

SKRIPSI

**ANALISIS KEKUATAN KOMPOSIT KAYU SEBAGAI
PENGANTI BAHAN *SLEEPER* PADA REL
KERETA API**



ZULKIFLI

D211 14 520

**JURUSAN MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2021

SKRIPSI

**ANALISIS KEKUATAN KOMPOSIT KAYU SEBAGAI
PENGANTI BAHAN *SLEEPER* PADA REL
KERETA API**

OLEH :

**ZULKIFLI
D211 14 520**

**Merupakan Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS KEKUATAN KOMPOSIT KAYU SEBAGAI PENGGANTI BAHAN
SLEEPER PADA REL KERETA API**

Disusun dan diajukan oleh

ZULKIELI

D211 14 520

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada Tanggal 3 Agustus 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping

Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT
NIP. 19740415 199903 1 001

Dr. Hairul Arsyid, ST., MT
NIP. 19750322 200212 1 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T.
NIP. 19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Zulkifli
Nim : D211 14 520
Program Studi : Departemen Teknik Mesin
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Kekuatan Kopolit Kayu Sebagai Pengganti Bahan Sleeper Pada Rel
Kereta Api

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 11 Agustus 2021

Yang menyatakan



Zulkifli

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : ZULKIFLI

Tempat Tanggal Lahir : Majene 06, November 1995

Jenis Kelamin : Laki- Laki

Alamat : Jl.Poros Malino, Gowa

HP : 082348291748

Email : zulkifligempakopregrasstyle@gmail.com

Riwayat Pendidikan :

- SD NEGERI 31 TEPPPO (2002-2008)
- SMP NEGERI 1 MAJENE (2008-2011)
- SMK NEGERI 5 MAJENE (2011-2014)
- UNIVERSITAS HASANUDDIN (2014-2021)

Riwayat Organisasi :

- HMM FT UH
- OKFT UH
- UKM PANTUN DAN SENI KREATIF UNHAS
- FORUM KREATIFITAS PEMUDA SUL-SEL

ABSTRAK

ZULKIFLI, Analisis Kekuatan Komposit Kayu Sebagai Pengganti Bahan *Sleeper* pada Rel Kereta Api (dibimbing oleh Dr. Eng. Lukman Hakim Arma, ST.,MT dan Dr. Hairul Arsyad, ST.,MT)

Penelitian ini bertujuan 1) Untuk mengetahui perbandingan berat dan volume *sleeper* komposit kayu kelapa dan kayu jati. 2) Untuk mengetahui perbandingan sifat tekuk *sleeper* komposit kayu kelapa dan kayu jati. 3) Untuk mengetahui pengaruh orientasi *filling material* dalam kayu komposit terhadap sifat mekanik

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan di Labolatorium Material Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Gowa jalan poros Malino Sulawesi Selatan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa berat *sleeper* secara horizontal pada kayu kelapa radial (HKKr) yaitu sebesar 750 gram dengan volume 97732,5 mm³. Sedangkan berat *sleeper* kayu jati radial secara horizontal yaitu sebesar 556 gram dengan volume 98125 mm³. Sehingga dapat disimpulkan bahwa yang paling berat adalah *sleeper* komposit kayu kelapa. Filling Horizontal kayu kelapa tangensial (HKKt) memiliki nilai sebesar 78,75 MPa dengan sifat tekuk kelenturan berada pada kelas II kuat. Sedangkan *sleeper* kayu jati tangensial filling horizontal memiliki nilai sebesar 74,24 MPa berada pada kelas II Kuat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa walaupun sama-sama berada pada kelas II tapi kayu kelapa memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan kayu jati dengan selisih nilai 4,5 MPa. Permukaan tangensial menyebabkan peningkatan nilai kekuatan *sleeper*, dimana permukaan tangensial memiliki lebar yang lebih besar dibanding permukaan radial. Kekuatan tekuk dengan nilai tertinggi berada pada horizontal kayu kelapa tangensial (HKKt) dibandingkan horizontal kayu jati tangensial (HKJt). Sehingga dapat disimpulkan bahwa *filling material* komposit memiliki nilai kekuatan yang besar jika direkayasa secara horizontal. Hal tersebut dikarenakan arah horizontal memiliki volume yang rata-rata lebih besar dibandingkan filling material komposit secara vertical.

Kata Kunci : Komposit Kayu, Sleeper dan Rel Kereta

ABSTRACT

ZULKIFLI, Analysis of the Strength of Wood Composites as a Substitute for Sleeper Materials on Railway Tracks (supervised by Dr. Eng. Lukman Hakim Arma, ST.,MT and Dr. Hairul Arsyad, ST.,MT)

This study aims 1) To determine the weight and volume ratio of the composite sleeper of coconut wood and teak wood. 2) To compare the buckling properties of the composite sleeper of coconut wood and teak wood. 3) To determine the effect of filling material orientation in composite wood on mechanical properties

This study uses an experimental method carried out at the Mechanical Engineering Materials Laboratory, Faculty of Engineering, Hasanuddin University. Gowa the Malino axis, South Sulawesi

The results showed that the horizontal weight of the sleeper on radial coconut wood (HKKr) was 750 grams with a volume of 97732.5 mm³. While the horizontally radial teak sleeper weighs 556 grams with a volume of 98125 mm³. So it can be concluded that the heaviest is the coconut wood composite sleeper. The horizontal filling of tangential coconut wood (HKKt) has a value of 78.75 MPa with flexural buckling properties being in strong class II. While the sleeper of teak wood tangential horizontal filling has a value of 74.24 MPa which is in class II Strong. So it can be concluded that although both are in class II, coconut wood has a greater value than finished wood with a difference of 4.5 MPa in value. The tangential surface causes an increase in the sleeper strength value, where the tangential surface has a wider width than the radial surface. The buckling strength with the highest value is in the horizontal tangential coconut wood (HKKt) compared to the horizontal tangential teak wood (HKJt). So it can be concluded that the composite material filling has a high strength value if it is engineered horizontally. This is because the horizontal direction has a larger average volume than the vertical filling of composite materials.

Keywords: Wood Composite, Sleeper and Railroad

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah S.W.T, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul **“ANALISIS KEKUATAN KOMPOSIT KAYU SEBAGAI PENGGANTI BAHAN *SLEEPER* PADA REL KERETA API “**.

Penyusunan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan suatu studi untuk memperoleh gelar Srata pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangkai penyusunan tugas akhir ini, berbagai pihak telah banyak memmberikan dorongan, bantuan serta masukan sehingga dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kash kepada dosen pembimbing dan laboran yang telah membantu saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa naskah tugas akhir ini masih banyak kekurangan oleh karena itu segala kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan demi perbaikan tugas akhir ini. Akhirnya semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan perkeretaapian di Indonesia pada umumnya khususnya di Sulawesi Selatan

Gowa, 20 Juli 2021

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL.....	i
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR GRAFIK	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Landasan Teori	5
2.2 Sejarah Rel Kereta Api	5
2.3 Prinsip Rel Kereta Api	6
2.4 Konstruksi Jalan Rel Kereta Api	7
2.4.1. <i>Formation Layer</i>	7
2.4.2. <i>Sub-Ballast dan Ballast</i>	8
2.5 Komponen Penyusun Rel Kereta api	10
2.5.1. Batangan Besi Baja	11
2.5.2. Bantalan Rel	12
2.5.3. Plat Landas	12

2.5.4. Penambat Rel.....	14
2.5.5. Plat Besi Penyambung	16
2.5.6. <i>Rail Anchor</i>	17
2.5.7. Komponen Utama dalam Struktur Jalan Rel	18
2.6 Gaya Yang Ditimbulkan Oleh Kereta Api	18
2.7 Bahan Penyusun Struktur Rel	20
2.8 <i>Sleeper</i> Kayu	23
2.8.1. Syarat Mutu, Kekuatan dan Keawetan Bantalan Kayu	23
2.8.2. Contoh Kayu Bantalan	25
2.8.3. Umur Kayu Bantalan	25
2.8.4. Ukuran Bantalan Kayu	26
2.8.5. Syarat Kekuatan Bantalan Kayu	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat	28
3.2 Metode Pengambilan Data	28
3.3 Alat dan Bahan	28
3.4 Diagram Alir Penelitian	32
3.5 Prosedur Pembuatan Spesimen Uji	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil Penelitian	37
4.1.1. <i>Sleeper</i> Kayu Hasil Rancangan	37
4.1.2. Pengujian <i>Sleeper</i> Kayu Komposit	40
4.1.3. Hasil Pengujian Dari Mesin Tarik Dan Tekuk	41
4.2. Pembahasan	56
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pembagian kelas jalan rel di Indonesia	20
Tabel 2.2	Koefisien balas yang dipengaruhi oleh kondisi <i>ballast</i>	22
Tabel 2.3	Contoh jenis kayu untuk bantalan	24
Tabel 2.4	Momen Maksimum Bantalan Kayu	26
Tabel 2.5	Tegangan Ijin Kayu Kelas Kuat I dan II	27
Tabel 4.1	Ukuran Dimensi dan Berat dari setiap specimen	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Rel kereta api dilihat lebih dekat	2
Gambar 2.1	Rel Api	6
Gambar 2.2	Mesin pemecok <i>ballast</i>	10
Gambar 2.3	Skema konstruksi rel	10
Gambar 2.4	Jenis-jenis Bantalan (<i>Sleeper</i>)	13
Gambar 2.5	Plat Landas	14
Gambar 2.6	Penambat Rel	15
Gambar 2.7	Penambat Elastis	16
Gambar 2.8	Plat besi penyambung	17
Gambar 2.9	Rail Anchor	17
Gambar 2.10	Distribusi beban roda pada <i>sleeper</i> berurutan.....	20
Gambar 2.11	Spesifikasi rel kereta api di Indonesia	20
Gambar 2.12	Potongan melintang <i>ballast</i>	22
Gambar 2.13	Mata kayu (d1) pada bantalan	24
Gambar 2.14	Arah retak radial dan lingkaran tumbuh	24
Gambar 3.1	Gerinda.....	28
Gambar 3.2	Mata gerinda.....	29
Gambar 3.3	Bor meja	29
Gambar 3.4	Mata bor	30
Gambar 3.5	Kayu	30
Gambar 3.6	Serbuk Besi Hasil permesinan Gerinda.....	31
Gambar 3.7	Serbuk Semen Hasil Tadahan	31
Gambar 3.8	Bagan Alur Penelitian	32
Gambar 3.9	3D Spesimen uji penlubangan arah vertical	33
Gambar 3.10	Tampak atas, samping, depan Spesimen uji dengan arah vertikal lengkap dengan ukurannya	34
Gambar 3.11	3D Spesimen uji penlubangan arah horizontal	34
Gambar 3.12	Tampak atas, samping, depan Spesimen uji dengan arah horizontal lengkap dengan ukurannya	35

