TUGAS AKHIR

ANALISIS *LIFE CYCLE COST* ANTARA BANTALAN REL KAYU DAN BANTALAN SINTETIS PADA JALUR JEMBATAN REL DI DAOP 6 YOGYAKARTA

(Life Cycle Cost Analysis of Wooden and Synthetic Sleepers on Railway Bridge Tracks in DAOP 6 Yogyakarta)

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil

Wasito Aji Nugroho

20511235

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL – PROGRAM SARJANA

FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

YOGYAKARTA

2026

TUGAS AKHIR

ANALISIS *LIFE CYCLE COST* ANTARA BANTALAN REL KAYU DAN BANTALAN SINTETIS PADA JALUR JEMBATAN REL DI DAOP 6 YOGYAKARTA

(Life Cycle Cost Analysis of Wooden and Synthetic Sleepers on Railway Bridge Tracks in DAOP 6 Yogyakarta)

Disusun Oleh:

Wasito Aji Nugroho

20511235

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 26 Agustus 2026
Oleh Dewan Penguji

Dosen Pembimbing :

Albani Musyafa, S.T., M.T., Ph.D.

NIK : 955110102

Tanggal: 28 - 08 - 2026.

Penguji I :

Rizki Budiman, S.T., M.T.

NIK : 245111203

Tanggal: 28 08 2026

Penguji II :

Ir. Tri Nugroho Sulistyantoro, S.T., M.T.

NIK : 195110502

Tanggal: 28/08/26

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil Program Sarjana

FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI

3/8-26

Dwi Anggraheni, S.T., M.Eng.

NIK : 165110105

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Dengan penuh tanggung jawab, saya menyatakan bahwa laporan Tugas Akhir ini saya susun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia, merupakan hasil karya asli dan mandiri yang saya kerjakan sendiri. Segala bentuk kutipan atau referensi yang berasal dari karya pihak lain telah dicantumkan secara lengkap dan sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa sebagian atau seluruh isi dari laporan ini bukan merupakan hasil karya saya sendiri, atau terdapat unsur plagiarisme, saya siap menerima segala konsekuensi dan sanksi yang berlaku, termasuk pencabutan gelar akademik, sesuai dengan ketentuan hukum dan peraturan perundang-undangan yang berlaku. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Yogyakarta, 28 Agustus 2026

Yang membuat Pernyataan



Wasito Aji Nugroho

(20511235)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul "Analisis *Life Cycle Cost* (LCCA) Penggunaan Bantalan Rel Kayu dan Bantalan Rel Sintetis pada Jembatan Rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta" ini dengan baik dan tepat waktu. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada junjungan kita Nabi Agung Muhammad SAW, keluarga, para sahabat, dan seluruh pengikutnya hingga akhir zaman.

Penyusunan Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat akademik dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia.

Dalam proses pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa keberhasilan ini tidak lepas dari bimbingan, arahan, bantuan, serta dukungan moral dan material dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada Ibu Ir. Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia.
2. Kepada Ibu Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Albani Musyafa, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan, waktu, koreksi, serta arahan yang sangat berharga selama proses penyusunan laporan ini.
4. Bapak Rizki Budiman, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji 1 yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini.

5. Ir. Tri Nugroho Sulistyantoro, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji 2 yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini.
6. Pimpinan dan segenap staf PT Kereta Api Indonesia (Persero) DAOP 6 Yogyakarta serta unit Resort Jalan Rel, yang telah memberikan izin, kemudahan fasilitas, serta bantuan data lapangan selama penelitian berlangsung.
7. Bapak Tri Haryanto, Ibu Ratna Ningrum, Mbak Feby Elfida, Mas Hendra, Mbak Nisa, serta keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa tulus tanpa henti, dorongan semangat, kasih sayang, serta dukungan finansial dan moral yang tak terhingga.
8. Teman-teman Aliansi serta sahabat terdekat penulis, terima kasih atas dukungan emosional, kebersamaan di saat suka maupun duka, tempat bertukar pikiran, serta semangat pantang menyerah yang selalu diberikan selama ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Teknik Sipil UII, khususnya angkatan 2020, serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, terima kasih atas kebersamaan, bantuan, dan dukungannya.
10. Rekan-rekan kerja dan keluarga besar Mahliga Coffee and Book, terima kasih atas kehangatan, fleksibilitas, suasana kerja yang menyenangkan, serta dukungan positif di sela-sela kesibukan kuliah dan penyusunan laporan ini.
11. Seluruh pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung, ide, doa, dan kemudahan hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
12. Setiap pihak yang senantiasa bertanya "kapan lulus?", terima kasih atas pertanyaan berulang yang tanpa disadari menjadi *alarm* pengingat dan dorongan motivasi tersendiri bagi penulis untuk segera melangkah dan menyelesaikannya—kini pertanyaan tersebut telah resmi terjawab.
13. Grup musik Perunggu, terima kasih atas karya-karya indahnya, khususnya lagu *"Ini Abadi"* dan *"Gemilang"*, yang telah menjadi *soundtrack* peneman setia, pelipur lara di kala lelah, serta bahan bakar semangat dalam setiap malam panjang penyusunan Tugas Akhir ini.

14. *Last but not least,* Diri sendiri. terima kasih telah bertahan, berjuang keras, pantang menyerah, dan mampu berdamai dengan rasa lelah, keraguan, serta tekanan selama masa perkuliahan hingga akhirnya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.

Yogyakarta, 28 Agustus 2026

Penulis



Wasito Aji Nugroho

(20511235)

DAFTAR ISI

JUDUL i

LEMBAR PENGESAHAN ii

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI vii

DAFTAR TABEL x

DAFTAR GAMBAR xv

DAFTAR LAMPIRAN xvi

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xvii

ABSTRAK xviii

ABSTRACT xix

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 2

1.3 Tujuan Penelitian 3

1.4 Manfaat Penelitian 3

1.5 Batasan Penelitian 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5

2.1 Penelitian Terdahulu 5

2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian yang Akan Dilakukan 9

BAB III LANDASAN TEORI 14

3.1 Infrastruktur Jalan Rel 14

3.2 Bantalan Rel 16
3.3 Konsep Pemeliharaan Infrastruktur 19
3.4 Analisis Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost Analysis*) 20
3.5 Biaya Pemeliharaan Bantalan Rel 20
3.5.1 Biaya Awal ($C0$) 22
3.5.2 Biaya Pemeliharaan ($Cpemeliharaan$) 23
3.5.3 Biaya Penggantian ($Cpenggantian$) 24
3.6 *Green Construction* 26
3.7 Hipotesis 27
BAB IV METODE PENELITIAN 29
4.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian 29
4.2 Lokasi dan Objek Penelitian 29
4.3 Jenis dan Sumber Data 30
4.3.1 Data Primer 30
4.3.2 Data Sekunder 30
4.4 Variabel Penelitian 30
4.5 Alat yang Digunakan 31
4.6 Metode Analisis Data 31
4.6.1 Analisis *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) 31
4.6.2 Analisis Perbandingan Efisiensi Pemeliharaan Biaya 34
4.6.3 Pendekatan *Green Construction* 34
4.7 Pelaksanaan Penelitian 34
4.7.1 Persiapan dan Perizinan Penelitian 35
4.7.2 Studi Pustaka dan Pengumpulan Teori 35
4.7.3 Pengumpulan Data Primer dan Sekunder 35

4.7.4 Pengolahan Data 35
4.7.5 Analisis Perbandingan dan Pembahasan 36
4.7.6 Kesimpulan dan Saran 36
4.7.7 Bagan Alir Penelitian 36
4.7.8 *Time Schedule* Penelitian 39
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 40
5.1 Data Penelitian 40
5.1.1 Data Primer 40
5.1.2 Data Sekunder 45
5.2 Analisis Data 46
5.2.1 Perhitungan Data Awal (Co) 46
5.2.2 Perhitungan Biaya Pemeliharaan 50
5.2.3 Perhitungan *Discount Rate* 56
5.2.4 Perhitungan *Present Value* (PV) Penggantian 56
5.2.5 Perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* 66
5.2.6 Analisis Sensitivitas 72
5.2.7 Analisis Perbandingan 76
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 81
6.1 Kesimpulan 81
6.2 Saran 84
DAFTAR PUSTAKA 86
LAMPIRAN 88

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan 10

Tabel 3. 1 Kelas Jalan Rel 17
Tabel 3. 2 Perbedaan Komponen Biaya Awal (Co) antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis 23
Tabel 3. 3 Perbedaan Komponen Biaya Pemeliharaan (Cpemeliharaan) antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis 24
Tabel 3. 4 Perbedaan Komponen Biaya Penggantian (Cpenggantian) antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis 26
Tabel 3. 5 Hipotesis 27

Tabel 5. 1 Tabel Data Primer 40
Tabel 5. 2 Perbandingan antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis menurut Narasumber 44
Lanjutan Tabel 5. 2 Perbandingan antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis menurut Narasumber 45
Tabel 5. 3 Data Biaya tiap Bantalan 45
Tabel 5. 4 Analisis Perbandingan Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis 77

Tabel L-1. 1 Pendataan Bantalan Jembatan 92
Tabel L-1. 2 Data Awal (Co) Bantalan Kayu 114
Tabel L-1. 3 Data Awal (Co) Bantalan Sintetis 115
Tabel L-1. 4 Perhitungan Harga Satuan Alat dan Bahan Pengencangan Baut/penambat 116

Tabel L-1. 5 Perhitungan Harga Satuan Alat dan Bahan Perbaikan Lebar Sepur/Regauging 116
Tabel L-1. 6 Perhitungan Harga Satuan Alat dan Bahan Perawatan Kimia 116
Tabel L-1. 7 Perhitungan Pemeliharaan Bantalan Kayu 117
Tabel L-1. 8 Perhitungan Pemeliharaan Bantalan Sintetis 117
Tabel L-1. 9 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Kayu Per Batang 119
Tabel L-1. 10 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis Per Batang 121
Tabel L-1. 11 Perhitungan PV Bantalan Kayu Lokasi JR 6.1 Jenar 123
Tabel L-1. 12 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.2 Wojo 123
Tabel L-1. 13 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.3 Wates 123
Tabel L-1. 14 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.4 Yogyakarta 123
Tabel L-1. 15 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.5 Brambanan 124
Tabel L-1. 16 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.6 Klaten 124
Tabel L-1. 17 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.7 Delanggu 124
Tabel L-1. 18 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.8 Solo Balapan 125
Tabel L-1. 19 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.9 Wonogiri 125
Tabel L-1. 20 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang 125
Tabel L-1. 21 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.11 Palur 125
Tabel L-1. 22 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.12 Sragen 126
Tabel L-1. 23 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.13 Kebonromo dan Total PV Keseluruhan 126
Tabel L-1. 24 Perhitungan LCC Bantalan Kayu 127
Tabel L-1. 25 Perhitungan LCC Bantalan Sintetis 128
Tabel L-1. 26 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Kayu Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 9% 129
Tabel L-1. 27 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 9% 131
Tabel L-1. 28 Perhitungan PV Bantalan Kayu Lokasi JR 6.1 Jenar dengan Sensitivitas Diskonto 9% 132

Tabel L-1. 29 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.2 Wojo dengan Sensitivitas Diskonto 9% 133
Tabel L-1. 30 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.3 Wates dengan Sensitivitas Diskonto 9% 133
Tabel L-1. 31 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.4 Yogyakarta dengan Sensitivitas Diskonto 9% 133
Tabel L-1. 32 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.5 Brambanan dengan Sensitivitas Diskonto 9% 134
Tabel L-1. 33 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.6 Klaten dengan Sensitivitas Diskonto 9% 134
Tabel L-1. 34 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.7 Delanggu dengan Sensitivitas Diskonto 9% 134
Tabel L-1. 35 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.8 Solo Balapan dengan Sensitivitas Diskonto 9% 135
Tabel L-1. 36 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.9 Wonogiri dengan Sensitivitas Diskonto 9% 135
Tabel L-1. 37 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang dengan Sensitivitas Diskonto 9% 135
Tabel L-1. 38 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.11 Palur dengan Sensitivitas Diskonto 9% 135
Tabel L-1. 39 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.12 Sragen dengan Sensitivitas Diskonto 9% 136
Tabel L-1. 40 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.13 Kebonromo dan Total PV Keseluruhan dengan Sensitivitas Diskonto 9% 136
Tabel L-1. 41 Perhitungan LCC Bantalan Kayu dengan Sensitivitas Diskonto 9% 137
Tabel L-1. 42 Perhitungan LCC Bantalan Sintetis dengan Sensitivitas Diskonto 9% 138
Tabel L-1. 43 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Kayu Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 14% 139

Tabel L-1. 44 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 14% 141
Tabel L-1. 45 Perhitungan PV Bantalan Kayu Lokasi JR 6.1 Jenar dengan Sensitivitas Diskonto 14% 142
Tabel L-1. 46 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.2 Wojo dengan Sensitivitas Diskonto 14% 143
Tabel L-1. 47 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.3 Wates dengan Sensitivitas Diskonto 14% 143
Tabel L-1. 48 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.4 Yogyakarta dengan Sensitivitas Diskonto 14% 143
Tabel L-1. 49 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.5 Brambanan dengan Sensitivitas Diskonto 14% 144
Tabel L-1. 50 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.6 Klaten dengan Sensitivitas Diskonto 14% 144
Tabel L-1. 51 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.7 Delanggu dengan Sensitivitas Diskonto 14% 144
Tabel L-1. 52 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.8 Solo Balapan dengan Sensitivitas Diskonto 14% 145
Tabel L-1. 53 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.9 Wonogiri dengan Sensitivitas Diskonto 14% 145
Tabel L-1. 54 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang dengan Sensitivitas Diskonto 14% 145
Tabel L-1. 55 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.11 Palur dengan Sensitivitas Diskonto 14% 145
Tabel L-1. 56 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.12 Sragen dengan Sensitivitas Diskonto 14% 146
Tabel L-1. 57 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.13 Kebonromo dan Total PV Keseluruhan dengan Sensitivitas Diskonto 11.86% 146
Tabel L-1. 58 Perhitungan LCC Bantalan Kayu dengan Sensitivitas Diskonto 14% 147

Tabel L-1. 59 Perhitungan LCC Bantalan Sintetis dengan Sensitivitas Diskonto 14% 148
Tabel L-1. 60 Lampiran Permintaan Data Penelitian 149

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Struktur Jalan Rel 15
Gambar 3. 2 Bantalan Rel Kayu 18
Gambar 3. 3 Bantalan Rel Sintetis 19
Gambar 4. 1 Bagan Alir Penelitian 37
Gambar 4. 2 Time Schedule dan Kurva S 39

Gambar L-1. 1 Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.4 Yogyakarta BH 538+4/5 Antara PTN-YK 89
Gambar L-1. 2 Bantalan Sintetis di Lokasi JR 6.4 Yogyakarta BH 541+5/6 Antara PTN-YK 89
Gambar L-1. 3 Contoh Kerusakan Bantalan Kayu 90
Gambar L-1. 4 Contoh Kerusakan Bantalan Kayu 90
Gambar L-1. 5 Narasumber Bapak Aan sebagai Staff Mabes JJ DAOP 6 Yogyakarta 91
Gambar L-1. 6 Narasumber Bapak Yadno dan Staff Resort JJ JR 6.4 Yogyakarta 91

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Lapangan 89
Lampiran 2 Data yang digunakan 92

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

LCC	= *Life Cycle Cost*
Co	= Biaya Awal
$C_{pemeliharaan}$	= Biaya Pemeliharaan
$C_{penggantian}$	= Biaya Penggantian
V	= Volume
H	= Harga
Ct	= Biaya pada tahun ke-n
PV	= *Present Value*
FV	= *Future Value*
i	= tingkat diskonto/suku bunga
t	= tahun ke-n
JR	= Jalan Rel
JJ	= Jalan Jembatan
DAOP	= Daerah Operasional
STPR	= *Social Discount Rate*

ABSTRAK

Infrastruktur jalan rel pada jembatan di wilayah DAOP 6 Yogyakarta masih menghadapi tantangan tingginya biaya pemeliharaan dan keterbatasan umur teknis bantalan kayu akibat pelapukan biologis serta makin langkanya pasokan kayu mutu tinggi. Sebagai alternatif, bantalan sintetis menawarkan keandalan dan daya tahan tinggi, tetapi memerlukan investasi biaya awal yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan biaya awal, biaya penggantian, umur teknis, serta total *Life Cycle Cost* (LCC) selama periode analisis 50 tahun antara bantalan kayu dan sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta dengan meninjau prinsip *Green Construction*.

