repetisi beban maupun pelapukan dan perbedaan suhu.

2.2.2. Aspal

Konstruksi jalan rel di Indonesia belum memiliki spesifikasi khusus sebagai pedoman penggunaan campuran aspal pada struktur jalan rel. Namun, untuk penggunaan tipe aspal pada konstruksi jalan rel ini adalah aspal penetrasi 60/70, hal ini dikarenakan tipe aspal tersebut merupakan aspal yang cocok digunakan pada iklim yang ada di Indonesia. Pada penelitian ini mengacu pada penelitian sebelumnya dimana penggunaan kadar aspal yang digunakan adalah 2-3% berdasarkan berat total benda uji (D'Angelo et al., 2016). Adapun persyaratan pemeriksaan bahan aspal penetrasi 60/70 di Indonesia pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Persyaratan Aspal Penetrasi 60/70 (Kementrian PU, 2010)

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Hasil	Satuan
1	Penetrasi pada suhu 25°C	SNI 2432:2011	60-70	0,1 mm
2	Titik Lembek	SNI 2434:2011	≥ 48	°C
3	Daktilitas pada suhu 25°C	SNI 06-2432-1991	≥ 100	Cm
4	Berat Jenis	SNI 2441:2011	0,1	-
5	Berat yang Hilang	SNI 06-2441-1991	≤ 0,8	%

Penggunaan aspal penetrasi 60/70 pada campuran struktur lapisan balas berfungsi sebagai pengikat dan diharapkan dapat meningkatkan durabilitas dari lapisan balas.

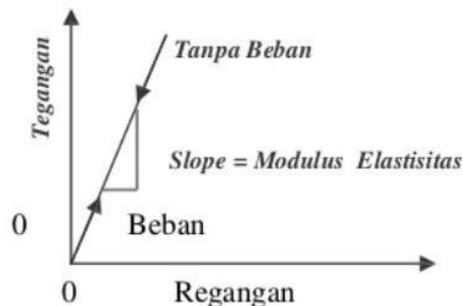
2.2.3. Uji Tekan

Uji tekan merupakan pengujian yang cocok dilakukan pada semua benda padat yang akan mengalami perubahan bentuk jika diberi pembebanan. Hal ini sangat bergantung pada besarnya beban yang diterima, kondisi fisik material pada benda uji, suhu, kecepatan pembebanan, serta sifat mekanik benda uji tersebut. Untuk pengujian kuat tekan ini mengacu pada SNI 03-1974:1990 (BSN,1990)

mengenai tata cara uji tekan beton. Pada penelitian ini, uji tekan dengan alat *Micro-computer Universal Testing Machine*.

2.2.4. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan ukuran atau tingkat kekakuan suatu bahan. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas maka semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi apabila diberi gaya (Wiyono et al., 2012). Menurut Sehonanda et al. (2013), modulus elastisitas merupakan besaran yang menggambarkan tingkat elastisitas bahan. Modulus elastisitas disebut juga modulus Young (diberi lambang Y). Grafik dari tegangan pada sumbu Y dan regangan sumbu X menghasilkan hubungan linier seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Grafik Modulus Elastisitas (Sehonanda et al., 2013)

. Secara eksperimental, modulus elastisitas ini dapat ditentukan dari perhitungan berdasarkan rumus empiris atau dengan pengukuran *slope* (kemiringan) kurva tegangan-regangan. Rumus yang digunakan sebagai berikut:

1. Menentukan regangan menggunakan persamaan 2.1.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan,

ε = Regangan (%)

ΔH = Perubahan tinggi benda uji (mm)

H_0 = Tinggi benda uji awal (mm)

2. Menentukan nilai tegangan aksial (σ) dengan persamaan 2.2.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan,

σ = Tegangan aksial (KPa)

P = Beban aksial yang bekerja (kN)

A = Luas penampang (m^2)

3. Menentukan nilai modulus elastisitas dengan persamaan 2.3.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan,

E = Modulus elastisitas (MPa)

σ = Tegangan aksial (MPa)

ε = Regangan (%)