Gambar 3.13	Arah gaya Tekuk pada pengujian bending Spesimen dengan arah filler horizontal	36
Gambar 3.14	Arah gaya tekuk pada pengujian bending spesimen dengan arah filler vertikal	36
Gambar 4.1	(A) Hasil Rancangan Sleeper Komposit Kayu Jati Arah Filler Horizontaln (B) Hasil Rancangan Sleeper Komposit Kayu Kelapa Arah Filler Horizontal	37
Gambar 4.2	(A) Hasil Rancangan Sleeper Komposit Kayu Kelapa Arah filler Vertikal (B) Hasil Rancangan Sleeper Komposit Kayu jati Arah filler Vertikal	38
Gambar 4.3	(A) Pengukuran Dimensi Sleeper Komposit Kayu jati, (B) Pengukuran Dimensi Sleeper Komposit Kayu Kelapa	38
Gambar 4.4	(A) Pengukuran Berat Sleeper Komposit arah filler vertical (B) Pengukuran Berat Sleeper Komposit arah filler vertical	37
Gambar 4.5	Posisi Permukaan Tangensial Dan Permukaan Radial	40
Gambar 4.6	(A) Setting tata letak tumpuan, (B) Set-up specimen posisi bending atau pembebanan	40
Gambar 4.7	(A) Sketsa hasil uji bending permukaan radial Spesimen uji, (B) Hasil uji bending permukaan radial Spesimen uji	41
Gambar 4.8	(A) Sketsa hasil uji bending permukaan tangensial Spesimen uji (B) Hasil uji bending permukaan tangensial Spesimen uji	40
Gambar 4.9	Grafik 1 Kekuatan Kayu Kelapa Permukaan Radial	42
Gambar 4.10	Grafik 2 Berat Kayu Kelapa Permukaan Radial	44
Gambar 4.11	Grafik 3 Volume Lubang Filler Kayu Kelapa Permukaan Radial	45
Gambar 4.12	Grafik 4 Kekuatan Kayu jati Permukaan Radial	45
Gambar 4.13	Grafik 5 Berat Kayu Jati Permukaan Radial	47
Gambar 4.14	Grafik 6 Valume Lubang Filler Kayu Jati Permukaan Radial	48

Gambar 4.15	Grafik 7 Kekuatan Kayu Kelapa Permukaan Tangensial	49
Gambar 4.16	Grafik 8 Berat Kayu Kelapa Permukaan Tangensial	51
Gambar 4.17	Grafik 9 Volume Lubang Filler kayu Kelapa Permukaan Tangensial	52
Gambar 4.18	Grafik 10 Kekuatan Kayu Jati Permukaan Tangensial	52
Gambar 4.19	Grafik 11 Berat Kayu Jati Permukaan Tangensial	54
Gambar 4.20	Grafik 12 Lubang Filler Kayu Jati Permukaan Tangensial ...	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran.1	Perhitungan Kekuatan Tekuk	61
Lampiran.2	Proses Pemotongan Komposit Kayu	62
Lampiran.3	Proses meratakan atau memperhalus Permukaan balok.....	62
Lampiran.4	Proses Penempelan tanda untuk dilubangi	63
Lampiran.5	Proses pelubangan dengan arah vertical.....	63
Lampiran.6	Proses pelubangan dengan arah horizontal	64
Lampiran.7	Balok yang telah dilubang arah vertical	64
Lampiran.8	Balok yang telah dilubang arah horizontal.....	65
Lampiran.9	Serbuk besi hasil permesinan gerinda.....	65
Lampiran.10	Penyaringan serbuk besi	66
Lampiran.11	Serbuk besi yang sudah disaring	66
Lampiran.12	Campuran semen dengan serbuk besi.....	67
Lampiran.13	Campuran semen dan serbuk besi dengan air yang siap untuk jadi material pengisi	67
Lampiran.14	Pengujian kayu kelapa pada permukaan radial	68
Lampiran.15	Pengujian kayu jati pada permukaan radial	69
Lampiran.16	Pengujian kayu jati pada permukaan tangensial.....	69
Lampiran.17	<i>Sleeper</i> kereta api type BT25 S35 E68	70

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan pertumbuhan penduduk yang sangat pesat. Hal itu mendorong pergerakan manusia sangat cepat pula. Untuk menunjang pergerakan manusia itu membutuhkan moda massal yang aman, cepat, dan nyaman. Kereta api nampaknya menjadi salah satu pilihan moda transportasi yang dapat memenuhi faktor-faktor tersebut. Hal itu ditandai dengan semakin padatnya lalu lintas darat melalui jalan rel.

Struktur rel kereta api merupakan hal yang perlu di perhatikan seiring dengan padatnya transportasi yang melalui jalan rel. Struktur rel kereta api yang kuat dan dapat menahan beban yang besar akan mendukung kinerja dari kereta api secara optimal. Namun itu semua bukanlah tanpa masalah, struktur rel kereta yang berbeda di atas tanah lunak menimbulkan berbagai kendala. Permasalahan pada tanah lunak adalah rendahnya daya dukung tanah, sehingga dikhawatirkan tanah tidak mampu menahan beban yang besar akibat dari pergerakan kereta api secara berulang-ulang. Selain itu tanah lunak juga mempunyai potensi mengalami penurunan yang cukup besar, dimana hal tersebut dapat mengakibatkan rel kereta api anjlok”.

Upaya yang diyakini mampu untuk menangani hal tersebut adalah penguatan struktur rel. Penguatan struktur tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu dengan merekayasa bantalan rel kereta api, dan lain-lain. Merekayasa *sleeper* rel (bantalan rel) kereta api adalah salah satu cara untuk meredam getaran pada rel kereta api. Keunggulan dari bantalan rel kereta api yang di rekayasa adalah biaya yang murah, mudah di dapat, dan pelaksanaannya cukup sederhana. Dengan merekayasa bantalan rel kereta api, diharapkan dapat menanggulangi permasalahan-permasalahan tersebut.

Di ikat pada *sleeper* dengan menggunakan paku rel, sekrup penambat, atau Rel adalah logam batang untuk landasan jalan kereta api atau kendaraan sejenis

seperti trem dan sebagainya. Rel mengarahkan/memandu kereta api tanpa memerlukan pengendalian. Rel merupakan dua batang logam kaku yang sama panjang dipasang pada bantalan sebagai dasar landasan. Jenis penambat yang digunakan bergantung kepada jenis *sleeper*. Paku ulir atau paku penambat digunakan pada *sleeper* kayu, sedangkan penambat "e" digunakan untuk *sleeper* beton atau semen.

Pada dasarnya konstruksi jalan rel kereta api terdiri atas dua bagian. Bagian bawah adalah *track foundation* atau lapisan landasan/Pondasi, dan bagian atas adalah *rail track structure* atau sSruktur Trek Rel. Prinsipnya, jalan rel kereta api harus dapat mentransfer tekanan yang diterimanya dengan baik yang berupa beban berat (*axle load*) dari rangkaian kereta api melintas. Dalam arti, jalan rel kereta api harus tetap kokoh ketika dilewati rangkaian kereta api, sehingga rangkaian kereta api dapat melintas dengan cepat, aman, dan nyaman. Roda-roda kereta api yang melintas akan memberikan tekanan berupa beban berat (*axle load*) ke permukaan trek rel. Oleh batang rel (*rails*) tekanan tersebut diteruskan ke *sleeper* yang ada dibawahnya. Lalu, dari *sleeper* akan diteruskan ke lapisan *ballast* dan *sub-ballast* di sekitarnya. Oleh lapisan *ballast*, tekanan dari *sleeper* ini akan disebar ke seluruh permukaan tanah disekitarnya, untuk mencegah amblesnya trek rel.