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif-komparatif kuantitatif berbasis *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Data primer dan sekunder diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara, serta arsip data teknis dari 13 Resort Jalan Rel di DAOP 6 Yogyakarta dengan total jumlah 8.798 bantalan (4.195 kayu dan 4.603 sintetis). Analisis keuangan menggunakan tingkat diskonto (*discount rate*) sebesar 11.30% (STPR) untuk menghitung *Present Value* (PV) biaya penggantian selama kurun waktu 50 tahun.

Hasil penelitian menunjukkan biaya awal (Co) bantalan sintetis sebesar Rp21,844,917,400.00, lebih tinggi dibandingkan bantalan kayu sebesar Rp9,103,150,000.00. Namun, bantalan kayu memerlukan 5 kali siklus penggantian dengan akumulasi nilai PV penggantian mencapai Rp4,725,911,008.45, sedangkan bantalan sintetis memerlukan penggantian pada akhir periode 50 tahun dengan PV sebesar Rp103,417,060.70. Secara keseluruhan, total LCC bantalan sintetis lebih efisien dalam jangka panjang serta mendukung Green Construction melalui pengurangan deforestasi dan penurunan frekuensi perawatan fisik.

Kata Kunci: *Life Cycle Cost*, bantalan kayu, bantalan sintetis, DAOP 6 Yogyakarta, *Green Construction.*

ABSTRACT

Railway bridge infrastructure in DAOP 6 Yogyakarta faces ongoing challenges due to high maintenance costs and the limited service life of wooden sleepers caused by biological decay and scarce high-quality timber supply. Synthetic sleepers offer a durable and reliable alternative, although requiring higher initial capital expenditure. This study aims to analyze and compare the initial cost, replacement cost, service life, and total Life Cycle Cost (LCC) over a 50-year planning horizon between wooden and synthetic sleepers on R54 rail tracks in DAOP 6 Yogyakarta, incorporating Green Construction principles.

This study employed a quantitative descriptive-comparative approach utilizing Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Primary and secondary data were collected through field observations, technical interviews, and archive records across 13 Railway Resorts in DAOP 6 Yogyakarta, encompassing 8,798 sleepers (4,195 wooden and 4,603 synthetic). Financial calculations applied a 11.30% discount rate (STPR) to compute the Present Value (PV) of replacement costs across a 50-year lifespan.

The results reveal that the initial cost (Co) for synthetic sleepers (IDR21,844,917,400.00) is higher than that of wooden sleepers (IDR9,103,150,000.00). However, wooden sleepers require replacement cycles over 50 years, yielding an accumulated replacement PV of IDR IDR4,725,911,008.45, whereas synthetic sleepers require last replacement at 50th year (PV of IDR 103,417,060.70). Overall, synthetic sleepers demonstrate superior long-term LCC efficiency and support Green Construction by preventing deforestation and reducing routine physical maintenance.

***Keywords**: Life Cycle Cost, wooden sleepers, synthetic sleepers, DAOP 6 Yogyakarta, Green Construction.*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Infrastruktur perkeretaapian merupakan sistem transportasi yang memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas yang efisien dan berkelanjutan. Salah satu elemen vital penyusun infrastruktur tersebut adalah struktur jalan rel yang menjadi landasan utama pergerakan kereta. Pada struktur jalan rel, bantalan rel berfungsi meneruskan beban kereta api ke *ballast*, menjaga kestabilan lebar sepur, serta mempertahankan geometri lintasan. Menurut penelitian Pratama dkk. (2021), bantalan rel merupakan komponen yang sangat berpengaruh terhadap kinerja lintasan karena menerima beban dinamis berulang yang berdampak langsung pada kebutuhan pemeliharaan dan umur layanan jalan rel.

Pada praktik di Indonesia, bantalan rel kayu masih digunakan pada beberapa segmen jalur rel, terutama pada kondisi tertentu seperti jembatan rel baja, karena sifat elastisitasnya yang baik dan kemudahan pemasangan. Namun, bantalan kayu memiliki keterbatasan berupa umur layanan yang relatif pendek serta kerentanan terhadap pengaruh lingkungan seperti kelembaban dan organisme perusak. Penelitian Siregar dan Nugroho (2020) menyatakan bahwa bantalan kayu memiliki daya tahan yang lebih rendah dibandingkan material alternatif, sehingga memerlukan pemeliharaan yang lebih intensif dan berpotensi meningkatkan biaya operasional jalan rel dalam jangka panjang.

Seiring dengan perkembangan teknologi material, bantalan sintetis mulai dikembangkan sebagai alternatif bantalan konvensional. Bantalan sintetis memiliki keunggulan berupa ketahanan terhadap air, korosi, serta tidak memerlukan bahan baku kayu alam. Penelitian oleh Hidayat dkk. (2022) menunjukkan bahwa bantalan sintetis memiliki umur layanan yang lebih panjang dan frekuensi pemeliharaan yang lebih rendah dibandingkan bantalan kayu, sehingga berpotensi memberikan

efisiensi biaya siklus hidup serta mendukung pengurangan eksploitasi sumber daya alam.

Pemeliharaan (*maintenance*) infrastruktur jalan rel merupakan konsep manajemen aset yang luas, mencakup strategi perencanaan biaya dan logistik untuk menjamin ketersediaan jalur, yang di dalamnya terdapat eksekusi teknis berupa kegiatan perawatan (*treatment*) fisik. Di lingkungan DAOP 6 Yogyakarta, permasalahan efisiensi muncul ketika strategi pemeliharaan jangka panjang terbebani oleh tingginya intensitas perawatan harian yang dituntut oleh material bantalan kayu, seperti perbaikan geometri akibat penyusutan dimensi dan penggantian komponen yang lapuk karena faktor kelembapan. Kondisi ini menciptakan disparitas biaya operasional yang signifikan jika dibandingkan dengan bantalan sintetis, yang meskipun membutuhkan investasi modal besar, didesain untuk meminimalkan intervensi perawatan fisik rutin. Oleh karena itu, diperlukan analisis mendalam untuk membuktikan apakah reduksi drastis pada frekuensi kegiatan perawatan fisik tersebut mampu menurunkan total biaya pemeliharaan aset secara keseluruhan selama masa layan infrastruktur.

Dari perspektif manajemen konstruksi, pemilihan jenis bantalan rel tidak hanya ditinjau dari aspek teknis, tetapi juga harus mempertimbangkan efisiensi biaya jangka panjang dan dampak lingkungan. Pendekatan *Green Construction* menekankan penggunaan material yang ramah lingkungan, pengurangan limbah, serta peningkatan umur layanan infrastruktur. Oleh karena itu, diperlukan analisis efisiensi biaya dan pemeliharaan penggunaan bantalan rel kayu dan bantalan sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta sebagai dasar pengambilan keputusan yang mendukung pembangunan infrastruktur perkeretaapian yang berkelanjutan dan cerdas.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan yang akan di tinjau dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Berapa besar biaya awal (*initial cost*) antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta?

2. Berapa besar biaya pemeliharaan (*maintenance cost*) antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta?
3. Berapa lama umur teknis (*Service Life*) antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis?
4. Bagaimana tingkat efisiensi antara kedua jenis bantalan ditinjau dari aspek manajemen biaya, pemeliharaan, dan prinsip *Green Construction*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Menghitung dan membandingkan biaya awal (*Initial Cost*) antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta.
2. Menghitung dan membandingkan biaya pemeliharaan (*Maintenance Cost*) antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta.
3. Mengidentifikasi umur teknis (*Service Life*) antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis.
4. Menentukan jenis bantalan rel yang paling efisien dan berkelanjutan berdasarkan aspek manajemen biaya, pemeliharaan, dan prinsip *Green Construction* sebagai rekomendasi pengelolaan aset perkeretaapian.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui berapa biaya awal, biaya pemeliharaan, serta umur layanan dari bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis.
2. Memberikan gambaran perbandingan efisiensi biaya pemeliharaan antara penggunaan bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta, sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan manajemen prasarana jalan rel.
3. Memberikan informasi mengenai perbedaan kebutuhan dan intensitas pemeliharaan bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis, yang dapat

dimanfaatkan dalam perencanaan dan pengendalian kegiatan pemeliharaan jalan rel agar lebih efektif dan efisien.

4. Menyediakan dasar rekomendasi pemilihan jenis bantalan rel yang lebih efisien dari aspek biaya dan pemeliharaan, guna mendukung pengelolaan infrastruktur perkeretaapian yang berkelanjutan.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini hanya membahas bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis yang digunakan pada jalur rel R54 di wilayah DAOP 6 Yogyakarta.
2. Analisis difokuskan pada aspek efisiensi biaya pemeliharaan, tanpa membahas secara rinci analisis kekuatan struktural atau desain teknis bantalan rel.
3. Biaya yang dianalisis meliputi biaya awal pengadaan dan biaya pemeliharaan dalam jangka waktu tertentu, tidak mencakup biaya eksternal lain seperti gangguan operasional atau biaya sosial.
4. Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data sekunder (dokumen teknis, laporan pemeliharaan, dan literatur terkait) serta data primer terbatas apabila tersedia.
5. Penilaian aspek *Green Construction* dalam penelitian ini dibatasi pada efisiensi penggunaan sumber daya material berdasarkan frekuensi penggantian bantalan, intensitas kegiatan pemeliharaan, kebutuhan penggunaan bahan kimia selama pemeliharaan, serta potensi timbulan material bekas akibat penggantian bantalan selama periode analisis 50 tahun. Penelitian tidak melakukan *Life Cycle Assessment* (LCA), sehingga tidak menghitung secara kuantitatif emisi karbon, konsumsi energi proses produksi, transportasi material, penggunaan air, maupun dampak lingkungan pada tahap produksi dan akhir masa pakai..

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang berjudul "Analisis Perilaku Struktur Bantalan Jalur Kereta Api dengan Metode Elemen Hingga" yang dilakukan oleh (Kurniawan et al., 2022) membahas tentang Analisa tertang perilaku struktur dari bantalan beton kereta api menggunakan Analisa numerik menggunakan aplikasi berbasis Metode Elemen Hingga (MEH). Penelitian ini dilakukan pada lintas Surabaya – Mojokerto, pada penelitian ini menggunakan Bantalan WIKA tipe N-67, bantalan tersebut merupakan bantalan beton prategang untuk lebar jalan rel 1067, dengan spesifikasi bantalan ukuran 2000 mm x 250 mm x 215 mm, menggunakan kuat tekan beton Fc' = 54 Mpa/K.600, serta dimensi tulangan 8 ϕ 9. Penelitian ini menggunakan metode pengujian dan pembebanan yang mengadopsi dari *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association* (AREMA) *Part 5 Concrete Ties 2010* dan Silva, Ramon et, al 2020. Dalam penelitian ini dilakukan Langkah pembebanan momen positif ditengah bantalan. Kesimpulan yang didapatkan antara lain Berdasarkan hasil analisis data, dapat disimpulkan bahwa benda uji model bantalan beton mampu menahan beban desain sebesar 6,6 N/mm. Hingga pembebanan rencana maksimum, tidak teramati adanya keretakan pada benda uji. Tegangan tekan (*compressive stress*) yang terjadi pada bantalan beton sebesar 11,706 MPa, sedangkan tegangan tarik (*tensile stress*) sebesar 4,326 MPa, dengan lendutan (*displacement*) akibat pembebanan sebesar 0,083 mm. Selain itu, hasil evaluasi menggunakan persamaan Attard dan Setunge (1996) menunjukkan bahwa model bantalan beton tersebut memenuhi persyaratan dalam menumpu beban yang ditetapkan. Penelitian ini menunjukkan bahwa komponen jalan rel terutama bantalan harus memenuhi standar perencanaan agar layak untuk digunakan.

Makalah yang berjudul "*Railway Infrastructure Asset Management Optimization: Comparative Analysis of RAMS, LCC, and their Integration*

Approaches on Track Asset" yang dilakukan oleh (Maulana & Gunawan, 2023) membahas tentang bagaimana mengoptimalisasikan manajemen aset infrastruktur kereta api dengan menggunakan analisis RAMS, LCC, dan pendekatan integrasi. Pada makalah ini menggunakan studi kasus berbeda-beda, yaitu mengambil dari penelitian yang dilakukan di Tiongkok mengenai identifikasi bagian stasiun berisiko tinggi. Pada penelitian ini hanya menggunakan studi kasus implementasi RAMS, didapatkan pengurangan kapasitas memengaruhi jumlah maksimum kereta yang dapat dioperasikan, sedangkan pengurangan efisiensi memengaruhi kecepatan dan frekuensi kereta yang dioperasikan. Sedangkan untuk kasus implementasi LCC menggunakan studi kasus yang berada di Rusia, penelitian ini membandingkan biaya siklus hidup tiga struktur jalur kereta api (URTS) pada jalur ganda. Pada studi kasus ini didapatkan kesimpulan siklus hidup yang didapatkan pada setiap opsi dan didapatkan opsi yang dipakai. Untuk analisis RAMS dan LCC menggunakan penelitian tentang desain terowongan kereta api di batuan keras dan cuaca dingin di Norwegia, penelitian ini dianggap penting dalam memilih solusi teknis pelapis terowongan. Penelitian mengenai pemilihan aset antara jalur kereta api berbalas dan tanpa balas menemukan bahwa penggunaan jalur berbalas dan Rel tanpa balas memiliki hasil jangka pendek dan jangka panjang yang berbeda. Dalam jangka pendek, rel dengan balas berkinerja lebih baik, seperti yang terlihat dari nilai Present Value (PV) yang lebih rendah, tetapi dalam jangka panjang, rel tanpa balas lebih disukai karena biaya perawatan yang lebih rendah dari waktu ke waktu dan aspek RAMS yang lebih tinggi. Makalah ini juga membahas tentang bagaimana manajemen aset dapat dilakukan secara efektif untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas sistem perkeretaapian serta mengurangi biaya tidak perlu. Analisis RAMS dan LCC adalah dua konsep yang berkaitan dengan optimasi aset. Integrasi antara konsep RAMS dan LCC dapat dilakukan di semua fase siklus hidup kereta api, mulai dari perencanaan desain hingga fase operasi dan pemeliharaan. Pada fase desain, optimasi aset dapat dilakukan dengan lebih baik dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi.

(Indrakusuma et al., 2024) menyatakan "Pemeliharaan jalur kereta api di wilayah PT. Kereta Api Indonesia (Persero) saat ini menggunakan pendekatan

pemeliharaan jalur kereta api berdasarkan pengetahuan dan pengalaman masa lalu perusahaan, bukan pendekatan berbasis keandalan dan risiko. Untuk menentukan metode pemeliharaan berbasis keandalan atau risiko yang diketahui hemat biaya dan efisien, maka pendekatan yang disebut *Reliability, Availability, Maintainability and Safety* (RAMS) atau *Life Cycle Cost* (LCC) yang layak secara ekonomi harus diimplementasikan untuk mengoptimalkan kinerja aset." Pada penelitian dengan judul "*Decision Support to Improve Railway Track Maintenance in Indonesia: A Life Cycle Cost Approach*" meneliti bagaimana cara mengambil Keputusan untuk meningkatkan pemeliharaan jalur kereta api di Indonesia, Lokasi tidak terlalu dijelaskan secara rinci di penelitian ini hanya secara umum di Indonesia. Penelitian dimulai dengan pembahasan mengenai kegagalan atau degradasi komponen utama seperti rel, bantalan rel, dan balas, yang sangat penting dalam pengembangan sistem perkeretaapian. Model degradasi pada komponen utama dapat dikembangkan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan maupun penurunan kinerja pada komponen rel. Selanjutnya, berdasarkan berbagai kajian *Life Cycle Cost* (LCC) yang telah dilakukan sebelumnya, pemilihan material pada sistem perkeretaapian ditujukan untuk memperoleh alternatif yang paling optimal dari sisi biaya dan kinerja. Setelah material ditetapkan, jenis perawatan yang sesuai perlu ditentukan agar sistem perkeretaapian dapat beroperasi secara aman dan optimal. Pemeliharaan merupakan aspek penting untuk menjamin umur layanan komponen yang panjang. Hasil studi literatur selanjutnya dijadikan acuan dalam menentukan strategi perawatan yang tepat bagi sistem perkeretaapian di Indonesia, sehingga tercapai sistem yang aman, andal, dan efisien. Penelitian ini mengkaji penerapan Life Cycle Cost (LCC) sebagai pendekatan strategis dalam optimalisasi pemeliharaan jalur kereta api melalui integrasi model degradasi untuk mendukung pemilihan material dan strategi perawatan yang efisien secara biaya dan kinerja. Hasil penelitian menekankan pentingnya mempertimbangkan biaya jangka panjang dibandingkan biaya awal, serta merekomendasikan pemeliharaan korektif untuk komponen berisiko rendah dan pemeliharaan preventif berbasis kondisi untuk aset bernilai tinggi. Pemanfaatan teknologi dan data historis pemeliharaan turut berperan dalam menurunkan biaya siklus hidup. Secara keseluruhan, pendekatan LCC terbukti

efektif dalam meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keselamatan pemeliharaan jalur kereta api, khususnya dalam konteks perkeretaapian di Indonesia.

Pada penelitian dengan judul "*Service Life of Railway Wood Sleepers in Indonesia*" yang disusun oleh (Djarwanto et al, 2018) membahas tentang jenis kayu yang umum digunakan sebagai bantalan rel di Indonesia. Selain itu juga membahas tentang masa pakai pada jenis kayu tersebut. Penelitian ini dilakukan dibeberapa Lokasi, penelitian yang dilakukan di Rangkasbitung, Provinsi Banten menggunakan bantalan rel kayu berukuran 200 cm x 13 cm x 22 cm. Selain itu, penelitian juga dilakukan di beberapa Lokasi yang berada di Jawa Barat, Yogyakarta, dan Jawa Tengah. Penelitian ini menggunakan metode pengambilan sampel bertujuan dengan mengamati serta mengidentifikasi spesies kayu untuk rel kereta api dan organisme perusak kayu di Lokasi yang dapat dilalui, dicapai, dan diakses. Lokasi penelitian ditentukan secara acak, dengan objek kajian berupa bantalan kayu yang meliputi bantalan rel untuk penggunaan reguler, bantalan pada sambungan transisi dengan bantalan beton berukuran 200 cm × 13 cm × 22 cm, serta bantalan yang digunakan pada tikungan tajam dan persimpangan dengan panjang 300–400 cm × 13 cm × 22 cm, dan bantalan pada jembatan berukuran 200 cm × 22 cm × 18 cm. Jenis kayu yang digunakan pada penelitian ini yaitu balangeran (*Shorea balangeran Korth*.) sebanyak 134 buah, bintangur (*Calophyllum sp.*) sebanyak 62 buah, kempas (*Koompassia malaccensis Maing*.) sebanyak 30 buah, merbau (*Intsia bijuga OK*) sebanyak 7 buah, rasamala (*Altingia excelsa Noronha*) sebanyak 3 buah, balau (*Hopea sp.*) sebanyak 2 buah, dan kayu pasang (*Querqus sp*.) sebanyak 3 buah. Bantalan kayu yang telah digunakan dalam jangka waktu tertentu perlu diganti akibat mengalami kerusakan seperti patah atau retak. Kerusakan bantalan rel kayu dapat dipengaruhi oleh faktor fisik, antara lain suhu, kelembapan, paparan sinar matahari, dan kondisi cuaca, serta keausan mekanis akibat gesekan, tekanan, dan benturan. Selain itu, ketahanan bantalan kayu terhadap organisme perusak, khususnya jamur, bervariasi bergantung pada jenis kayu, lokasi dan metode pemasangan, intensitas lalu lintas kereta api, serta kondisi lingkungan tempat bantalan rel kayu digunakan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Triwinanto, 2017) dengan judul "Analisis Kekuatan Lentur Statis dan Dinamis Bantalan Sintetis untuk Jalan Kereta Api" ini dilatarbelakangi oleh tingginya biaya pemeliharaan serta permasalahan teknis dan lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan bantalan kayu, beton, dan baja pada infrastruktur perkeretaapian, khususnya pada segmen jembatan baja dan wesel yang memiliki keterbatasan penggunaan bantalan beton. Penelitian dilakukan di Laboratorium Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) BPPT, Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan, dengan tujuan mengevaluasi kinerja bantalan sintetis sebagai alternatif bantalan kayu. Metode yang digunakan meliputi pengujian kekuatan lentur statis dan dinamis terhadap bantalan sintetis berbahan urethane foam resin yang diperkuat glass fibre, dengan prosedur dan kriteria kelulusan mengacu pada standar Japanese Industrial Standard JIS E 1203:2007. Hasil pengujian menunjukkan bahwa bantalan sintetis mampu menahan beban lentur statis melebihi persyaratan standar serta tidak mengalami kerusakan pada pengujian lentur dinamis hingga 100.000 siklus pembebanan. Temuan ini membuktikan bahwa bantalan sintetis memenuhi persyaratan kekuatan mekanis yang ditetapkan dan memiliki potensi untuk digunakan sebagai pengganti bantalan kayu pada jalur kereta api, sehingga dapat dilanjutkan ke tahap uji lintasan (track test) guna menilai kinerja operasionalnya secara langsung pada sistem perkeretaapian di Indonesia.

2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Tinjauan Pustaka berdasarkan dari beberapa penelitian terdahulu yang sudah diberikan di atas memiliki perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan, perbedaan-perbedaan itu dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Penelitian Terdahulu						**Penelitian yang Akan Dilakukan**
Aspek	**Kurniawan dkk. (2022)**	**Maulana dan Gunawan (2023)**	**Indrakusuma dkk. (2024)**	**Djarwanto dkk. (2018)**	**Triwinanto (2017)**	**Penulis (2026)**
Judul	Analisis Perilaku Struktur Bantalan Jalur Kereta Api dengan Metode Elemen Hingga	*Railway Infrastructure Asset Management Optimization: Comparative Analysis of RAMS, LCC, and their Integration Approaches on Track Asset*	*Decision Support to Improve Railway Track Maintenance in Indonesia: A Life Cycle Cost Approach*	*Service Life of Railway Wood Sleepers in Indonesia*	Analisis Kekuatan Lentur Statis dan Dinamis Bantalan Sintetis untuk Jalan Kereta Api	Analisis *Life Cycle Cost* Antara Bantalan Rek Kayu dan Bantalan Sintetis Pada Jalur Jembatan Rel di DAOP 6 Yogyakarta
Tujuan Penelitian	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur bantalan beton kereta api prategang dalam	Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dan membandingkan pendekatan RAMS, LCC, serta integrasi	Penelitian ini bertujuan menentukan metode pemeliharaan jalur kereta api	Penelitian ini bertujuan mengevaluasi umur layanan serta penyebab kerusakan	Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kekuatan lentur statis dan dinamis bantalan sintetis sebagai alternatif	Penelitian ini bertujuan untuk menilai efisiensi biaya dan intensitas pemeliharaan antara bantalan kayu dan sintetis pada jalur rel

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Penelitian Terdahulu						Penelitian yang Akan Dilakukan
Aspek	**Kurniawan dkk. (2022)**	**Maulana dan Gunawan (2023)**	**Indrakusuma dkk. (2024)**	**Djarwanto dkk. (2018)**	**Triwinanto (2017)**	**Penulis (2026)**
Tujuan Penelitian	menahan beban rencana.menggunakan pendekatan Metode Elemen Hingga	keduanya dalam mengoptimalkan pengelolaan aset jalur kereta api.	yang efektif dan efisien di Indonesia dengan pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC).	bantalan kayu rel kereta api di Indonesia akibat faktor lingkungan, mekanis, dan biologis.	bantalan kayu pada jalan kereta api.	DAOP 6 Yogyakarta guna menentukan solusi pengelolaan aset yang paling ekonomis berdasarkan prinsip *Green Construction*.
Metode Penelitian	Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) dengan pemodelan tiga dimensi bantalan beton tipe N-67.	Studi literatur dengan analisis komparatif terhadap berbagai penelitian terkait penerapan RAMS dan LCC pada aset infrastruktur perkeretaapian.	Studi literatur dengan pengembangan model degradasi komponen rel, analisis pemilihan material, serta penentuan strategi pemeliharaan berbasis LCC.	Observasi visual lapangan, identifikasi jenis kayu secara makroskopis, serta pengamatan tingkat kerusakan.	Pengujian kekuatan lentur statis dan dinamis dengan prosedur dan kriteria kelulusan mengacu pada standar *Japanese Industrial Standard* JIS E 1203:2007.	Penerapan *Life Cycle Cost Analysis.*

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Penelitian Terdahulu						Penelitian yang Akan Dilakukan
Aspek	**Kurniawan dkk. (2022)**	**Maulana dan Gunawan (2023)**	**Indrakusuma dkk. (2024)**	**Djarwanto dkk. (2018)**	**Triwinanto (2017)**	**Penulis (2026)**
Lokasi Penelitian	Lintas Surabaya–Mojokerto.	Perkeretaapian di Indonesia dan negara lain.	Jalur kereta api di Indonesia, khususnya dalam konteks pengelolaan prasarana PT Kereta Api Indonesia (Persero).	Pulau Jawa dan sekitarnya, termasuk Banten, Jawa Barat, Yogyakarta, dan Jawa Tengah	Penelitian dilakukan di Laboratorium Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) BPPT, Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan	Jalur Rel R54 DAOP 6 Yogyakarta
Hasil Penelitian	Hasil analisis menunjukkan bahwa bantalan beton mampu menahan beban desain sebesar 6,6 N/mm dengan tegangan dan lendutan	Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi RAMS dan LCC memberikan pendekatan paling efektif dalam	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan analisis LCC mendukung pengambilan keputusan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa umur layanan bantalan kayu sangat dipengaruhi oleh jenis kayu,	Hasil penelitian menunjukkan bahwa bantalan sintetis memenuhi persyaratan kekuatan lentur statis dan dinamis	Hasil penelitian menunjukkan bahwa Perhitungan LCCA untuk kedua bantalan

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Penelitian Terdahulu						Penelitian yang Akan Dilakukan
Aspek	**Kurniawan dkk. (2022)**	**Maulana dan Gunawan (2023)**	**Indrakusuma dkk. (2024)**	**Djarwanto dkk. (2018)**	**Triwinanto (2017)**	**Penulis (2026)**
Hasil Penelitian	yang masih berada dalam batas aman serta tanpa terjadinya keretakan.	meningkatkan kinerja teknis sekaligus efisiensi biaya aset jalur kereta api sepanjang siklus hidupnya.	pemeliharaan yang lebih optimal, ekonomis, serta meningkatkan keandalan dan keselamatan jalur kereta api.	kondisi lingkungan, dan serangan jamur pelapuk, dengan kayu jati, ulin, balau, dan merbau memiliki ketahanan paling baik	sesuai standar JIS E 1203:2007 sehingga layak dilanjutkan ke tahap uji lintasan	tersebut lebih efisien bantalan sintetis dibanding bantalan kayu, walaupun biaya awal bantalan sintetis lebih tinggi.

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Infrastruktur Jalan Rel

Infrastruktur jalan rel merupakan komponen kritikal dalam sistem perkeretaapian yang bertanggung jawab untuk menyalurkan beban kendaraan dari rel ke tanah dasar secara aman dan efisien serta mempertahankan geometri lintasan yang sesuai standar operasional. Sesuai dengan (PM No. 60 Tahun 2012, 2012) tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, struktur jalan rel terdiri dari bangunan atas (*superstructure*) yang meliputi rel, penambat, dan bantalan, serta bangunan bawah (*substructure*) yang mencakup ballast, sub-ballast, dan tanah dasar. Struktur ini mencakup rel, bantalan (*sleepers*), ballast, dan komponen *subgrade* yang bekerja secara sinergis untuk menahan beban statis dan dinamis akibat lalu lintas kereta api. Perubahan bentuk atau degradasi komponen jalan rel akibat beban berulang dapat menyebabkan gangguan geometri lintasan yang berdampak pada keselamatan operasi kereta api, sehingga pemahaman terhadap karakteristik struktur jalan rel merupakan fondasi penting dalam penelitian ini.