Gambar 1.1 Rel kereta api dilihat lebih dekat

Rel biasanya dipasang di atas badan jalan yang dilapis dengan batu kerikak atau dikenal sebagai *Balast*. *Balast* berfungsi pada rel kereta api untuk meredam

getaran dan lenturan rel akibat beratnya kereta api (PT.Kereta Api Indonesia Persero 2017). Untuk merekayasa *sleeper rel* ada beberapa cara yang dilakukan pertama yaitu dengan mengidentifikasi kondisi atau daerah yang akan dipasang bantalan rel, misalnya berhubungan dengan tanah lembab, serangan rayap, serangan bubuk kayu kering, setelah mengidentifikasi tahap selanjutnya yaitu pemilihan kayu yang berkualitas dari segi kekuatan dan mutu sesuai dengan Peraturan Dinas Nomor 10 tahun 1986 tentang ukuran bantalan kayu. Kelebihan bantalan kayu pada rel kereta api yaitu 1) memiliki elastisitas yang baik, mampu meredam getaran, sentakan dan kebisingan, 2) ringan dan mudah dibentuk sesuai ukuran yang dikehendaki, 3) memudahkan dalam penggantian bantalan.

Berdasarkan permasalahan yang ada dan solusi yang dapat digunakan sangat menarik untuk dilakukan penelitian lebih lanjut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana rekayasa *sleeper* dapat digunakan untuk mengatasi masalah rel kereta api yang ada di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perbandingan berat dan volume *sleeper* komposit kayu kelapa dan kayu jati secara horizontal ?
2. Bagaimana perbandingan sifat tekuk *sleeper* komposit kayu kelapa dan kayu jati secara horizontal ?
3. Bagaimana pengaruh orientasi *filling material* dalam kayu komposit terhadap sifat mekanik ?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui perbandingan berat dan volume *sleeper* komposit kayu kelapa dan kayu jati.
2. Untuk mengetahui perbandingan sifat tekuk *sleeper* komposit kayu kelapa dan kayu jati.
3. Untuk mengetahui pengaruh orientasi *filling material* dalam kayu komposit terhadap sifat mekanik.

1.4. Batasan Masalah

Untuk memfokuskan agar penelitian dapat terarah, maka perlu batasan-batasan masalah penelitian antara lain :

1. Penelitian yang dilakukan berupa permodelan di laboratorium.
2. Sistem *sleeper* rel kereta api yang di rekayasa menggunakan model dan ukuran yang sebenarnya dan m enguji material aslinya.
3. Kayu yang digunakan kayu jati dan kayu kelapa dari jenis yang sama.
4. Kayu di buat beberapa lubang berdiameter 1 cm dan *filling material* di masukkan di bagian lubang pada kayu.
5. Pada penelitian ini menggunakan varian lubang dengan arah horizontal dan vertikal masing-masing memiliki volume lubang yang sama.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat pada penelitian ini adalah :

1. Manfaat Teoritis
 - a. Pengembangan ilmu pengetahuan di bidang ilmu Teknik Mesin terutama pengaruh perkuatan rel kereta api dengan merekayasa *sleeper* rel kereta api.
 - b. Mengetahui perilaku sistem rel kereta api pada bagian peredaman getaran rel kereta api.
2. Manfaat Praktis

Manfaat merekayasa *sleepee* rel kereta api untuk menganalisis peredaman getaran dan perkuatan struktur dalam perencanaan di lapangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

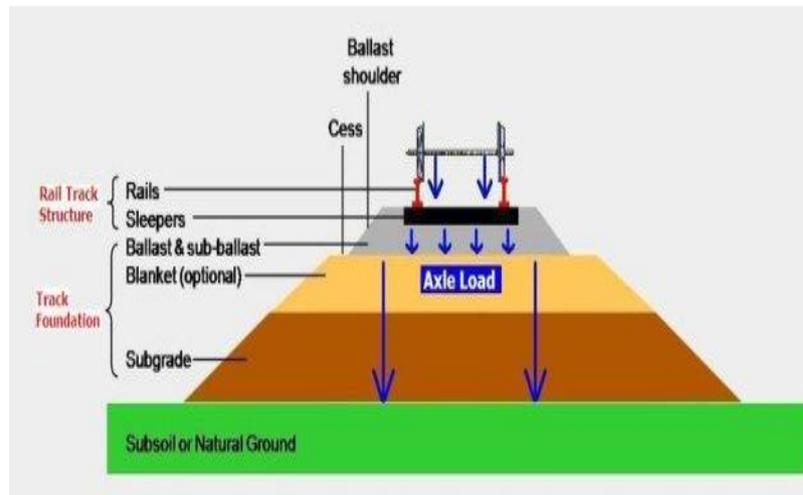
2.1 Landasan Teori

Jalan rel kereta api (*UK: Railway Tracks, US: Railroad Tracks*) atau biasa disebut dengan rel kereta api, merupakan prasarana utama dalam perkeretaapian dan menjadi ciri khas moda transportasi kereta api. Ya, karena rangkaian kereta api hanya dapat melintas di atas jalan yang dibuat secara khusus untuknya, yakni rel kereta api. Rel inilah yang memandu rangkaian kereta api bergerak dari satu tempat ke tempat yang lain.

Dalam pengamatan secara awam, kita melihat rel sebagai jalan untuk lewat kereta api yang terdiri atas sepasang batang rel berbahan besi baja yang disusun secara paralel dengan jarak yang konstan (tetap) antara kedua sisinya. Batang rel tersebut ditambat (dikaitkan) pada *sleepee* yang disusun secara melintang terhadap batang rel dengan jarak yang rapat, untuk menjaga agar rel tidak bergeser atau renggang.

2.2 Sejarah Rel Kereta Api

Prinsip jalan rel telah berkembang sejak 2.000 tahun yang lalu. Waktu itu sarana transportasi untuk mengangkut penumpang dan barang masih sangat sederhana, yaitu dengan menggunakan kereta roda. Jalan yang dilewati masih berupa jalan tanah yang berdebu. Ketika jalan tanah tersebut diguyur hujan, kondisinya menjadi lembek dan kereta roda yang lewat meninggalkan bekas cekungan pada tanah. Setelah kering, cekungan tersebut mengeras, dan beberapa kereta roda yang lewat berikutnya juga melewati cekungan tersebut. Ternyata dengan mengikuti cekungan tersebut, kereta roda dapat berjalan dengan lebih terarah dan gampang, pengendara tinggal mengatur kecepatan kereta tanpa repot-repot lagi mengendalikan arah kereta roda. Kemudahan transportasi dengan prinsip jalur rel inilah, yang membuat jalur rel memiliki keunggulan tersendiri, sehingga terus berkembang hingga menjadi jalur rel kereta api yang kita kenal sekarang ini.



Gambar 2.1 Rel Api

2.3 Prinsip Rel Kereta Api

Kereta api berjalan dengan roda besi, sehingga membutuhkan jalan khusus agar dapat berjalan dengan baik. Untuk itulah dibuat jalan rel kereta api dengan permukaan baja, sehingga roda baja kereta api beradu dengan jalan rel dari baja. Jalan baja ini memiliki karakteristik dan syarat-syarat khusus yang berbeda dengan jalan aspal, sehingga konstruksinya lebih rumit dan melibatkan banyak komponen. Jalan rel kereta api harus dibangun dengan kokoh, karena setiap rangkaian kereta api yang lewat memiliki beban yang berat, apalagi setiap harinya akan dilalui berulang kali oleh beberapa rangkaian kereta api. Oleh karena itu, konstruksi rel kereta api dibuat sebaik mungkin agar mampu menahan beban berat atau istilahnya *BEBAN GANDAR (AXLE LOAD)* dari rangkaian kereta api yang berjalan di atasnya, sehingga jalan baja ini dapat bertahan dalam waktu yang lama dan memungkinkan rangkaian kereta api dapat berjalan dengan cepat, aman dan nyaman.

Pada dasarnya konstruksi jalan rel kereta api terdiri atas 2 bagian. Bagian bawah adalah *Track Foundation* atau Lapisan Landasan/Pondasi, dan bagian atas adalah *Rail Track Structure* atau Struktur Trek Rel. Prinsipnya, jalan rel kereta api harus dapat mentransfer tekanan yang diterimanya dengan baik yang berupa beban berat (*axle load*) dari rangkaian kereta api melintas. Dalam arti, jalan rel kereta api harus tetap kokoh ketika dilewati rangkaian kereta api, sehingga

rangkaian kereta api dapat melintas dengan cepat, aman, dan nyaman. Roda-roda kereta api yang melintas akan memberikan tekanan berupa beban berat (*axle load*) ke permukaan trek rel. Oleh batang rel (*rails*) tekanan tersebut diteruskan ke bantalan (*sleepers*) yang ada dibawahnya. Lalu, dari *sleepers* akan diteruskan ke lapisan *ballast* dan *sub-ballast* di sekitarnya. Oleh lapisan *ballast*, tekanan dari *sleepers* ini akan disebar ke seluruh permukaan tanah disekitarnya, untuk mencegah amblesnya trek rel.