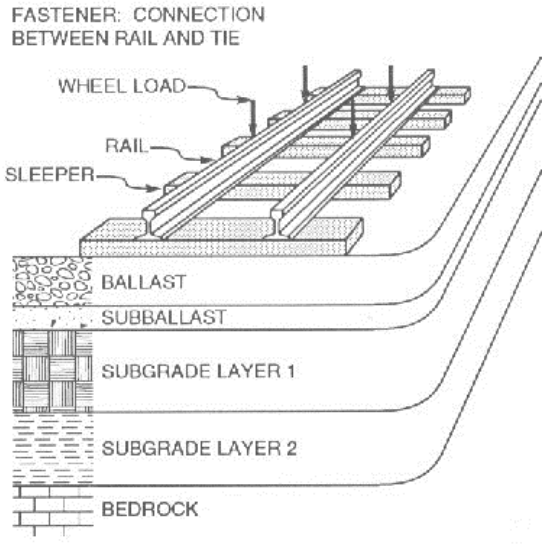
Analisis kondisi jalan rel melalui pendekatan teknis menunjukkan betapa pentingnya pemahaman struktur dan geometri lintasan dalam menjamin layanan prasarana kereta api. (Astor, 2013) menemukan bahwa deformasi geometri jalan rel akibat pengaruh beban lintasan dan faktor alam dapat memicu kerusakan yang terus berkembang jika tidak dilakukan pemeliharaan yang efektif hal ini menunjukkan keterkaitan langsung antara struktur jalan rel dan kebutuhan manajemen pemeliharaan.

Struktur atas jalan rel juga dipengaruhi oleh komponen komposit yang menyusun sistem bantalan, rel, dan ballast, yang harus dirancang dan dipilih sesuai dengan klasifikasi layanan lintasan. Menurut penelitian oleh (Yusuf et al., 2022) menyatakan bahwa evaluasi komponen struktur atas, termasuk rel dan bantalan yang digunakan, perlu dilakukan dengan mempertimbangkan beban dinamis dan

standar teknis perkeretaapian untuk menjamin kinerja operasional yang aman dan efektif. Hal ini menunjukkan bahwa komponen mekanis dan geometrik dari infrastruktur jalan rel memiliki peran penting dalam menentukan kebutuhan pemeliharaan serta keputusan pemilihan material yang lebih efisien.

Komponen struktur atas dan geometri jalan rel juga dapat dinilai melalui evaluasi yang lebih spesifik terhadap elemen fisik, daya angkut lintasan dan hubungan tegangan pada dasar rel merupakan faktor penentu kelas layanan jalan rel serta keandalan infrastruktur dalam jangka panjang. Analisis ini memberikan dasar teknis bagi perencanaan pemeliharaan, karena komponen jalan rel yang bekerja di bawah beban tinggi akan mengalami penurunan performa lebih cepat tanpa strategi pemeliharaan yang tepat.

Dengan demikian, infrastruktur jalan rel bukan hanya sekedar jalur fisik yang dilalui kereta api, tetapi juga merupakan sistem kompleks yang memerlukan pemahaman menyeluruh terhadap aspek teknis, mekanis, dan pemeliharaan. Pemilihan material bantalan, penentuan jadwal pemeliharaan, serta strategi perbaikan lintasan harus didasarkan pada evaluasi teknis dan data kondisi struktur rel untuk memastikan layanan operasional yang aman, efisien, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.



Gambar 3. 1 Struktur Jalan Rel
(Sumber: https://bptsugm.com/struktur-jalan-rel/)

3.2 Bantalan Rel

Infrastruktur perkeretaapian merupakan sistem transportasi darat yang dirancang untuk mendukung pergerakan manusia dan barang secara massal, efisien, dan berkelanjutan. Jalan rel sebagai bagian utama dari infrastruktur perkeretaapian terdiri atas rel, bantalan, ballast, dan tanah dasar yang bekerja secara terpadu dalam menerima serta mendistribusikan beban kereta api. Kinerja jalan rel sangat dipengaruhi oleh kondisi setiap komponen, terutama bantalan rel yang menerima beban dinamis secara berulang. Menurut (PM No. 60 Tahun 2012, 2012) dalam "Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012", Bantalan berfungsi untuk menyalurkan beban kereta api serta berat konstruksi jalan rel ke lapisan balas, sekaligus menjaga lebar sepur dan kestabilan rel terhadap gaya ke arah luar. Bantalan dapat dibuat dari bahan kayu, baja/besi, maupun beton. Pemilihan jenis bantalan disesuaikan dengan kelas jalan rel, kondisi lapangan, serta ketersediaan material, dengan spesifikasi teknis yang mengacu pada ketentuan yang berlaku. Secara umum, bantalan terdiri atas bantalan beton, bantalan kayu, dan bantalan besi.

Dalam lingkup operasional Daerah Operasi (DAOP) 6 Yogyakarta, peningkatan standar infrastruktur jalan rel menjadi prioritas utama seiring dengan lonjakan frekuensi perjalanan kereta api dan peningkatan beban gandar di lintas raya. Sebagai respons terhadap kebutuhan tersebut, penggunaan rel tipe R54 dengan berat profil nominal 54,43 kg/m telah ditetapkan sebagai standar baku konstruksi jalan rel modern di jalur utama. Mengacu pada ketentuan dalam Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 60 Tahun 2012, karakteristik mekanik rel R54 memiliki keunggulan signifikan berupa momen inersia dan kekakuan (*stiffness*) yang jauh lebih tinggi dibandingkan profil rel generasi sebelumnya (tipe R42). Konsekuensi logis dari tingginya rigiditas rel ini menuntut adanya dukungan sistem penambat dan struktur bantalan yang memiliki performa superior dalam menjaga stabilitas geometri jalan rel, khususnya dalam mempertahankan lebar sepur (*track gauge*) yang presisi. Lebih jauh lagi, interaksi dinamis antara rel R54 yang kaku dengan bantalan menjadi titik kritis; sistem ini harus mampu memberikan redaman efektif terhadap getaran berfrekuensi tinggi yang dihasilkan oleh roda kereta. Kegagalan

dalam meredam energi getaran ini berpotensi memicu keretakan lelah (*fatigue crack*) pada komponen penambat elastis serta mempercepat degradasi struktural pada bantalan itu sendiri sebelum mencapai umur teknis yang direncanakan.

Tabel 3. 1 Kelas Jalan Rel

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	V maks (km/jam)	P maks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan / Jarak Antar sumbu bantalan (cm)	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
I	>20. 10^6	120	18	R.60/ R54	Beton / 60	Elastis Ganda	30	60
II	10. 10^6- 20. 10^6	110	18	R.54/ R.50	Beton/Kayu / 60	Elastis Ganda	30	50
III	5. 10^6- 10. 10^6	100	18	R.54/ R.50/ R.42	Beton/Kayu/ Baja / 60	Elastis Ganda	30	40
IV	2,5. 10^6- 5. 10^6	90	18	R.54/ R.50/ R.42	Beton/Kayu/ Baja / 60	Elastis Ganda/ Tunggal	25	40
V	<2,5. 10^6	80	18	R.42	Kayu/Baja / 60	Elastis Tunggal	25	35

Bantalan kayu merupakan jenis bantalan konvensional yang masih digunakan di Indonesia, terutama pada jalur tertentu seperti jembatan rel baja dan lintasan dengan kebutuhan elastisitas tinggi. Keunggulan bantalan kayu terletak pada sifat elastisnya yang baik, kemudahan pemasangan, serta kemampuan meredam getaran. Namun demikian, bantalan kayu memiliki keterbatasan berupa umur layanan yang relatif pendek serta kerentanan terhadap pengaruh lingkungan, seperti kelembaban dan serangan organisme perusak. Seperti yang dikatakan oleh (Indrakusuma et al., 2024) pada makalah "*Decision Support to Improve Railway Track Maintenance in Indonesia: A Life Cycle Cost Approach*", Pada bantalan rel kayu, pembusukan jamur, retakan pada ujung bantalan rel, dan rayap diidentifikasi sebagai penyebab utama kegagalan. Pada umumnya banyak cara yang dilakukan untuk mempertahankan umur layanan bantalan kayu, seperti penambahan obat atau

melalui proses pengawetan. Pada penelitian yang dibuat oleh (Djarwanto et al, 2018), bantalan kayu yang sudah diolah dapat memiliki masa pakai lebih dari 18 tahun. Merajuk pada tabel 3.1, DAOP 6 Yogyakarta merupakan Daerah Operasional yang sudah menggunakan Jalan Rel Kelas I, maka dari itu perlunya penggunaan jenis bantalan rel kayu harus baik sesuai dengan Kelas Jalan Rel tersebut. Penelitian itu juga menjelaskan beberapa jenis bantalan rel, hal yang merusak bantalan tersebut, kondisi yang diamati, masa pakai, serta kelas daya tahan bantalan rel. Jenis bantalan kayu Kelas I seperti balau yang memiliki masa pakai hampir 48 tahun dan tidak ada organisme perusak, setelah itu ada Merbau dengan umur layanan 49 tahun tetapi organisme perusak adalah fungi.



Gambar 3. 2 Bantalan Rel Kayu
(Sumber: www.yogyakarta.kompas.com)

Bantalan sintetis dikembangkan sebagai alternatif untuk mengatasi keterbatasan bantalan kayu. Bantalan ini umumnya terbuat dari material polimer atau komposit yang memiliki ketahanan tinggi terhadap air, korosi, dan faktor lingkungan lainnya. Selain itu, bantalan sintetis tidak memerlukan bahan baku kayu alam sehingga lebih ramah lingkungan. Menurut (Triwinanto, 2017) dalam jurnal berjudul “Analisis Kekuatan Lentur Statis dan Dinamis Bantalan Sintetis untuk Jalan Kereta Api”, menyatakan bahwa bantalan sintetis memiliki kekuatan mekanis yang memadai serta umur layanan yang lebih panjang dibandingkan bantalan kayu.

Hal ini menjadikan bantalan sintetis sebagai alternatif yang potensial untuk meningkatkan efisiensi pemeliharaan jalan rel.



Gambar 3. 3 Bantalan Rel Sintetis
(Sumber: https://warstek.com/bantalan-komposit/)

3.3 Konsep Pemeliharaan Infrastruktur

Pemeliharaan dalam manajemen infrastruktur didefinisikan sebagai kombinasi dari seluruh tindakan teknis, administratif, dan manajerial selama siklus hidup suatu aset yang ditujukan untuk mempertahankannya dalam, atau mengembalikannya ke, suatu keadaan di mana aset tersebut dapat melakukan fungsi yang dibutuhkan. Menurut (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2011), pemeliharaan prasarana perkeretaapian adalah kegiatan yang wajib dilakukan untuk menjamin keandalan, keamanan, dan kelaikan operasi. Secara strategis, pemeliharaan dibagi menjadi dua pendekatan utama: pemeliharaan preventif (*preventive maintenance*) yang dilakukan secara terjadwal untuk mencegah kegagalan, dan pemeliharaan korektif (*corrective maintenance*) yang dilakukan setelah terjadi kerusakan. Efisiensi manajemen pemeliharaan sangat krusial karena biaya pemeliharaan sering kali mendominasi total pengeluaran operasional jangka panjang, sering kali melebihi biaya investasi awal konstruksi itu sendiri.

3.4 Analisis Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost Analysis*)

Untuk mengukur efisiensi ekonomi dari strategi pemeliharaan yang berbeda, diperlukan pendekatan evaluasi yang komprehensif menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung total biaya suatu aset atau sistem selama seluruh umur layanannya, dimulai dari tahap perencanaan, pengadaan, konstruksi, operasi, pemeliharaan, hingga penggantian atau akhir masa pakai. LCCA tidak hanya mempertimbangkan biaya awal, tetapi juga memperhitungkan biaya-biaya yang timbul di masa mendatang dengan memperhatikan nilai waktu uang (*time value of money*).

Menurut (Utari et al., 2023), *Life Cycle Cost Analysis* adalah pendekatan evaluasi biaya yang bertujuan untuk memperoleh alternatif dengan total biaya paling ekonomis sepanjang umur layanan suatu infrastruktur, sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam manajemen aset konstruksi. Pendekatan ini dinilai lebih komprehensif dibandingkan analisis biaya konvensional yang hanya berfokus pada biaya awal konstruksi.

Konsep LCCA juga sejalan dengan prinsip pengelolaan infrastruktur berkelanjutan, karena mampu menunjukkan hubungan antara umur layanan, kebutuhan pemeliharaan, serta efisiensi biaya jangka panjang. Oleh karena itu, LCCA banyak diterapkan dalam analisis bangunan gedung, jalan, jembatan, maupun infrastruktur transportasi seperti jalan rel dan komponennya.

3.5 Biaya Pemeliharaan Bantalan Rel

Biaya pengelolaan jalan rel tidak hanya mencakup biaya awal konstruksi, tetapi juga biaya pemeliharaan dan penggantian komponen selama umur layanannya. Pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC) digunakan untuk mengevaluasi total biaya yang timbul sepanjang masa layanan infrastruktur jalan rel, termasuk biaya pengadaan, pemeliharaan rutin, perbaikan, dan penggantian komponen. Menurut (Indrakusuma et al., 2024) dalam jurnal berjudul "*Decision Support to Improve Railway Track Maintenance in Indonesia: A Life Cycle Cost Approac*h", Penerapan *Life Cycle Cost* (LCC) memungkinkan pengelola infrastruktur

perkeretaapian dalam menetapkan strategi pemeliharaan yang optimal dan hemat biaya dengan mempertimbangkan keseluruhan siklus umur aset jalan rel.

Selain itu, biaya pemeliharaan jalan rel sangat dipengaruhi oleh jenis material komponen yang digunakan, khususnya bantalan rel yang menerima beban dinamis secara berulang. Material dengan umur layanan lebih panjang dan kebutuhan pemeliharaan lebih rendah cenderung menghasilkan biaya siklus hidup yang lebih efisien. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa perencanaan pemeliharaan berbasis *Life Cycle Cost* (LCC) mampu menekan biaya jangka panjang tanpa mengurangi tingkat keselamatan maupun kinerja lintasan, sehingga dapat dijadikan landasan penting dalam pengambilan keputusan manajemen konstruksi dan pengelolaan aset jalan rel (Indrakusuma et al., 2024).

Dalam manajemen konstruksi dan aset infrastruktur, pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC) digunakan untuk mengevaluasi total biaya yang dikeluarkan selama umur layanan suatu komponen atau sistem. LCC mempertimbangkan biaya awal konstruksi, biaya pemeliharaan rutin, biaya rehabilitasi, serta biaya penggantian, sehingga memberikan gambaran biaya yang lebih realistis dibandingkan hanya menilai biaya awal.

$$\text{LCC} = C_0 + C_{pemeliharaan} + C_{penggantian} \quad (3.1)$$

Di mana:

C_0 = Biaya Awal (Pengadaan + pemasangan Bantalan rel)

$C_{pemeliharaan}$ = Biaya Pemeliharaan

$C_{penggantian}$ = Biaya Penggantian

Seluruh biaya tersebut harus dianalisis secara terintegrasi menggunakan pendekatan LCCA. Secara umum, perhitungan LCC diambil dari beberapa jurnal maupun penelitian seperti contohnya adalah ISO 15686-5. Perbedaan jenis bantalan rel, seperti bantalan kayu dan bantalan sintetis, akan memengaruhi komponen biaya dalam analisis LCC, khususnya pada biaya pemeliharaan dan penggantian. Bantalan dengan umur layanan lebih pendek cenderung meningkatkan nilai $C_{penggantian}$ akibat frekuensi penggantian yang lebih tinggi. Oleh karena itu,

analisis biaya dan pemeliharaan berbasis LCC menjadi alat penting dalam pengambilan keputusan manajemen konstruksi untuk menentukan material bantalan yang paling efisien secara ekonomi dalam jangka panjang.

3.5.1 Biaya Awal (C_0)

Biaya awal (*initial cost*) mencakup seluruh biaya yang dikeluarkan pada tahap awal, seperti biaya pengadaan material dan biaya pemasangan. Dalam konteks bantalan rel, biaya awal meliputi harga bantalan dan biaya instalasi di lapangan. Biaya awal mencakup beberapa Kegiatan, seperti berikut.

a. Biaya Material

   Pada biaya material termasuk harga pembelian bantalan beserta pelengkap.

b. Biaya Pemasangan

   Pada biaya ini termasuk Upaya tenaga kerja dan sewa alat berat untuk pemasangan bantalan baru.

Rumus Biaya Awal dapat dilihat dibawah ini.

$$C_0 = (V_{material} \text{ x } H_{material}) + (V_{upah} \text{ x } H_{upah}) \quad (3.2)$$

Dimana:

$V_{material}$ = Volume Pekerjaan Material

$H_{material}$ = Harga Satuan Material

V_{upah} = Volume Pekerjaan Pemasangan

H_{upah} = Harga Satuan Pemasangan

Pada biaya awal (C_0) bantalan kayu dan bantalan sintetis pasti memiliki variabel atau nilai yang berbeda, perbedaan itu dapat dilihat dalam tabel berikut ini.

Tabel 3. 2 Perbedaan Komponen Biaya Awal (Co) antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis

Komponen Biaya	Bantalan Kayu	Bantalan Sintetis
Harga Material Satuan	Sedang, Kayu sesuai dengan Kelas yang digunakan relatif sedang untuk harga satuan.	Tinggi, Bantalan dengan material sintetis merupakan material komposit impor dengan harga yang relatif tinggi.
Biaya Pemasangan	Sedang, pemasangan untuk bantalan kayu memerlukan modifikasi untuk dipasang di lapangan, seperti dibor atau pemotongan.	Sedang, sama seperti kayu. Material sintetis juga perlu dimodifikasi dengan cara dibor.
Ketersediaan	Sedang hingga tinggi, untuk saat ini bantalan dengan material kayu sudah semakin sulit dicari.	Sedang, material sintetis harus dipesan atau *indent* dari pabrikan, namun kualitas terjamin seragam.

3.5.2 Biaya Pemeliharaan ($C_{pemeliharaan}$)

Selanjutnya, biaya pemeliharaan (*maintenance cost*) merupakan biaya rutin maupun berkala yang dikeluarkan untuk menjaga kinerja bantalan rel agar tetap memenuhi standar teknis selama umur layanannya. Biaya pemeliharaan adalah biaya operasional yang dikeluarkan secara periodik untuk mempertahankan kinerja aset agar tetap memenuhi standar keselamatan (PM No. 32 Tahun 2011). Biaya ini harus dikonversi ke nilai sekarang (*Present Value*). Kegiatan biaya pemeliharaan dapat dilihat dibawah ini.

a. Pengencangan Penambat
   Mengencangkan tirfon atau baut yang kendor akibat getaran kereta.
b. Perawatan Kimia
   Pemberian senyawa kimia atau oli.
c. Perbaikan Lebar Sepur (*Regauging*)
   Menggeser pelat landas dan membuat lubang baru jika rel melebar.

d. Inspeksi Visual

Pemeriksaan kondisi fisik bantalan oleh Juru Penilik Jalan (JPJ).

Pada biaya pemeliharaan ($C_{pemeliharaan}$) bantalan kayu dan bantalan sintetis pasti memiliki variabel atau nilai yang berbeda, perbedaan itu dapat dilihat dalam tabel berikut ini.

Tabel 3. 3 Perbedaan Komponen Biaya Pemeliharaan ($C_{pemeliharaan}$) antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis

Item Kegiatan	Bantalan Kayu	Bantalan Sintetis
Pengencangan Penambat	Frekuensi Tinggi. Baut/tirfon sering longgar akibat penyusutan kayu.	Frekuensi Rendah. Material kaku (rigid) memegang baut dengan kuat secara permanen.
Perawatan Kimia	Wajib. Perlu pelaburan residu/oli bekas rutin untuk cegah rayap & jamur.	Tidak Perlu. Material polimer anti rayap, anti jamur, dan tahan korosi.
Perbaikan Lebar Sepur	Sering. Lubang tirfon mudah membesar (dol) akibat gaya lateral kereta.	Jarang/Hampir Nihil. Lubang baut sangat presisi dan tidak mudah aus.
Inspeksi Visual	Higroskopis (Menyerap air). Mengembang saat basah, menyusut saat kering.	Hidrofobik (Menolak air). Dimensi stabil, tidak terpengaruh cuaca.

3.5.3 Biaya Penggantian ($C_{penggantian}$)

Biaya penggantian (*replacement cost*) yang timbul apabila suatu komponen tidak mampu lagi berfungsi hingga akhir umur rencana sistem. Bantalan rel kayu, misalnya, memiliki umur layanan yang relatif lebih pendek dibandingkan bantalan sintetis, sehingga berpotensi memerlukan penggantian lebih dari satu kali dalam periode analisis. Biaya penggantian adalah biaya masa depan yang timbul ketika aset mencapai batas umur teknisnya (*service life*) dan harus diganti dengan unit baru

dalam periode analisis yang ditentukan. Kegiatan yang dilakukan dalam biaya penggantian adalah sebagai berikut.

a. Konsep Umur Teknis

   Penentuan biaya penggantian sangat bergantung pada umur layanan material

b. Implikasi pada Perhitungan LCC (Periode 50 tahun)

   - Skenario Kayu: Akan terjadi kegiatan pembongkaran dan pemasangan ulang sebanyak 5 kali (pada tahun ke-10, ke-20, ke-30, ke-40 dan ke-50). Biaya ini meliputi upah bongkar, harga material baru (dengan inflasi), dan upah pasang.
   - Skenario Sintetis: Tidak ada kegiatan penggantian (replacement) selama periode analisis 50 tahun.

Rumus *Present Value* (Nilai Sekarang) dapat dilihat dibawah ini.

$$PV_{Replacement} = \frac{C_r}{(1+i)^t} \tag{3.3}$$

Dimana:

- $PV_{Replacement}$ = *Present Value*
- C_t = *Future Cost / Replacement Cost.* Biaya penggantian bantalan (Material + Upah) pada tahun ke-t.
- i = *Discount Rate.* Suku bunga diskonto (biasanya mengikuti suku bunga Bank Indonesia atau asumsi inflasi, missal 5%-15%)
- t = Tahun ke berapa penggantian dilakukan.

Perbedaan bantalan kayu dan bantalan sintetis dalam biaya penggantian dapat dilihat dalam tabel dibawah ini.

Tabel 3. 4 Perbedaan Komponen Biaya Penggantian ($C_{penggantian}$) antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis

Item Kegiatan	Bantalan Kayu	Bantalan Sintetis
Umur Teknis (*Service Life*)	10 – 15 Tahun. Tergantung kondisi lingkungan (kelembapan/serangga).	≥50 Tahun. Berdasarkan uji penuaan material (*aging test*).
Faktor Perusak Utama	Pelapukan biologis (jamur, bakteri pembusuk), serangan rayap, dan cuaca.	Hampir tidak ada faktor perusak alami, kecuali kecelakaan fisik ekstrem.
Frekuensi Penggantian	4-5 Kali. (Contoh: Diganti pada tahun ke-10, ke-20, ke-30, ke-40, dan ke-50).	1 Kali. (diganti sekali selama periode analisis 50 tahun).
Dampak Operasional	Mengganggu perjalanan kereta (Waktu Jendela/Window Time) setiap kali ada proyek penggantian.	Minim gangguan operasional karena dipasang sekali untuk jangka panjang.
Nilai Sisa (*Salvage Value*)	Nol/Negatif. Kayu bekas biasanya sudah lapuk/hancur dan jadi limbah. Tetapi ada *case* Dimana material yang sudah selesai digunakan bisa digunakan kembali.	Ada. Material FFU bekas masih bisa didaur ulang (recycle) atau dipakai ulang untuk keperluan lain.

3.6 *Green Construction*

Green Construction merupakan pendekatan dalam penyelenggaraan konstruksi yang menekankan efisiensi penggunaan sumber daya, pengurangan dampak lingkungan, serta peningkatan kinerja infrastruktur sepanjang umur layanannya. Konsep ini tidak hanya berfokus pada tahap pelaksanaan konstruksi, tetapi juga mencakup tahap perencanaan, pemilihan material, operasi, dan pemeliharaan. Dalam konteks infrastruktur transportasi, penerapan *green construction* dapat dilakukan melalui penggunaan material alternatif yang ramah

lingkungan dan memiliki daya tahan tinggi. Bantalan rel sintetis, misalnya, dikembangkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap kayu alam dan menekan laju eksploitasi sumber daya hutan. (Triwinanto, 2017) menyatakan bahwa bantalan sintetis memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan lembab dan beban dinamis berulang, sehingga berpotensi menurunkan frekuensi penggantian dan volume limbah material selama umur layanan jalan rel.

Pendekatan *green construction* juga berkaitan erat dengan konsep biaya siklus hidup. Infrastruktur dengan umur layanan lebih panjang dan kebutuhan pemeliharaan yang lebih rendah akan menghasilkan biaya siklus hidup yang lebih efisien serta dampak lingkungan yang lebih kecil. Hal ini sejalan dengan ketentuan Permen PUPR Nomor 05/PRT/M/2015 tentang Bangunan Gedung Hijau, yang menganjurkan penggunaan pendekatan biaya siklus hidup dalam perencanaan infrastruktur guna mendukung pembangunan berkelanjutan.

Dengan demikian, analisis efisiensi biaya dan pemeliharaan bantalan rel menggunakan pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dapat menjadi instrumen evaluasi *green construction*, karena mampu menunjukkan keterkaitan antara pemilihan material, umur layanan, biaya jangka panjang, dan dampak lingkungan.

3.7 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka dan landasan teori yang telah diuraikan sebelumnya, maka disusunlah hipotesis penelitian sebagai jawaban sementara terhadap rumusan masalah. Ringkasan hipotesis mengenai perbandingan biaya awal, biaya pemeliharaan, umur teknis, dan efisiensi total Life Cycle Cost (LCC) antara bantalan kayu dan bantalan sintetis disajikan dalam Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 5 Hipotesis

Bantalan	Biaya Awal	Biaya Pemeliharaan	Umur Layanan	*Life Cycle Cost* (per 50 tahun)
Bantalan Kayu	Rp3,500,000/batang	Rp150,000	10 tahun	Rp4,428,726.76
Bantalan Sintetis	Rp4,000,000/batang	Rp100,000	50 tahun	Rp4,123,670.74

Hipotesis yang sudah diperoleh didapatkan bahwa untuk perhitungan *Life Cycle Cost* dengan umur layanan 50 tahun dengan bantalan kayu dilakukan penggantian selama setiap 10 tahun sekali adalah bantalan kayu memerlukan biaya lebih tinggi dibandingkan bantalan sintetis.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif–komparatif dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik biaya dan pemeliharaan bantalan rel kayu dan bantalan sintetis pada jalur rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta. Sementara itu, pendekatan komparatif digunakan untuk membandingkan efisiensi biaya dan pemeliharaan kedua jenis bantalan rel berdasarkan siklus hidupnya.

Pendekatan kuantitatif diterapkan melalui perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) untuk mengevaluasi total biaya selama umur layanan bantalan rel. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan pendekatan konseptual *Green Construction* dalam menafsirkan hasil analisis, khususnya terkait efisiensi sumber daya, dampak lingkungan, dan efektivitas pengelolaan pemeliharaan infrastruktur rel.

4.2 Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi penelitian berada pada jalur rel di DAOP 6 Yogyakarta, khususnya pada segmen lintasan yang menggunakan bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada masih digunakannya bantalan rel kayu pada kondisi tertentu serta mulai diterapkannya bantalan sintetis sebagai alternatif material.

Objek penelitian meliputi :

1. Bantalan rel kayu.
2. Bantalan rel sintetis.
3. Data umur layanan bantalan rel.
4. Strategi pemeliharaan bantalan rel.

5. Aktivitas pemeliharaan dan biaya yang terkait selama umur layanan bantalan rel.

4.3 Jenis dan Sumber Data

4.3.1 Data Primer

Data primer diperoleh melalui:

- Observasi lapangan terhadap kondisi bantalan rel kayu dan sintetis.
- Wawancara atau diskusi teknis dengan pihak terkait (misalnya pengelola prasarana) untuk memperoleh gambaran umum pola pemeliharaan, seperti:
  1. Frekuensi penggantian bantalan.
  2. Jenis kerusakan bantalan.
  3. Metode pemeliharaan yang ditetapkan.

4.3.2 Data Sekunder

Data sekunder meliputi:

- Standar teknis perkeretaapian terkait bantalan rel.
- Data biaya pengadaan bantalan, biaya pemasangan, dan biaya pemeliharaan.
- Data umur layanan bantalan rel dari literatur dan jurnal ilmiah.
- Jurnal dan publikasi ilmiah terkait LCCA, manajemen aset rel, dan *green construction.*

4.4 Variabel Penelitian

Variable yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi:

1. Biaya awal (*initial cost*) bantalan rel seperti biaya awal pengadaan dan pemasangan bantalan.
2. Biaya pemeliharaan (*maintenance cost*) selama umur layanan seperti biaya pemeliharaan rutin dan perbaikan.
3. Umur layanan bantalan rel.