2.4 Konstruksi Jalan Rel Kereta Api

Prinsipnya, lapisan landasan (*track foundation*) ini dibuat untuk menjaga kestabilan trek rel saat rangkaian kereta api lewat. Sehingga trek rel tetap berada pada tempatnya, tidak bergoyang-goyang, tidak ambles ke dalam tanah, serta kuat menahan beban rangkaian kereta api yang lewat. Selain itu, lapisan landasan juga berfungsi untuk mentransfer beban berat (*axle load*) dari rangkaian kereta api untuk disebar ke permukaan bumi (pada gambar di atas adalah *Subsoil/Natural Ground*).

Lapisan landasan merupakan lapisan yang harus dipersiapkan terlebih dahulu sebelum membangun trek rel, sehingga posisinya berada di bawah trek rel dan berfungsi sebagai pondasi. Sebagaimana struktur pondasi pada suatu bangunan, lapisan landasan juga tersusun atas lapisan-lapisan material tanah dan bebatuan, diantaranya :

2.4.1 Formation Layer

Formation layer merupakan perkerjaan pemadatan tanah sebagai pondasi trek rel kereta api. *Formation layer* ini dipersiapkan sebagai tempat ditaburkannya lapisan *ballast*. Lapisan ini berupa campuran tanah, pasir, dan lempung yang diatur tingkat kepadatan dan kelembapan airnya. Pada Negara-negara maju yang lintasan kereta apinya sangat padat, ditambahkan lapisan *Geotextile* di bawah *formation layer*. *Geotextile* adalah material semacam kain yang bersifat permeable yang terbuat dari polipropilena atau polyester yang berguna untuk memperlancar drainase dari atas ke bawah (*subgrade ke subsoil*), dan sekaligus memperkuat *formation layer*.

2.4.2 *Sub-ballast Dan Ballast*

Lapisan ini disebut pula sebagai *Tack Bed*, karena fungsinya sebagai tempat pembaringan trek rel kereta api. Lapisan *Ballast* merupakan suatu lapisan berupa batu-batu berukuran kecil yang ditaburkan di bawah trek rel, tepatnya di bawah, samping, dan sekitar bantalan rel (*sleepers*). Bahkan terkadang dijumpai bantalan rel yang “tenggelam” tertutup lapisan *ballast*, sehingga hanya terlihat batang relnya saja.

Fungsi lapisan *ballast* adalah:

1. untuk meredam getaran trek rel saat rangkaian kereta api melintas,
2. menyebarkan *axle load* dari trek rel ke lapisan landasan di bawahnya, sehingga trek rel tidak ambles,
3. menjaga trek rel agar tetap berada di tempatnya,
4. sebagai lapisan yang mudah direlokasi untuk menyesuaikan dan meratakan ketinggian trek rel (*Levelling*),
5. memperlancar proses drainase air hujan,
6. mencegah tumbuhnya rumput yang dapat mengganggu drainase air hujan.

Ballast yang ditabur biasanya adalah batu kricak (bebatuan yang dihancurkan menjadi ukuran yang kecil) dengan diameter sekitar 28-50 mm dengan sudut yang tajam (bentuknya tidak bulat). Ukuran partikel *ballast* yang terlalu kecil akan mengurangi kemampuan drainase, dan ukuran yang terlalu besar akan mengurangi kemampuannya dalam mentransfer *axle load* saat rangkaian kereta api melintas. Dipilih yang sudutnya tajam untuk mencegah timbulnya rongga-rongga di dalam taburan *ballast*, sehingga lapisan *ballast* tersebut susunannya menjadi lebih rapat.

Ballast ditaburkan dalam dua tahap. Pertama saat sebelum perakitan trek rel, yakni ditaburkan diatas *formation layer* dan menjadi *track bed* atau “kasur” bagi bantalan rel, agar bantalan tidak bersentuhan langsung dengan lapisan tanah. Karena jika bantalan langsung bersentuhan dengan tanah (*formation layer*) bisa-bisa bantalan tersebut akan ambles, karena *axle load* yang diterima bantalan langsung menekan frontal ke bawah karena

ketiadaan *ballast* untuk menyebarkan *axle load*. Kedua ketika trek rel selesai dirakit, untuk menambah ketinggian lapisan *ballast* hingga setinggi bantalan, mengisi rongga-rongga antarbantalan, dan di sekitar bantalan itu sendiri. *Ballast* juga ditabur disisi samping bantalan hingga jarak minimal 50cm dengan kemiringan (*sloef*) tertentu sehingga membentuk “bahu” *ballast* yang berfungsi menahan gerakan lateral dari trek rel. Padakusus tertentu, sebelum *ballast*, ditaburkan terlebih dahulu lapisan *sub-ballast*, yang berupa batu kricak yang berukuran lebih kecil. Fungsinya untuk memperkuat lapisan *ballast*, meredam getaran saat rangkaian kereta api lewat, dan sekaligus menahan resapan air dari lapisan blanket dan *subgrade* di bawahnya agar tidak merembes ke lapisan *ballast*.

Ketebalan lapisan *ballast* minimal 150 mm hingga 500 mm, karena jika kurang dari 150 mm menyebabkan mesin pecok ballast (*Plasser and Theurer Tamping Machine*) justru akan menyentuh *formation layer* yang berupa tanah, sehingga bercampurilah *ballast* dengan tanah, yang akan mengurangi elastisitas *ballast* dalam menahan trek rel dan mengurangi kemampuan drainasenya. Secara periodik, dilakukan perawatan terhadap lapisan *ballast* dengan dibersihkan dari lumpur dan debu yang mengotorinya, dipecok, atau bahkan diganti dengan yang baru. Untuk itu, dilakukan perawatan dengan mesin khusus yang diproduksi oleh *Plasser and Theurer Austria*. Di Indonesia ada mesin pemecok *ballast* (*Ballast Tamping Machine*) untuk mengembalikan *ballast* yang telah bergeser ke tempatnya semula, sekaligus merapatkan lapisan *ballast* di bawah bantalan agar bantalan tidak bersinggungan langsung dengan tanah.

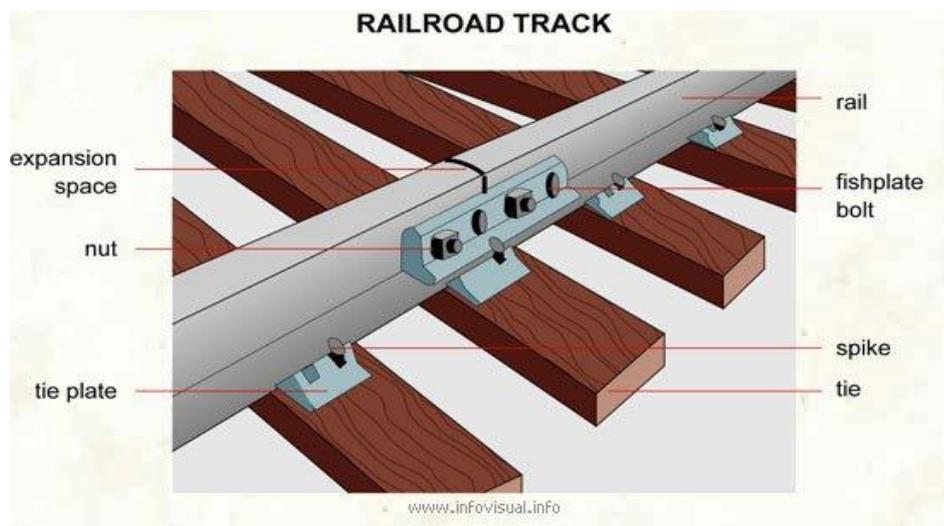


Gambar 2.2 Mesin pemecok *ballast*

Intinya lapisan *ballast* harus (1) rapat, (2) bersih tidak bercampur tanah dan lumpur, (3) harus ada di bawah bantalan (karena kalau bantalan langsung bersinggungan dengan tanah, akan mengurangi kestabilan jalan rel kereta api), dan juga (4) elastis (elastis bukan dalam arti material *ballastnya* yang elastis, tetapi formasi/susunannya yang tidak kaku, dapat bergerak-gerak sedikit) sehingga dapat “mencengkeram” bantalan rel saat rangkaian kereta api lewat.

2.5 Komponen Penyusun Rel Kereta Api

Setelah lapisan landasan sebagai pondasi jalan rel kereta api selesai dibangun, tahap berikutnya adalah membangun trek rel kereta api. Perlu diketahui bahwa pada setiap komponen mempengaruhi kualitas rel kereta api itu sendiri. Gambar di bawah ini adalah skema konstruksi jalan rel kereta api beserta komponen-komponennya.