4. Data tentang biaya siklus hidup analisis (*Life Cycle Cost Analysis*) yang berisi *Discount Rate* atau Tingkat suku bunga, *Present Value* (PV) atau nilai saat ini dari biaya masa depan.
5. Aspek keberlanjutan dan efisiensi pengelolaan pemeliharaan (ditinjau secara konseptual melalui pendekatan *Green Construction*)

4.5 Alat yang Digunakan

Peralatan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini meliputi beberapa perangkat, sebagai berikut:

1. *Handphone* atau Kamera, berfungsi sebagai alat untuk mendokumentasikan bantalan rel yang sudah ditentukan.
2. *Notebook* dan Alat Tulis, berfungsi sebagai alat untuk mencatat segala hal seperti variabel atau data yang dibutuhkan.
3. Laptop, berfungsi sebagai alat untuk merangkum atau alat tambahan untuk menyimpan catatan yang sudah dicatat di *notebook.* Selain itu, digunakan untuk sarana pengolahan data.
4. Software Microsoft Excel, digunakan untuk olah data.

4.6 Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini meliputi beberapa hal, sebagai berikut:

4.6.1 Analisis *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)

Metode Life Cycle Cost Analysis (LCCA) digunakan untuk menghitung total biaya bantalan rel selama umur layanannya. LCCA mencakup seluruh biaya yang timbul sejak tahap awal hingga akhir masa layanan, yang secara umum dirumuskan sebagai:

$$\text{LCC} = C_0 + C_{pemeliharaan} + C_{penggantian} \quad (4.1)$$

Di mana:

C_0 = Biaya Awal (Pengadaan + pemasangan Bantalan rel)

$C_{pemeliharaan}$ = Biaya Pemeliharaan

$C_{penggantian}$ = Biaya Penggantian

Perhitungan LCCA dilakukan untuk masing-masing jenis bantalan rel, kemudian hasilnya dibandingkan untuk menentukan jenis bantalan yang lebih efisien dari aspek biaya siklus hidup. Selain itu, LCCA merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung total biaya suatu aset selama umur layanannya dengan mempertimbangkan nilai uang terhadap waktu (*time value of money*). Biaya yang terjadi pada masa depan harus dikonversi menjadi nilai saat ini menggunakan faktor diskonto agar dapat dibandingkan secara setara, seperti berikut ini.

a. *Discount Rate* (Tingkat Diskonto)

   Discount Rate digunakan untuk menghitung nilai uang terhadap waktu. Konsep ini menyatakan bahwa nilai uang saat ini lebih berharga dibandingkan nilai uang pada masa mendatang karena dipengaruhi inflasi, bunga, dan risiko investasi. Nilai *discount rate* mengacu pada Suku bunga Bank Indonesia, Tingkat inflasi, dan standar evaluasi proyek infrastruktur. Pada penelitian ini, Tingkat diskonto dinyatakan dengan (i).

b. *Present Value* (PV)

   Present Value digunakan untuk menghitung nilai saat ini dari biaya yang akan terjadi pada masa mendatang, dapat ditulis sebagai berikut.

$$PV = \frac{Ct}{(1+i)^t} \tag{4.2}$$

   Keterangan:

   - PV = *Present Value*
   - Ct = Biaya tahun ke-t.
   - i = *Discount rate*
   - t = Periode waktu

   Metode ini digunakan untuk mengonversi seluruh biaya pemeliharaan masa depan menjadi nilai saat ini agar dapat dibandingkan secara langsung.

c. *Future Value* (FV)

Future Value digunakan untuk menghitung nilai biaya pada masa mendatang berdasarkan tingkat diskonto tertentu. FV dapat dituliskan sebagai berikut.

$$FV = PV(1+i)^n \tag{4.3}$$

Keterangan:

- PV = *Present Value*
- FV = *Future Value*
- i = *Discount rate*
- n = Periode waktu

Perhitungan FV digunakan untuk memproyeksikan kenaikan biaya pemeliharaan atau penggantian bantalan rel pada masa mendatang akibat inflasi dan perubahan nilai uang.

d. Perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)

Total biaya siklus hidup dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$LCCA = C_0 + \Sigma \frac{C_t}{(1+i)^n} \tag{4.4}$$

Atau

$$LCCA = C_0 + \Sigma PV \tag{4.5}$$

Keterangan:

- LCCA = Total biaya siklus hidup.
- C_0 = Biaya awal.
- C_t = Biaya pada tahun ke-n
- PV = *Present Value*
- i = tingkat diskonto
- t = tahun ke-n

Metode ini digunakan untuk membandingka efisiensi biaya bantalan rel kayu dan bantalan sintetis selama umur layanan. Alternatif dengan nilai LCCA paling rendah dianggap lebih ekonomis dalam jangka panjang.

4.6.2 Analisis Perbandingan Efisiensi Pemeliharaan Biaya

Hasil perhitungan LCCA digunakan sebagai dasar untuk:

- Membandingkan total biaya siklus hidup bantalan rel kayu dan bantalan sintetis dalam jangka waktu tertentu.
- Mengidentifikasi perbedaan pola dan frekuensi pemeliharaan.
- Menilai efisiensi biaya jangka panjang dari kedua jenis bantalan.

4.6.3 Pendekatan *Green Construction*

Pendekatan *Green Construction* dalam penelitian ini dilakukan secara kualitatif-komparatif tanpa menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA), dengan penilaian yang dibatasi pada empat indikator utama, yaitu.

1. Efisiensi penggunaan material,
2. Intensitas pemeliharaan,
3. Penggunaan bahan kimia, dan
4. Potensi timbulan material bekas akibat penggantian bantalan.

Penilaian dilakukan dengan membandingkan umur layanan, frekuensi penggantian, kebutuhan kegiatan pemeliharaan, serta penggunaan bahan kimia antara bantalan kayu dan bantalan sintetis selama periode analisis 50 tahun, kemudian dikaitkan dengan hasil LCCA untuk menilai alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan. Pendekatan ini tidak mencakup perhitungan kuantitatif emisi karbon, konsumsi energi, penggunaan air, maupun dampak lingkungan total dari proses produksi dan akhir masa pakai.

4.7 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini meliputi beberapa langkah, sebagai berikut:

4.7.1 Persiapan dan Perizinan Penelitian

Tahap awal ini difokuskan pada pengurusan administrasi formal. Penulis mengajukan surat permohonan penelitian dari kampus yang ditujukan kepada Manager Jalan Rel dan Jembatan di Kantor DAOP 6 Yogyakarta. Selain urusan surat-menyurat, tahap ini juga digunakan untuk melakukan survei pendahuluan guna menentukan titik lokasi spesifik di lintas Jogja–Solo yang paling representatif untuk membandingkan bantalan kayu dan sintetis pada rel R54.

4.7.2 Studi Pustaka dan Pengumpulan Teori

Pada tahap ini, Penulis melakukan pendalaman materi mengenai spesifikasi teknis rel R54, karakteristik mekanis kayu kelas kuat I/II, dan keunggulan teknologi bantalan sintetis (FFU). Referensi tidak hanya diambil dari buku teks, tetapi juga dari Peraturan Dinas (PD) PT KAI dan jurnal internasional mengenai *Life Cycle Cost* (LCC).

4.7.3 Pengumpulan Data Primer dan Sekunder

Kegiatan ini adalah inti dari pengambilan informasi di lapangan. Data primer diperoleh melalui observasi langsung (melihat kondisi degradasi bantalan) dan wawancara dengan asisten manajer atau teknisi jalan rel terkait riwayat kerusakan. Sementara itu, data sekunder berupa Rencana Anggaran Biaya (RAB), harga satuan bahan, dan frekuensi perawatan tahunan diambil dari arsip kantor unit jalan rel untuk kemudian dikategorikan berdasarkan jenis bantalannya.

4.7.4 Pengolahan Data

Data biaya yang telah terkumpul diolah menggunakan model matematis *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Penulis akan menghitung nilai sekarang (*Present Value*) dari pengeluaran masa depan untuk perawatan dan penggantian menggunakan rumus diskonto. Prosedur ini dilakukan untuk melihat total biaya yang dihabiskan selama masa layan bantalan (misalnya dalam rentang 30–50 tahun), sehingga perbedaan efisiensi antara kayu dan sintetis dapat terlihat secara angka nominal.

4.7.5 Analisis Perbandingan dan Pembahasan

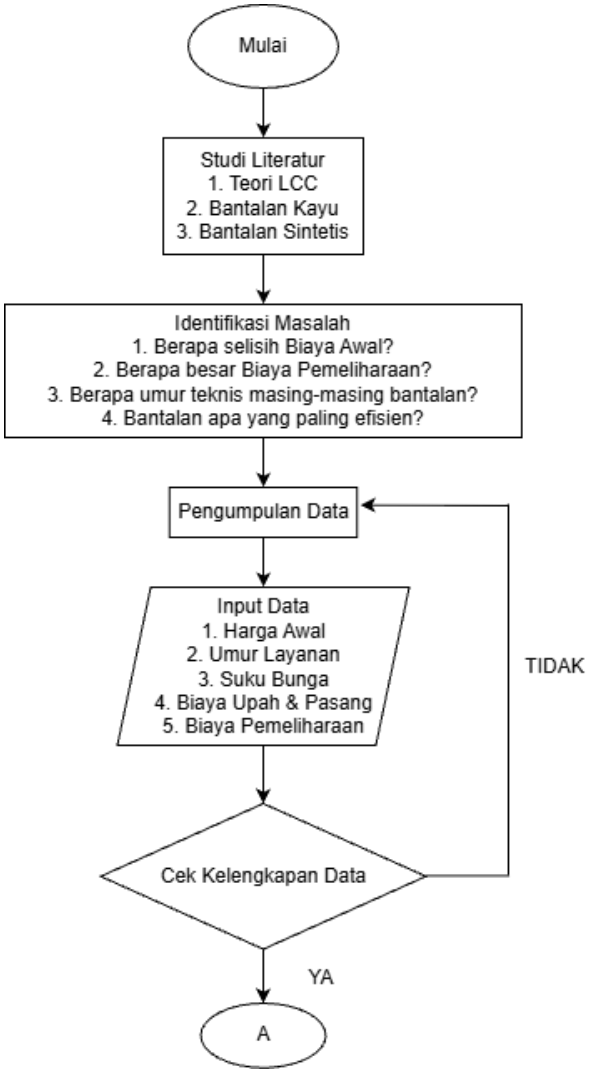
Setelah angka LCC didapat, Penulis melakukan analisis mendalam mengenai mengapa satu jenis bantalan lebih efisien dibanding yang lain. Pembahasan tidak hanya terpaku pada angka, tetapi juga faktor eksternal seperti kondisi cuaca di DAOP 6 yang mempercepat pelapukan kayu, serta bagaimana penggunaan bantalan sintetis mendukung prinsip *Green Construction* (mengurangi penebangan pohon). Di sini, Penulis akan menarik korelasi antara kekuatan rel R54 dengan durabilitas bantalan yang digunakan.

4.7.6 Kesimpulan dan Saran

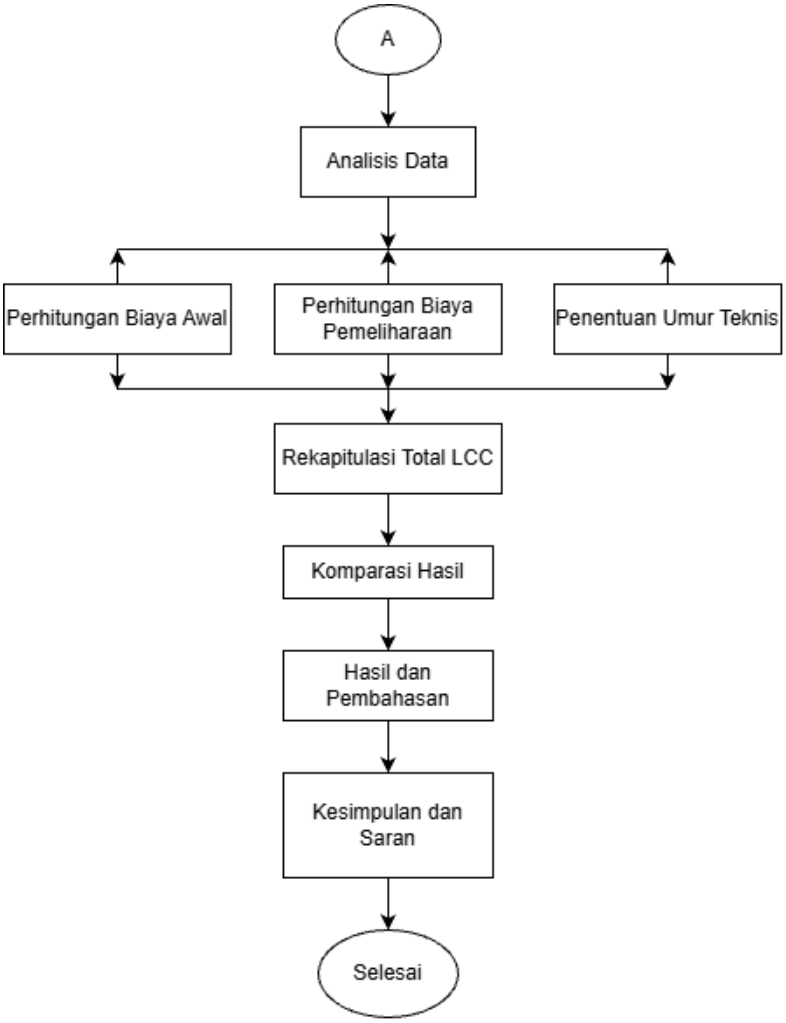
Pada tahap ini, peneliti merangkum seluruh hasil temuan dari analisis perbandingan biaya dan teknis yang telah dilakukan. Peneliti harus mampu menjawab secara lugas tujuan penelitian, yaitu menentukan jenis bantalan mana yang lebih efisien untuk rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta berdasarkan angka Life Cycle Cost (LCC). Kesimpulan ini tidak hanya berisi angka, tetapi juga argumentasi kuat mengenai keunggulan durabilitas material sintetis terhadap beban gandar rel R54 dibandingkan dengan material kayu konvensional. Setelah kesimpulan dirumuskan, peneliti menyusun saran yang bersifat aplikatif dan strategis sebagai rekomendasi bagi manajemen PT KAI DAOP 6 Yogyakarta. Saran tersebut mencakup pertimbangan teknis dalam pemilihan material untuk masa depan serta masukan bagi peneliti selanjutnya untuk mengembangkan variabel penelitian, seperti aspek dampak lingkungan (jejak karbon). Tahap ini sangat krusial karena merupakan inti dari output Tugas Akhir yang akan menjadi dasar pengambilan keputusan dalam manajemen aset infrastruktur perkeretaapian.

4.7.7 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir prosedur penelitian dapat dilihat dalam gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4. 1 Bagan Alir Penelitian

4.7.8 *Time Schedule* Penelitian

Time Schedule serta Kurva S pada Penelitian ini adalah sebagai berikut.