Gambar 2.3 Skema konstruksi rel

2.5.1 Batangan Besi Baja

Batang rel terbuat dari besi ataupun baja bertekanan tinggi, dan juga mengandung karbon, mangan, dan silikon. Batang rel khusus panjangnya hanya 5–15 m tiap segmen. Batang rel dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan berat batangan per meter panjangnya. dibuat agar dapat menahan beban berat (*axle load*) dari rangkaian kereta api yang berjalan di atasnya. Inilah komponen yang pertama kalinya menerima transfer berat (*axle load*) dari rangkaian kereta api yang lewat. Tiap potongan (segmen) batang rel memiliki panjang 20–25 m untuk rel modern, sedangkan untuk rel jadul

Di Indonesia dikenal 4 macam batang rel, yakni R25, R33, R42, dan R54. Misalkan, R25 berarti batang rel ini memiliki berat rata-rata 25 kilogram/meter. Makin besar “R”, makin tebal pula batang rel tersebut. Berikut ini daftar rel yang digunakan di Indonesia menggunakan standar UIC dengan Standar:

1. Rel 25 yang berarti tiap 1 meter potongan rel beratnya adalah 25 kilogram
2. Rel 33 yang berarti tiap 1 meter potongan rel beratnya adalah 33 kilogram
3. Rel 41 yang berarti tiap 1 meter potongan rel beratnya adalah 41 kilogram
4. Rel 42 yang berarti tiap 1 meter potongan rel beratnya adalah 42 kilogram
5. Rel 50 yang berarti tiap 1 meter potongan rel beratnya adalah 50 kilogram
6. Rel 54 yang berarti tiap 1 meter potongan rel beratnya adalah 54 kilogram
7. Rel 60 yang berarti tiap 1 meter potongan rel beratnya adalah 60 kilogram

Perbedaan tipe batang rel mempengaruhi beberapa hal, antara lain (1) besar tekanan maksimum (*axle load*) yang sanggup diterima rel saat kereta api melintas, dan (2) kecepatan laju kereta api yang diijinkan saat melewati rel. Semakin besar “R”, maka makin besar *axle load* yang sanggup diterima oleh rel tersebut, dan kereta api yang melintas di atasnya dapat melaju pada kecepatan yang tinggi dengan stabil dan aman.

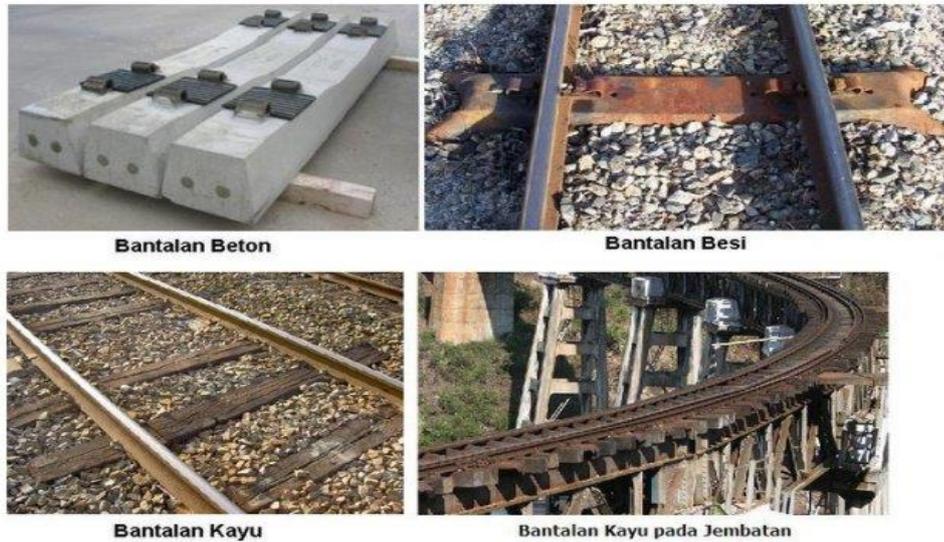
Tipe rel paling besar yang digunakan di Indonesia adalah UIC R54) yang digunakan untuk jalur kereta api yang lalu lintasnya padat, seperti lintas Jabodetabek dan lintas Trans Jawa. Tak ketinggalan lintas angkutan batubara di Sumsel-Lampung yang memiliki *axle load* paling tinggi di Indonesia.

2.5.2 Bantalan Rel

Bantalan rel (*sleepers*) dipasang sebagai landasan dimana batang rel diletakkan dan ditambatkan. Berfungsi untuk (1) meletakkan dan menambat batang rel, (2) menjaga kelebaran trek (*track gauge*, adalah ukuran lebar trek rel. Indonesia memiliki *track gauge* 1067 mm) agar selalu konstan, dengan kata lain agar batang rel tidak meregang atau menyempit, (3) menumpu batang rel agar tidak melengkung ke bawah saat dilewati rangkaian kereta api, sekaligus (4) mentransfer *axle load* yang diterima dari batang rel dan plat landas untuk disebarkan ke lapisan batu *ballast* di bawahnya.

Oleh karena itu bantalan harus cukup kuat untuk menahan batang rel agar tidak bergeser, sekaligus kuat untuk menahan beban rangkaian kereta api. Bantalan dipasang melintang dari posisi rel pada jarak antarbantalan maksimal 60 cm. Ada tiga jenis bantalan, yakni :

1. Bantalan Kayu (*Timber Sleepers*), terbuat dari batang kayu asli maupun kayu campuran, yang dilapisi dengan creosote (minyak pelapis kayu) agar lebih awet dan tahan jamur.
2. Bantalan Plat Besi (*Steel Sleepers*), merupakan bantalan generasi kedua, lebih awet dari kayu. Bantalan besi tidak dipasang pada trek yang ter-
eletrifikasi maupun pada trek yang menggunakan persinyalan elektrik.
3. Bantalan Beton Bertulang (*Concrete Sleepers*), merupakan bantalan modern saat ini, dan paling banyak digunakan karena lebih kuat, awet, murah, dan mampu menahan beban lebih besar daripada dua bantalan lainnya.



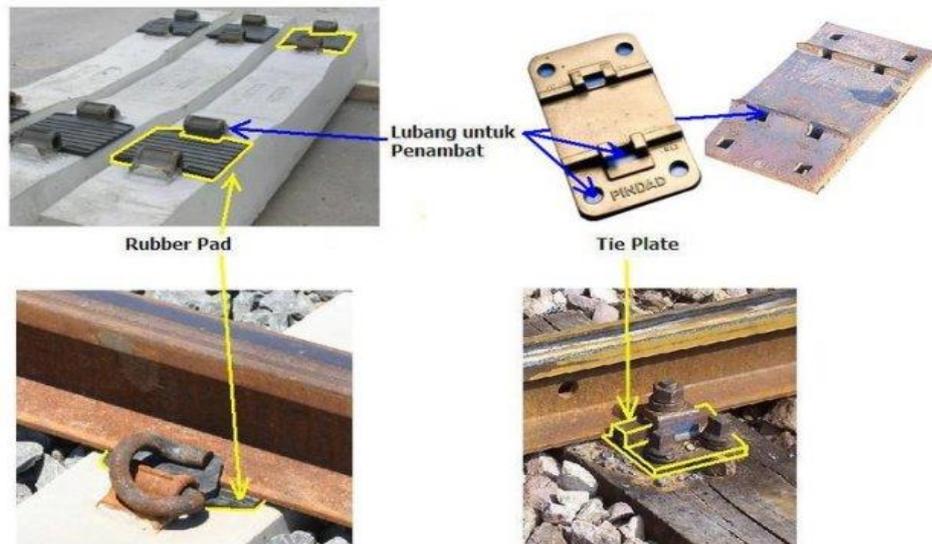
Gambar 2.4 Jenis-jenis Bantalan (*Sleeper*)

Perbandingan umur bantalan rel kereta api yang dipergunakan dalam keadaan normal dapat ditaksir sebagai berikut :

1. Bantalan kayu yang tidak diawetkan: 3-15 tahun.
2. Bantalan kayu yang diawetkan: 25-40 tahun.
3. Bantalan besi baja: sekitar 45 tahun.
4. Bantalan beton: diperkirakan 60 tahun.

2.5.3 Plat Landas

Pada bantalan kayu maupun besi, di antara batang rel dengan bantalan dipasang *Tie Plate* (plat landas), semacam plat tipis berbahan besi tempat diletakkannya batang rel sekaligus sebagai lubang tempat dipasangnya Penambat (*Spike*). Sedangkan pada bantalan beton, dipasang *Rubber Pad*, sama seperti *Tie Plate*, tapi berbahan plastik atau karet dan fungsinya hanya sebagai landasan rel, sedangkan lubang/tempat dipasangnya penambat umumnya terpisah dari *rubber pad* karena telah melekat pada beton.



Gambar 2.5 Plat Landas

Fungsi plat landas selain sebagai tempat peletakan batang rel dan lubang penambat, juga untuk melindungi permukaan bantalan dari kerusakan karena tindihan batang rel, dan sekaligus untuk mentransfer *axle load* yang diterima dari rel di atasnya ke bantalan yang ada tepat dibawahnya.

2.5.4 Penambat Rel

Fungsinya untuk menambat/mengaitkan batang rel dengan *sleeper* yang menjadi tumpuan batang rel tersebut, agar (1) batang rel tetap menyatu pada bantalannya, dan (2) menjaga kelebaran trek (*track gauge*). Jenis penambat yang digunakan bergantung kepada jenis bantalan dan tipe batang rel yang digunakan. Ada dua jenis penambat rel, yakni Penambat Kaku dan Penambat elastis.

Penambat kaku misalnya paku rel, mur, baut, sekrup, atau menggunakan tarpon yang dipasang menggunakan pelat landas. Umumnya penambat kaku ini digunakan pada jalur kereta api tua. Karakteristik dari penambat kaku adalah selalu dipasang pada bantalan kayu atau bantalan besi. Penambat kaku kini sudah tidak layak digunakan untuk jalan rel dengan frekuensi dan *axle load* yang tinggi. Namun demikian tetap diperlukan sebagai penambat rel pada bantalan kayu yang dipasang pada jalur wesel, jembatan, dan terowongan.

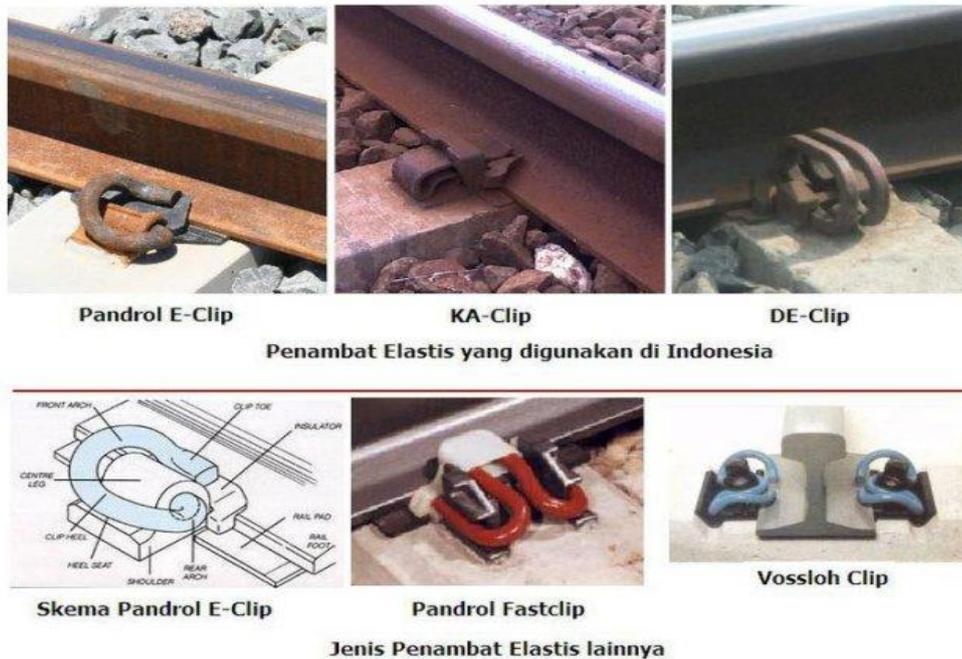


Gambar 2.6 Penambat Rel

Penambat elastis dibuat untuk menghasilkan jalan rel kereta api yang berkualitas tinggi, yang biasanya digunakan pada jalan rel kereta api yang memiliki frekuensi dan *axle load* yang tinggi. Karena sifatnya yang elastis sehingga mampu mengabsorpsi getaran pada rel saat rangkaian kereta api melintas, oleh karena itu perjalanan kereta api menjadi lebih nyaman dan dapat mengurangi resiko kerusakan pada rel maupun *sleeper*. Selain itu penambat elastis juga dipakai pada rel yang disambungkan dengan las termit (istilahnya *Continuous Welded Rails*, karena sambungan rel dilas sehingga tidak punya celah pemuaian) karena kemampuannya untuk menahan batang rel agar tidak bergerak secara horizontal saat pemuaian. Penambat elastis inilah yang sekarang banyak digunakan, terutama pada bantalan beton, meskipun ada juga yang digunakan pada bantalan kayu dan bantalan besi. Berbagai macam penambat elastis, antara lain:

1. Penambat Pandrol *E-Clip* produksi Pandrol Inggris
2. Penambat Pandrol *Fastclip* produksi Pandrol Inggris
3. Penambat Kupu-kupu produksi Vossloh
4. Penambat *DE-Clip* produksi PT. Pindad Bandung
5. Penambat KA Clip produksi PT. Pindad Bandung.

Beberapa penambat yang digunakan di Indonesia, diantaranya *E-Clip*, *DE-Clip*, dan *KA Clip*.



Penambat Elastis yang digunakan di Indonesia

Jenis Penambat Elastis lainnya

Gambar 2.7 Penambat Elastis

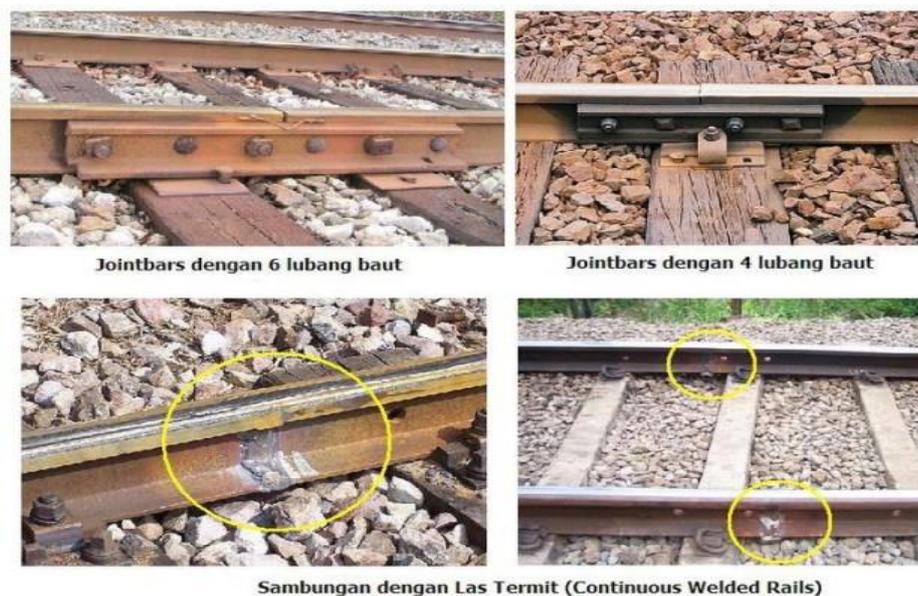
2.5.5 Plat Besi Penyambung

Merupakan plat besi dengan panjang sekitar 50-60 cm, yang berfungsi untuk menyambung dua segmen/potongn batang rel. Pada plat tersebut terdapat 4 atau 6 lubang untuk tempat skrup/baut (*Bolt*) penyambung serta mur-nya (*Nut*). Batang rel biasanya hanya memiliki panjang sekitar 20-25 meter tiap potongnya, sehingga perlu komponen penyambung berupa plat besi penyambung beserta bautnya. Pada setiap sambungan rel, terdapat celah pemuaiian (*Expansion Space*), sehingga saat rangkaian kereta api lewat akan terdengar bunyi “jeg-jeg...jeg-jeg” dari bunyi roda kereta api yang melewati celah pemuaiian tersebut.

Penyambungan rel menggunakan komponen-komponen di atas dikenal sebagai Metode Sambungan Tradisional (*Conventional Jointed Rails*). Sedangkan dewasa ini telah dikenal metode penyambungan rel dengan Las Termit, yang disebut dengan *Continuous Welded Rails (CWR)*. Dengan metode *CWR*, tiap 2 sampai 4 potong batang rel dapat dilas menjadi

satu rel yang panjang tanpa diberi celah pemuaian, sehingga tiap *CWR* memiliki panjang sekitar 40-100 m.

CWR biasanya diterapkan pada jalur dengan kecepatan laju kereta api yang tinggi, karena permukaan rel menjadi lebih rata dan halus sehingga rangkaian kereta api dapat lewat dengan lebih nyaman. Penerapan *CWR* juga mengurangi resiko rusaknya roda kereta api, karena roda kereta api akan “*njeglom*” atau “tersandung” saat melewati celah pemuaian. Lalu bagaimana dengan pemuaian batang rel? hal ini dapat disiasati dengan menggunakan penambat elastis yang mampu menahan gerakan pemuaian batang rel (gerakan mendatar dimana batang rel akan meregang saat panas dan menyusut saat dingin). Jika penambatnya berupa penambat kaku, bisa disiasati dengan memasang *rail anchor*.



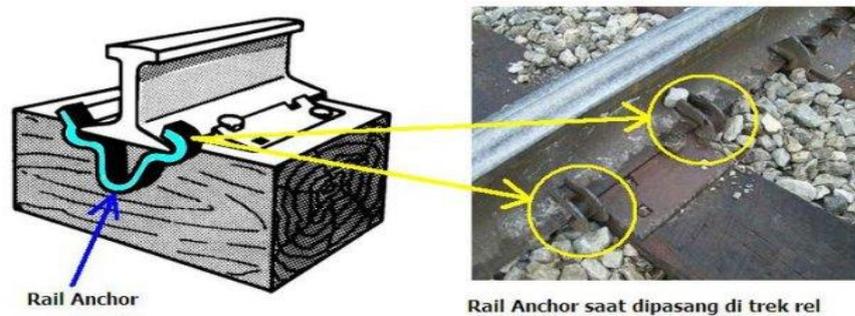
Gambar 2.8 Plat besi penyambung

2.5.6 *Rail Anchor*

Satu lagi komponen trek rel kereta api yakni *rail anchor* (anti *creep*). Rail anchor digunakan pada rel yang disambung secara *CWR*. Fungsinya untuk menahan gerakan pemuaian batang rel, karena pada sambungan *CWR* tidak terdapat celah pemuaian.

Pada gambar di bawah, *rail anchor* dipasang di bawah permukaan batang rel tepat disamping bantalan agar dapat menahan gerakan pemuaian

rel. *Rail anchor* tidak dipasang pada rel yang ditambat dengan penambat elastic, karena fungsinya sama seperti penambat elastis, yakni untuk mencegah gerakan pemuaian batang rel. Jadi, *rail anchor* dipasang bersama dengan penambat kaku pada bantalan kayu atau besi.



Gambar 2.9 *Rail Anchor*

2.5.7 Komponen Utama dalam Struktur Jalan Rel

Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, konstruksi jalan rel adalah sebagai berikut:

- a. Konstruksi rel bagian atas : rel, sambungan rel, bantalan, penambat rel, dan *ballast*.
- b. Konstruksi rel bagian bawah: badan jalan, proteksi lereng, dan drainase.

2.6 Gaya Yang Ditimbulkan oleh Kereta Api

1. Gaya Vertikal Kereta

- a. Gaya Lokomotif. Menurut Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, beban gandar adalah beban yang diterima oleh jalan rel dari satu gandar. Beban gandar untuk lebar jalan rel 1067 mm pada semua kelas jalur maksimum sebesar 18 ton.
- b. Gaya Kereta. Kereta dipakai untuk angkutan penumpang. Berat kereta (berisi penumpang) sebesar 40 ton. Kereta ditumpu oleh 2 *bogie* ($P_b = 20$ ton), masing-masing *bogie* terdiri atas 2 gandar, sehingga $P_g = 10$, dan $P_s = 5$ ton.
- c. Gaya Gerbong (*Wagon*). Gerbong digunakan untuk angkutan barang. Satu gerbong dapat terdiri atas 2 gandar (tanpa *bogie*) atau 4 gandar (dengan *bogie*).

- d. Faktor Dinamis. Akibat dari beban dinamik kereta api, maka timbul faktor dinamik. Untuk mentransformasi gaya statis ke gaya dinamis digunakan Persamaan Eisenmann berikut.

$$DAF = 1 + t \cdot \varphi (1 + (V-60) / 140) \quad (1)$$

Dengan :

- DAF : Faktor dinamis,
t : Koefisien standar deviasi, untuk perhitungan keamanan dipilih nilai sebesar 3,
 φ : Kondisi jalur kereta, untuk kondisi rel normal digunakan nilai 0,2, dan
V : Kecepatan kereta api (km/jam).

Kemudian gaya dinamis dapat dihitung dengan rumus:

$$Pd = Ps \times DAF \quad (2)$$

Dengan :

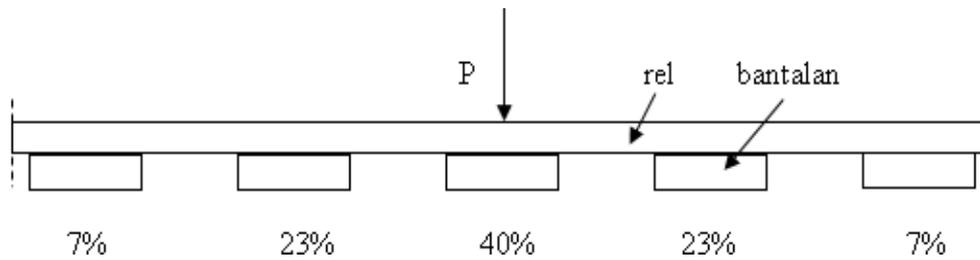
- Pd : Gaya dinamis (ton),
Ps : Gaya statis (ton), dan
DAF : Faktor dinamis

2. Gaya Horisontal Tegak Lurus Sumbu Jalur Kereta Api

Gaya ini disebabkan oleh “*snake motion*” kereta api, gaya angin yang bekerja pada kereta api (sisi kanan/kiri) dan gaya sentrifugal sewaktu kereta api melintasi tikungan.

3. Gaya Horisontal Membujur Searah Sumbu Jalur Kereta Api

Gaya ini disebabkan oleh gaya pengereman, gesekan antara roda kereta api dengan kepala rel, gaya akibat kembang susut rel dan gaya berat jika jalan rel berupa tanjakan/turunan. Distribusi Beban Kereta Api pada Lapisan *Subgrade* Roda kereta api memberikan gaya vertikal dan horisontal pada rel. Menurut Prof. Idris (2006), skematika distribusi gaya dari roda pada *subgrade* adalah sebagai berikut:



Gambar 2.10 Distribusi beban roda pada *sleeper* berurutan

2.7 Bahan Penyusun Struktur Jalan Rel

Memberikan Gaya Pada *Subgrade* terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut.

1. Rel

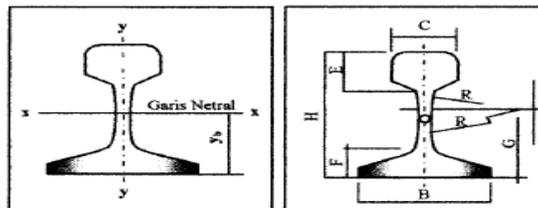
Rel adalah logam batang untuk landasan jalan kereta api atau kendaraan sejenis seperti trem dan sebagainya yang memiliki spesifikasi. Rel berfungsi untuk mengarahkan atau memandu kereta api tanpa memerlukan pengendalian. Rel merupakan dua batang logam kaku yang sama Panjang dipasang pada bantalan sebagai dasar landasan. Rel-rel tersebut diikat pada bantalan dengan menggunakan paku rel, sekrup penambat, atau penambat “e” berikut beberapa pembagian kelas jalan rel, tipe rel dan spesifikasinya dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 2.1. Pembagian kelas jalan rel di Indonesia

Kelas Jalan Rel	Kapasitas Angkut Lintas ($\times 10^6$ ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (km/jam)	Tipe Rel	Jenis Bantalan/ Jarak (mm)	Jenis Penambat
I	> 20	120	R.60/R.54	Beton/600	EG
II	10 – 20	110	R.54/R.50	Beton/Kayu/600	EG
III	5 – 10	100	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja/600	EG
IV	2,5 – 5	90	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja/600	EG/ET
V	< 2,5	80	R.42	Kayu/Baja/600	ET

Sumber : PM No. 60 Tahun 2012

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
A	= luas penampang			
W	= berat rel permeter			
I _x	= momen inersia terhadap sumbu x			
Y _b	= jarak tepi bawah rel ke garis netral			



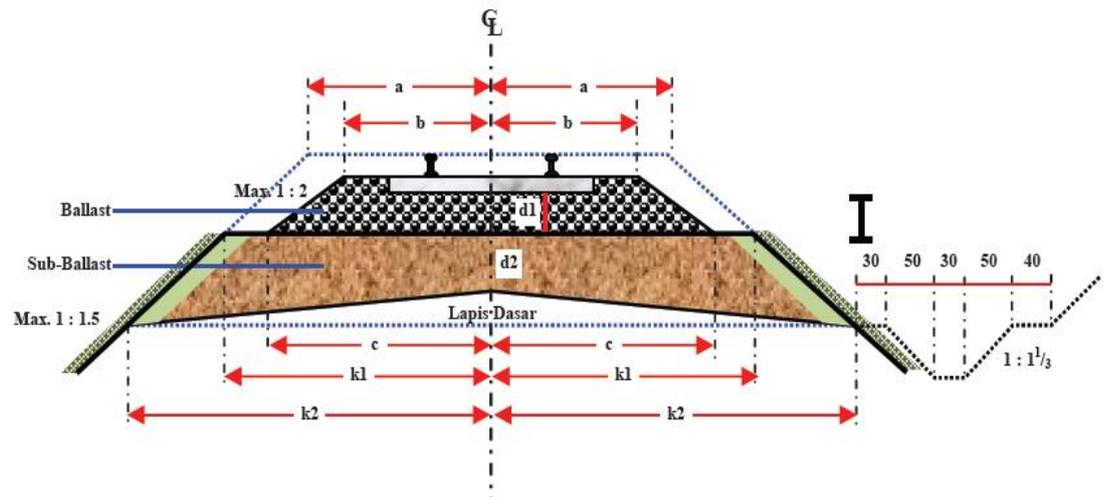
Gambar 2.11. Spesifikasi rel kereta api di Indonesia

2. *Sleeper*

Sleeper yang umum digunakan di Indonesia adalah *Sleeper* beton. Jarak *Sleeper* adalah jarak antara titik tengah pada *Sleeper* yang beraturan dan nilai optimal untuk rel standar maupun metrik adalah sebesar 0,6 meter (Profilidis, 2006).

3. *Ballast*

Ballast berfungsi sebagai pendistribusi beban dinamis kereta. Bentuk dan dimensi potongan melintang lapisan *ballast* adalah seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.12. Potongan melintang *ballast*

Tanah dasar harus mampu menopang beban berat lapisan *ballast*, serta menopang tegangan akibat dari gaya yang diteruskan oleh bantalan pada balas yang kemudian diteruskan dan didistribusikan oleh balas kepada lapisan tanah dasar yang diwujudkan pada persamaan distribusi. Metode *Beam on Elastic Foundation* dan JNR pada (Rosyidi 2012), mengasumsikan bahwa bantalan diibaratkan sebagai balok serta *ballast* sebagai tumpuan elastik yang diibaratkan pegas.

Tabel 2.2 Koefisien balas yang dipengaruhi oleh kondisi *ballast*

Kondisi Balas	(Kg/cm ³)
Buruk	3
Sedang	8 – 10
Baik	12 – 15

Sumber : Rosyidi, 2012

Metode BoEF dan JNR, Rosyidi (2012) memperhitungkan tekanan di bawah bantalan menggunakan metode AREA dan *Talbot*. Material pada *ballast* atas dan balas bawah mempunyai spesifikasi yang berbeda, untuk mengonversikan agar menjadi satu kesatuan dalam perhitungan, Esveld (2001).

4. Tanah Dasar

Menurut PD No. 10 Tahun 1986, fungsi tanah dasar adalah untuk mendukung beban yang diteruskan oleh *ballast* kepada tanah dasar, meneruskan beban ke lapisan di bawahnya, dan memberikan landasan yang rata pada kedudukan di tempat *ballast* akan diletakkan. Menurut *Clarke* (1957) dalam (NB Susanto, I Muthohar 2015).

2.8 Sleeper Kayu

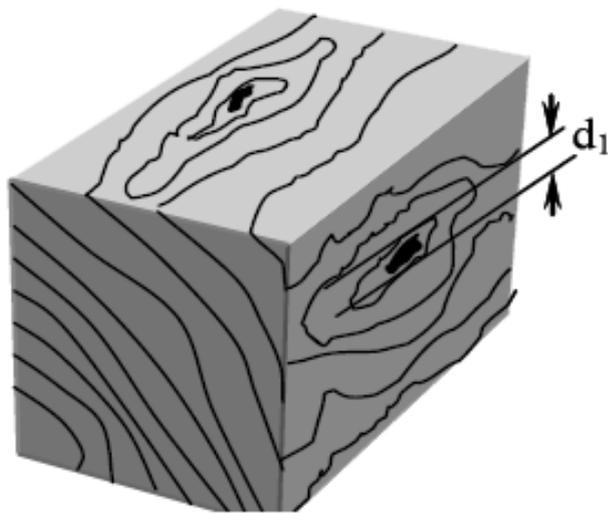
Sleeper kayu dipilih sebagai struktur *sleeper* pada jalan rel dengan pertimbangan bahannya yang mudah diperoleh (jika masih memungkinkan dari hutan tropis) dan mudah dalam pembentukan dimensi (tidak melibatkan peralatan yang berat dan rumit). Meskipun demikian, penggunaan bantalan kayu saat ini di Indonesia saat ini sangat jarang dipilih karena pertimbangan konservasi hutan terkait dengan semakin jarangunya kayu kelas kuat I dan II yang terpilih, dan jika adapun, harganya tinggi. Masalah yang ada dalam bantalan kayu, hanyalah pengawetan yang harus merata dan sempurna.

2.8.1 Syarat Mutu, Kekuatan dan Keawetan Bantalan Kayu

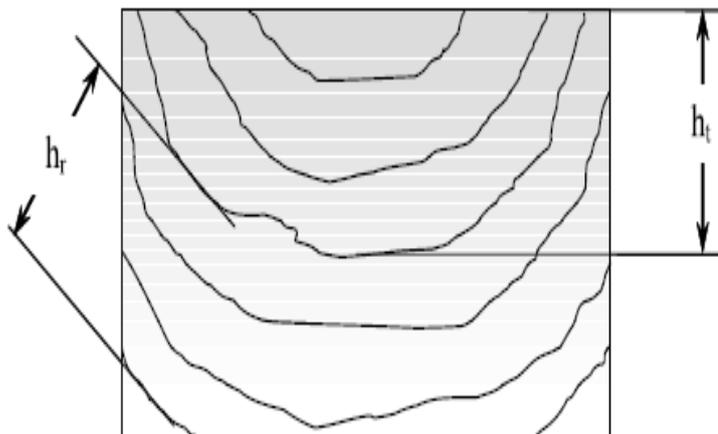
Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan material kayu harus memenuhi persyaratan berikut ini.

1. Syarat umum bantalan kayu adalah :
 - a. Utuh dan padat
 - b. Tidak bermata
 - c. Tidak ada lubang bekas ulat
 - d. Tidak ada tanda-tanda permulaan lapuk kayu.
 - e. Kadar air maksimum 25 %.
2. Bantalan kayu harus terbuat dari kayu mutu A dengan kelas kuat I atau II dan kelas awet I atau II (Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia, 1961). Persyaratan kayu bermutu A adalah kayu yang memenuhi persyaratan berikut ini :
 - a. Kayu harus kering udara
 - b. Besarnya mata kayu tidak melebihi $1/6$ dari lebar bantalan dan tidak boleh lebih dari 3,5 cm.

- c. Balok tidak boleh mengandung *wanvlak* (sisi lengkung) yang lebih besar daripada $1/10$ tinggi bantalan dan $1/10$ lebar bantalan.
- d. Kemiringan arah serat (tg) tidak boleh melebihi $1/10$.
- e. Retak-retak arah radial (h_r) tidak boleh melebihi $1/4$ lebar bantalan, dan retakretak menurut lingkaran tumbuh (h_t) tidak boleh melebihi $1/5$ tebal bantalan.



Gambar 2.13. Mata kayu (d_1) pada bantalan



Gambar 2.14 Arah retak radial dan lingkaran tumbuh

2.8.2 Contoh Kayu untuk Bantalan

Beberapa contoh kayu yang biasa digunakan untuk bantalan diberikan dalam Tabel 3 berikut ini.

Tabel 2.3 Contoh jenis kayu untuk bantalan

Nama Botanik	Nama Perdagangan	Kelas Kuat	Kelas Awet
<i>Intsia spec.div</i>	Merbau	I – II	I – II
<i>Eusideroxylon zwageri T.et B</i>	Ulin, Borneo, Kayu Besi	I	I
<i>Manikara kauki</i>	Sawo Kecil	I	I
<i>Adina minutiflora val</i>	Berumbung Gerunggang	I – II	II
<i>Tectona grandis L.f</i>	Jati	II	I – II
<i>Dalbergia Latifolia Roxb</i>	Sonokeling	II	I

Sumber : Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia, 1961

2.8.3 Umur Bantalan Kayu

Secara umum bantalan kayu kelas awet I dan II adalah 8 tahun dan kelas awet II adalah 5 tahun untuk kondisi terbuka dan berhubungan dengan tanah yang lembab dengan serangan rayap dan bubuk kayu kering hampir tidak ada. Untuk memperpanjang umur bantalan dari pelapukan (terutama kelas awet II) dapat dilakukan pengawetan dengan bahan-bahan kimia misalnya retesi pengawetan 10, yang akan memberikan umur manfaat mencapai 2 kali lipat umur tanpa pengawetan. Selain dari pelapukan, umur bantalan juga dipengaruhi oleh kerusakan (patah) pada posisi di bawah rel oleh karena itu perkuatan pelat andas dapat digunakan untuk menambah tahanan kayu dari tegangan kontak di kaki rel. Selama umur pelayanan, secara berkelanjutan harus dilakukan pemeliharaan dengan menggantikan bantalan kayu yang rusak sehingga umur manfaat bantalan secara keseluruhan dapat dipertahankan untuk waktu yang lebih lama.

2.8.4 Ukuran Bantalan Kayu

Menurut Peraturan Dinas No.10 tahun 1986, ukuran bantalan kayu dibedakan berdasarkan lokasi pemasangan, yaitu :

1. Bantalan Kayu pada Jalan Lurus : 2000 mm x 220 mm x 130 mm Perusahaan Jawatan Kereta Api (PJKA) dan 2100 mm x 200 mm x 140 mm (JNR) JNR, adalah badan usaha yang mengoperasikan jaringan kereta api milik pemerintah di Jepang dari tahun 1949 sampai 1987.
2. Bantalan Kayu pada Jembatan : 1800 mm x 220 mm x 200 mm (PJKA) 1800 mm x 220 mm x 240 mm (JNR). Toleransi yang diperbolehkan untuk panjang bantalan : + 40 mm s.d. – 20 mm, untuk lebar bantalan : + 20 mm s.d. – 10 mm dan untuk tinggi bantalan : + 10 mm. Bentuk penampang melintang bantalan kayu harus berupa empat persegi panjang pada seluruh tubuh bantalan.

2.8.5 Syarat Kekuatan Bantalan Kayu

Pada bagian tengah dan bawah bantalan kayu harus mampu menahan momen maksimum yang disyaratkan, sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 4 berikut ini:

Tabel 2.4 Momen Maksimum Bantalan Kayu

Kelas Kayu	Momen Maksimum (kg/m)
I	800
II	530

Sumber : PD.No.10 Tahun 1986

Berdasarkan table diatas dapat diketahui bahwa pada kelas kayu I dapat menahan beban hingga 800 Kg.m dan untuk kelas kayu II dapat menahan beban hingga 530 kg/m. sedangkan Untuk syarat tegangan ijin yang diperbolehkan bagi kelas kuat I dan II dapat dalam sebuah rangkaian atau struktur dapat dilihat pada table 5 berikut ini:

Tabel 2.5. Tegangan Ijin Kayu Kelas Kuat I dan II

Jenis Tegangan Ijin	Kelas Kuat	
	I	II
Lentur (σ_{lt} dalam kg/cm ²)	125	83
Tekan Sejajar Serat ($\sigma_{tk//}$ dalam kg/cm ²)	108	71
Tarik Sejajar Serat ($\sigma_{tr//}$ dalam kg/cm ²)	108	71
Tekan Tegak Lurus Serat (σ_{tk} dalam kg/cm ²)	33	21
Geser (τ dalam kg/cm ²)	17	10

Sumber : PKKI Tahun 1961