Bulan		Maret				April				Mei				Juni				Juli				Agustus			
Minggu ke-		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Kegiatan	Total Jam Kerja	Jam Kerja																							
Proposal Tugas Akhir	**34**	**4**	**1**	**1**	**1**	**3**	**3**	**4**	**3**	**5**	**4**	**3**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
BAB I dan Cover	3	3																							
BAB II	5	1	1	1	1	1																			
BAB III	9					2	3	2	1	1															
BAB IV	9							2	2	2	2	1													
Penyusunan Proposal Tugas Akhir	8									2	2	2	2												
Penelitian, Pengambilan Data, dan Tugas Akhir	**151**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**4**	**7**	**7**	**5**	**0**	**5**	**5**	**14**	**51**	32			
Studi Pustaka dan Pengumpulan Teori	9												4	3	2										
Persiapan dan Perizinan Penelitian	14													4	5	5									
Pengumpulan Data Primer dan Sekunder	35																	5	5	5	10	5	5		
Pengolahan Data	25																			5	10	5	5		
Analisis Perbandingan dan Pembahasan	30																				15	10	5		
Kesimpulan dan Saran	15																				5	7	3		
Penyusunan Tugas Akhir	23																			4	11	5	3		
Jumlah Jam Kerja	**185**																								
Progress Mingguan		4	1	1	1	3	3	4	3	5	4	3	6	7	7	5	0	5	5	14	51	32	0	0	0
Progress Kumulatif		4	5	6	7	10	13	17	20	25	29	32	38	45	52	57	57	62	67	81	132	164	185	185	185

Gambar 4. 2 *Time Schedule* dan Kurva S

BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam analisis siklus hidup ini meliputi data primer maupun data sekunder. Data primer didapatkan melalui observasi serta wawancara langsung ke Resort Jalan Rel yang ada di DAOP 6 Yogyakarta. Wawancara itu mencakup dari lokasi, panjang segmen, dan total bantalan yang ada. Sementara itu, data sekunder mencakup harga satuan bahan, biaya pemasangan, dan frekuensi perawatan tahunan.

5.1.1 Data Primer

Data didapatkan melalui observasi lapangan langsung dan wawancara kepada Staff lapangan yang berada di beberapa Resort DAOP 6 Yogyakarta. Data meliputi lokasi, panjang segmen, dan total bantalan. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.1, sedangkan beberapa dokumentasi lapangan dapat dilihat dibawah ini.

Tabel 5. 1 Tabel Data Primer

No	Lokasi Penelitian	KM + HM	Jenis Bantalan	Dimensi (cm)	Jumlah	Tahun Pemasangan	Umur Rencana (tahun)
1	JR 6.1 Jenar	482+2/3	Sintetis	18x22x200 (Normal)	128	2025 dan 2026	50
2	JR 6.1 Jenar	484+8/9 – 493+0/1	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	90	2016 sampai 2021	18
3	JR 6.1 Jenar	494+0/1 – 497+2/3	Sintetis	18x22x200 (Normal)	552	2023 - 2026	50
4	JR 6.2 Wojo	498+300 – 501+823	Sintetis	18x22x200 (Normal)	77	2023	50

Lanjutan Tabel 5. 1 Tabel Data Primer

5	JR 6.2 Wojo	501+823	Kayu	18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	196	2016 sampai 2021	5-15
6	JR 6.2 Wojo	504+422	Sintetis	18x22x200 (Normal)	15	2023	50
7	JR 6.2 Wojo	507+426	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	84	2016 sampai 2021	18
8	JR 6.2 Wojo	508+299 – 515+661	Sintetis	18x22x200 (Normal)	156	2023 dan 2024	50
8	JR 6.2 Wojo	508+299 – 515+661	Kayu	18x22x200 (Normal)	556	2016 sampai 2021	18
9	JR 6.3 Wates	515+661; 518+409; 521+854; 527+474	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	365	2016 sampai 2021	18
10	JR 6.3 Wates	527+474	Sintetis	18x22x200 (Normal)	553	2024	50
11	JR 6.4 Yogyakarta	538+4/5; 541+5/6; 166+4/6	Sintetis	18x22x200 (Normal)	404	2024	50
12	JR 6.4 Yogyakarta	538+4/5	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	38	2016 sampai 2021	18
13	JR 6.5 Brambanan	147+439; 149+858; 150+811; 152+852; 156+551	Sintetis	18x22x200 (Normal)	516	2022, 2023, dan 2024	50
14	JR 6.5 Brambanan	147+439; 149+858; 150+811; 152+852; 156+551	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	288	2016 sampai 2021	18

Lanjutan Tabel 5. 1 Tabel Data Primer

15	JR 6.6 Klaten	130+3/4; 133+0/1; 138+2/3; 140+3/5; 142+7/8; 144+4/5	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	312	2016 sampai 2021	18
16	JR 6.6 Klaten	130+3/4; 133+0/1; 138+2/3; 140+3/5; 142+7/8	Sintetis	18x22x200 (Normal)	165	2022, 2023,2024, dan 2025	50
17	JR 6.7 Delanggu	177+739; 123+357; 128+130	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	83	2016 sampai 2021	18
18	JR 6.7 Delanggu	117+739; 119+171; 123+357; 128+130	Sintetis	18x22x200 (Normal)	346	2023,2024, dan 2025	50
19	JR 6.8 Solo Balapan	111+8/9	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	38	2016 sampai 2021	18
20	JR 6.8 Solo Balapan	111+8/9	Sintetis	18x22x200 (Normal)	38	2026	50
21	JR 6.9 Wonogiri	3+498 – 31+271	Kayu	18x22x200 (Normal)	863	2016 sampai 2021	18
22	JR 6.10 Sumberlawang	70+2/3; 71+2/3; 72+6/7; 73+9/0	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	101	2016 sampai 2021	18
23	JR 6.10 Sumberlawang	69+7/8; 96+4/5	Sintetis	18x22x200 (Normal)	99	2025 dan 2026	50
24	JR 6.11 Palur	258+1/3	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	822	2016 sampai 2021	18

Lanjutan Tabel 5. 1 Tabel Data Primer

25	JR 6.11 Palur	250+6/7; 252+6/7; 256+0/1; 257+2/3	Sintetis	18x22x200 (Normal)	276	2024, 2025, dan 2026	50
40	JR 6.12 Sragen	235+514	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	26	2016 sampai 2021	18
41	JR 6.12 Sragen	235+514; 236+838; 237+022; 240+019; 245+474; 247+357	Sintetis	18x22x200 (Normal)	661	2022, 2023, dan 2025	50
42	JR 6.13 Kebonromo	224+3/4; 226+4/6; 229+6/7; 232+6/7	Kayu	20x22x200 atau 18x22x200 (Abnormal/ukuran berbeda-beda)	331	2016 sampai 2021	18
44	JR 6.13 Kebonromo	221+0/1; 224+3/4; 229+6/7; 230+8/9; 232+6/7	Sintetis	18x22x200 (Normal)	617	2022, 2023, dan 2025	50

Dari data diatas didapatkan untuk jumlah Bantalan yang digunakan pada Jembatan Kereta api di DAOP 6 Yogyakarta berjumlah 8.798. Total tersebut terdapat 4.195 total Bantalan Kayu dan 4.603 total Bantalan Sintetis. Data tersebut didukung oleh wawancara langsung oleh narasumber yang berisi perbandingan dari kedua bantalan tersebut. Perbandingan antara bantalan sintetis dan bantalan kayu dapat dilihat pada Tabel 5.2 dibawah ini.

Tabel 5. 2 Perbandingan antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis menurut Narasumber

Narasumber	Bantalan Sintetis
Bapak Yadno (Satker Resor JJ Lempuyangan DAOP 6 Yogyakarta)	Dari sisi teknis pengerjaan di lapangan, Bapak Yadno menilai bantalan sintetis sangat memudahkan petugas karena dapat dipotong dan dibor menggunakan peralatan konvensional mirip kayu, namun menghasilkan presisi pemasangan yang jauh lebih tinggi. Selain itu, bantalan sintetis mampu menjaga kestabilan geometri rel pada jembatan dari pengaruh cuaca, berbanding terbalik dengan bantalan kayu yang menuntut perawatan rutin berfrekuensi tinggi seperti pengencangan baut tirfon yang mudah longgar akibat penyusutan material.
Bapak Tri Haryanto (Pensiunan Manajer Jalan dan Jembatan DAOP 6 Yogyakarta)	Berdasarkan pengalaman manajerial historisnya, Bapak Tri Haryanto menyoroti keterbatasan umur teknis bantalan kayu yang rata-rata hanya bertahan 10 hingga 20 tahun di area jembatan akibat kelembapan tinggi, ditambah makin langkanya pasokan kayu mutu tinggi di pasaran. Menurut beliau, secara analisis LCCA, penggunaan bantalan sintetis lebih efisien untuk kurun waktu 50 tahun karena memangkas akumulasi biaya penggantian berkala serta sejalan dengan prinsip *green construction* yang mengurangi deforestasi hutan.
Bapak Budi (Staf Resor JJ Lempuyangan DAOP 6 Yogyakarta)	Fokus pada aspek operasional pemeliharaan harian, Bapak Budi menekankan bahwa penggunaan bantalan kayu sangat menguras waktu dan tenaga tim Resort Jalan Rel untuk perbaikan lebar sepur (*regauging*), pelaburan pengawet, serta penanganan kayu lapuk. Sebaliknya, bantalan sintetis yang bersifat tahan air, anti-rayap, dan tidak membusuk terbukti secara drastis memangkas jam kerja perawatan fisik di jalur jembatan Lempuyangan.

Lanjutan Tabel 5. 2 Perbandingan antara Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis menurut Narasumber

Bapak Aan (Staf Mabes JJ DAOP 6 Yogyakarta)	Ditinjau dari perspektif perencanaan strategis prasarana, Bapak Aan menjelaskan bahwa meskipun biaya pengadaan awal bantalan sintetis mencapai 3 hingga 4 kali lipat dari bantalan kayu, biaya modal tersebut sangat terjustifikasi oleh jaminan spesifikasi material serta umur layan yang mencapai 50 tahun. Dalam jangka panjang, ketiadaan biaya penggantian berulang dan kepastian pasokan menjadikan bantalan sintetis sebagai keputusan investasi yang paling ekonomis dan rasional bagi pengelola prasarana.

5.1.2 Data Sekunder

Data sekunder untuk biaya didapatkan juga melalui wawancara kepada Staff Mabes JJ DAOP 6 Yogyakarta. Hasil data pada setiap lokasi dapat dilihat dibawah ini.

Tabel 5. 3 Data Biaya tiap Bantalan

Bahan: Kayu			
No	Data	Nilai	Satuan
1	Harga Satuan Material	Rp1,850,000.00	Rp/buah
2	Harga Satuan Pemasangan	Rp320,000.00	Rp/buah
3	Biaya Penggantian	Rp320,000.00	Rp/buah
Bahan: Sintetis			
No	Data	Nilai	Satuan
1	Harga Satuan Material	Rp4,495,800.00	Rp/buah
2	Harga Satuan Pemasangan	Rp250,000.00.	Rp/buah
3	Biaya Penggantian	Rp250,000.00	Rp/buah

Hasil wawancara yang didapatkan diatas didapatkan bahwa harga satuan material antar bantalan selisih Rp1,415,800.00. Sedangkan untuk harga satuan pemasangan berbeda Rp70,000.00 karena bantalan kayu untuk pemasangan jauh lebih sulit, serta diperlukan modifikasi untuk bantalannya ketika pemasangannya. Dalam harga satuan pemasangan serta biaya penggantian itu diambil dari harga terbesar yang terdapat di DAOP 6 Yogyakarta dan penulis sama ratakan dengan setiap Resor yang ada. Biaya pemasangan serta penggantian sudah termasuk dengan bongkar muat material dari gudang penimbun ke Resor, bongkar dan memasang kembali *guard rail*, pemasangan bantalan, serta bahan-bahan yang digunakan untuk pemasangan bantalan.

5.2 Analisis Data

Analisis *life cycle cost* dilakukan untuk menghitung seluruh biaya yang dikeluarkan selama umur layanan suatu aset, mulai dari biaya awal, biaya pemeliharaan, biaya rehabilitasi atau penggantian, hingga nilai sisa, dengan mempertimbangkan konsep nilai waktu terhadap uang (*time value of money*) melalui penggunaan tingkat diskonto (*discount rate*). Metode ini bertujuan untuk menentukan alternatif yang paling ekonomis selama siklus hidup aset, bukan hanya berdasarkan biaya investasi awal. Tahapan perhitungan LCCA dijelaskan sebagai berikut.

5.2.1 Perhitungan Data Awal (Co)

Data awal yang didapatkan dari wawancara narasumber disajikan pada Tabel 5.1. Dari data tersebut didapatkan perhitungan Co yang disajikan berikut ini.

1. Data Awal (C_0) di Lokasi JR 6.1 Jenar
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp1,850,000.00 x 90) + (Rp320,000 x 90)

      Co = Rp195,300,000.00

   b. Bantalan Sintetis

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp4,495,800 x 680) + (Rp250,000 x 680)

Co = Rp3,227,144,000.00

2. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.2 Wojo
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp1,850,000.00 x 836) + (Rp320,000 x 836)

      Co = Rp1,814,120,000.00

   b. Bantalan Sintetis

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp4,495,800 x 248) + (Rp250,000 x 248)

      Co = Rp1,176,958,400.00

3. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.3 Wates
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp1,850,000.00 x 365) + (Rp320,000 x 365)

      Co = Rp792,050,000.00

   b. Bantalan Sintetis

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp4,495,800 x 553) + (Rp250,000 x 553)

      Co = Rp2,624,427,400.00

4. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.4 Yogyakarta
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp1,850,000.00 x 38) + (Rp320,000 x 38)

      Co = Rp82,460,000.00

   b. Bantalan Sintetis

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp4,495,800 x 553) + (Rp250,000 x 553)

      Co = Rp1,917,303,200.00

5. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.5 Brambanan
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp1,850,000.00 x 288) + (Rp320,000 x 288)

      Co = Rp624,960,000.00

   b. Bantalan Sintetis

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp4,495,800 x 516) + (Rp250,000 x 516)

      Co = Rp2,448,832,800.00

6. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.6 Klaten
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp1,850,000.00 x 312) + (Rp320,000 x 312)

      Co = Rp677,040,000.00

   b. Bantalan Sintetis

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp4,495,800 x 165) + (Rp250,000 x 165)

      Co = Rp783,057,000.00

7. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.7 Delanggu
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp1,850,000.00 x 83) + (Rp320,000 x 83)

      Co = Rp180,110,000.00

   b. Bantalan Sintetis

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

      Co = (Rp4,495,800 x 165) + (Rp250,000 x 165)

      Co = Rp1,642,046,800.00

8. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.8 Solo Balapan
   a. Bantalan Kayu

      Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp1,850,000.00 x 30) + (Rp320,000 x 30)

Co = Rp65,100,000.00

b. Bantalan Sintetis

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp4,495,800 x 165) + (Rp250,000 x 165)

Co = Rp180,340,400.00

9. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.9 Wonogiri

a. Bantalan Kayu

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp1,850,000.00 x 873) + (Rp320,000 x 873)

Co = Rp1,894,410,000.00

b. Bantalan Sintetis

Tidak terdapat bantalan sintetis pada JR 6.9 Wonogiri, jadi tidak ada perhitungan Co untuk JR 6.9 Wonogiri.

10. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang

a. Bantalan Kayu

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp1,850,000.00 x 101) + (Rp320,000 x 101)

Co = Rp219,170,000.00

b. Bantalan Sintetis

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp4,495,800 x 99) + (Rp250,000 x 99)

Co = Rp469,834,200.00

11. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.11 Palur

a. Bantalan Kayu

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp1,850,000.00 x 822) + (Rp320,000 x 822)

Co = Rp1,783,740,000.00

b. Bantalan Sintetis

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp4,495,800 x 276) + (Rp250,000 x 276)

Co = Rp1,309,840,800.00

12. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.12 Sragen

a. Bantalan Kayu

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp1,850,000.00 x 26) + (Rp320,000 x 26)

Co = Rp56,420,000.00

b. Bantalan Sintetis

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp4,495,800 x 661) + (Rp250,000 x 661)

Co = Rp3,136,973,800.00

13. Data Awal (Co) di Lokasi JR 6.13 Kebonromo

a. Bantalan Kayu

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp1,850,000.00 x 331) + (Rp320,000 x 331)

Co = Rp718,270,000.00

b. Bantalan Sintetis

Co = ($V_{material}$ x $H_{material}$) + (V_{upah} x H_{upah})

Co = (Rp4,495,800 x 617) + (Rp250,000 x 617)

Co = Rp2,928,158,600.00

Pada perhitungan Data Awal (C_0) diatas didapatkan untuk jumlah Bantalan Kayu sebesar Rp9,103,150,000.00 sedangkan untuk Bantalan Sintetis sendiri sebesar Rp21,844,917,400.00. Dari hasil tersebut didapatkan hasil bahwa Biaya awal untuk Pembangunan Bantalan Sintetis lebih besar dibandingkan dengan Bantalan Kayu.

5.2.2 Perhitungan Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan (*maintenance cost*) merupakan biaya yang dikeluarkan secara rutin maupun berkala untuk menjaga kondisi bantalan rel agar tetap memenuhi standar teknis dan keselamatan selama umur layanannya. Berdasarkan PM Nomor 32 Tahun 2011 tentang Standar dan Tata Cara Perawatan Prasarana

Perkeretaapian, kegiatan pemeliharaan jalan rel meliputi pengencangan penambat, perawatan kimia pada bantalan kayu, perbaikan lebar sepur (*regauging*), serta inspeksi visual oleh Juru Pemilik Jalan (JPJ). Karena PT KAI DAOP 6 Yogyakarta tidak menyediakan data biaya pemeliharaan secara rinci, penelitian ini menghitung biaya pemeliharaan berdasarkan kebutuhan tenaga. Pendekatan tersebut mengacu pada PM No. 59 Tahun 2023 yang menyatakan bahwa harga satuan pekerjaan perawatan prasarana perkeretaapian mencakup kebutuhan personel, peralatan, material, dan suku cadang. Biaya tenaga kerja dalam penelitian ini menggunakan tarif tenaga teknis pemeliharaan sebesar Rp172.000/orang-hari (OH) sebagai nilai proksi tenaga kerja berpengalaman

Pemeliharaan yang mengacu PM Nomor 32 Tahun 2011 dapat di laksanakan tetapi terdapat perbedaan antara tiap bantalan. Untuk bantalan kayu dilakukan 24 kali per tahun untuk pengencangan baut dengan total 2 pekerja, perawatan kimia sebanyak 2 kali dalam satu tahun dengan 4 pekerja, *regauging* sebanyak 6 kali dalam satu tahunnya dengan 2 pekerja, dan 24 kali inspeksi visual per tahun atau 2 kali dalam satu bulan degan total pekerja 2. Sedangkan untuk bantalan sintetis dilakukan 24 kali pengencangan baut dengan 2 pekerja, tidak ada perawatan kimia, 2 kali *regauging* dengan 2 pekerja, dan inspeksi visual selama 12 kali per tahun atau 1 kali dalam satu bulan dengan 2 pekerja. Terdapat perbandingan yang lumayan signifikan antara bantalan kayu dan bantalan sintetis, dikarenakan bantalan kayu harus dilakukan pemeliharaan yang jauh lebih banyak dan lebih diperhatikan.

Selain tenaga kerja, biaya bahan dan peralatan diperhitungkan berdasarkan kebutuhan tiap kegiatan. Pada pekerjaan pengencangan penambat digunakan bahan pelumas penetrasi dengan harga pasar sekitar Rp60,000 per unit serta peralatan berupa *torque wrench* dan *socket set*. Berdasarkan harga pasar Juli 2026, *torque wrench* TEKIRO tercatat sebesar Rp1,500,000 dan socket set sebesar Rp300,000. Pada pekerjaan perbaikan lebar sepur digunakan peralatan berupa dongkrak hidrolik 5 ton dengan harga sekitar Rp200.000 serta mesin bor listrik sekitar Rp450,000. Sementara itu, perawatan kimia bantalan kayu memperhitungkan bahan pengawet/anti-rayap dan alat penyemprot; harga bahan kimia yang tersedia mulai sekitar Rp300,000 per liter sedangkan sprayer manual sekitar Rp250,000.

Harga tersebut merupakan harga pasar sebagai dasar asumsi penelitian dan bukan harga pengadaan resmi PT KAI. Karena peralatan seperti *torque wrench*, dongkrak, bor, dan sprayer dapat digunakan berulang kali, harga pembelian tidak dibebankan seluruhnya pada satu kali pekerjaan, tetapi dialokasikan berdasarkan asumsi jumlah pemakaian selama umur alat. Inspeksi visual tidak diberikan tambahan biaya bahan dan peralatan karena diasumsikan hanya membutuhkan tenaga kerja.

Setelah biaya langsung yang terdiri atas tenaga kerja, bahan, dan peralatan diperoleh, selanjutnya ditambahkan biaya umum dan keuntungan (overhead and profit) sebesar 10%. Penggunaan nilai 10% mengacu pada Permen PUPR No. 8 Tahun 2023, yang menetapkan bahwa biaya umum dan keuntungan dapat diperhitungkan sebesar 10%–15% dari jumlah biaya langsung; penelitian ini menggunakan batas bawah sebesar 10% untuk menghasilkan estimasi yang konservatif. Dengan demikian, biaya pekerjaan sebelum pajak dihitung sebagai Csp = 1,10 (Ctk + Cb + Ca). Apabila harga yang digunakan belum termasuk Pajak Pertambahan Nilai (PPN), selanjutnya ditambahkan PPN. Berdasarkan PMK No. 131 Tahun 2024, PPN untuk penyerahan Jasa Kena Pajak non-mewah dihitung dengan tarif 12% atas dasar pengenaan pajak sebesar 11/12 dari nilai penggantian, sehingga secara efektif setara dengan 11% dari nilai pekerjaan. PPh Final jasa konstruksi tidak ditambahkan kembali sebagai komponen biaya karena merupakan pajak penghasilan yang dipotong dari pembayaran kepada penyedia jasa, sehingga penambahan kembali PPh berpotensi menimbulkan perhitungan ganda.

Sedangkan pada perhitungan pemeliharan dibawah ini adalah perhitungan biaya pemeliharaan per 30 batang. Dalam penelitian ini, biaya pemeliharaan dihitung berdasarkan satu unit pekerjaan yang menangani 30 batang bantalan, karena kegiatan pemeliharaan jalan rel dilaksanakan oleh satu regu pemeliharaan terhadap sekelompok bantalan dalam satu segmen pekerjaan sesuai PM No. 32 Tahun 2011. Pemilihan 30 batang didasarkan pada data lapangan PT KAI Daop 6 Yogyakarta sebagai satuan pekerjaan terkecil yang diseragamkan untuk memudahkan perhitungan biaya pemeliharaan dalam analisis *Life Cycle Cost* (LCC). Perhitungan Biaya Pemeliharaan dapat dilihat dibawah ini.

A. Harga Satuan Pemeliharaan

Dalam harga satuan pemeliharaan untuk alat yang digunakan diasumsikan penggunaan selama 100 kegiatan, maka dari itu perhitungan untuk alat akan dibagi 100.

1. Pengencangan Baut/penambat

   Torque Wrench = Rp1,500,000.00/100 Kegiatan

   Torque Wrench = Rp15,000.00/Kegiatan

   Socket Set = Rp300,000.00/100 Kegiatan

   Socket Set = Rp3,000.00/Kegiatan

   Pelumnas Anti Karat = Rp60,000.00

   Pengengangan Baut = Rp15,000.00+ Rp3,000.00 + Rp60,000.00

   Pengencangan Baut = Rp78,000.00

2. Perbaikan Lebar Sepur/*Regauging*

   Dongkrak Hidrolik = Rp200,000.00/100 Kegiatan

   Dongkrak Hidrolik = Rp2,000.00/Kegiatan

   Bor Listrik = Rp450,000.00/100 Kegiatan

   Bor Listrik = Rp4,500.00/Kegiatan

   Bahan = Rp25,000.00

   Regauging = Rp2,000.00 + Rp4,500.00 + Rp25,000.00

   Regauging = Rp31,500.00

3. Perawatan Kimia

   Bahan Kimia 1L = Rp300,000.00

   Pressure Sprayer = Rp250,000.00/100 Kegiatan

   Pressure Sprayer = Rp2,500.00/100

   Perawatan Kimia = Rp300,000.00 + Rp2,500.00

   Perawatan Kimia = Rp302,500.00

B. Bantalan Kayu

1. Pengencangan Baut

   Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

   Pengencangan Baut = 48 x (2 x Rp172,000) + Rp78,000.00)

   Pengengan Baut = Rp10,291,091.64

Pengencangan Baut setelah Pajak = Biaya Pengencangan x 1.1 x 1.11

Pengencangan Baut setelah Pajak = Rp10,128,000.00 x 1.1 x 1.11

Pengencangan Baut setelah Pajak = Rp12,366,288.00

2. Perawat Kimia

   Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

   Perawatan Kimia = 2 x (4 x Rp172,000) + Rp302,500.00)

   Perawatan Kimia = Rp1,981,000.00

   Perawatan Kimia setelah Pajak = Perawatan Kimia x 1.1 x 1.11

   Perawatan Kimia setelah Pajak = Rp1,981,000.00 x 1.1 x 1.11

   Perawatan Kimia setelah Pajak = Rp2,418,801.00

3. *Regauging*

   Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

   Regauging = 6 x (2 x Rp172,000) + Rp31,500.00)

   Regauging = Rp2,253,000.00

   Regauging setelah Pajak = *Regauging* x 1.1 x 1.11

   Regauging setelah Pajak = Rp2,253,000.00x 1.1 x 1.11

   Regauging setelah Pajak = Rp2,750,913.00

4. Inspeksi Visual

   Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

   Inspeksi Visual = 24 x (2 x Rp172,000) + Rp0)

   Inspeksi Visual = Rp8,256,000.00

   Inspeksi Visual setelah Pajak = Inspeksi Visual x 1.1 x 1.11

   Inspeksi Visual setelah Pajak = Rp8,256,000.00 x 1.1 x 1.11

   Inspeksi Visual setelah Pajak = Rp10,080,576.00

5. Total Cpemeliharaan

   Total = Rp27,616,578.00

   Total per batang = Rp920,552.60

6. PV Bantalan Kayu dalam 50 tahun

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Cpemeliharaan}}{(1+i)^t}$

PV Pemeliharaan $= \frac{Rp920{,}552.60}{(1+0{,}113)^t}$

PV total = Rp8,107,916.53

C. Bantalan Sintetis

1. Pengencangan Baut

Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

Pengencangan Baut = 24 x (2 x Rp172,000) + Rp78,000.00)

Pengengan Baut = Rp10,128,000.00

Pengencangan Baut setelah Pajak = Biaya Pengencangan x 1.1 x 1.11

Pengencangan Baut setelah Pajak = Rp10,128,000.00 x 1.1 x 1.11

Pengencangan Baut setelah Pajak = Rp12,366,288.00

2. Perawat Kimia

Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

Perawatan Kimia = 0 x (0 x Rp172,000) + Rp78,000.00)

Perawatan Kimia = Rp0

Perawatan Kimia setelah Pajak = Perawatan Kimia x 1.1 x 1.11

Perawatan Kimia setelah Pajak = Rp0 x 1.1 x 1.11

Perawatan Kimia setelah Pajak = Rp0

3. *Regauging*

Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

Regauging = 2 x (2 x Rp172,000) + Rp31,500.00)

Regauging = Rp751,000.00

Regauging setelah Pajak = *Regauging* x 1.1 x 1.11

Regauging setelah Pajak = Rp751,000.00 x 1.1 x 1.11

Regauging setelah Pajak = Rp916,971.00

4. Inspeksi Visual

   Kegiatan = Frekuensi/tahun x ((Total Pekerja x Upah Perhari) + Biaya alat dan bahan/tahun)

   Inspeksi Visual = 12 x (2 x Rp172,000) + Rp0)

   Inspeksi Visual = Rp4,128,000.00

   Inspeksi Visual setelah Pajak = Inspeksi Visual x 1.1 x 1.11

   Inspeksi Visual setelah Pajak = Rp4,128,000.00 x 1.1 x 1.11

   Inspeksi Visual setelah Pajak = Rp5,040,288.00

5. Total Cpemeliharaan

   Total = Rp18,323,547.00

   Total per batang = Rp610,784.90

6. PV Bantalan Kayu dalam 50 tahun

   PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Cpemeliharaan}}{(1+i)^t}$

   PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Rp610,784.90}}{(1+0{,}113)^t}$

   PV total = Rp5,379,587.21

5.2.3 Perhitungan *Discount Rate*

Dalam penelitian ini, tingkat diskonto sebesar 11.30% digunakan sebagai base case berdasarkan pendekatan *Social Time Preference Rate* (STPR) dari Wibowo dan Zuna (2024), bukan sebagai tingkat diskonto resmi yang ditetapkan Pemerintah Indonesia maupun PT KAI. Nilai tersebut dipilih karena memiliki dasar perhitungan yang jelas dan relevan untuk mengevaluasi proyek infrastruktur jangka panjang, sehingga dapat digunakan untuk mengubah biaya pada masa mendatang menjadi nilai sekarang dalam analisis LCCA selama 50 tahun. Untuk mengurangi ketergantungan hasil pada satu asumsi tingkat diskonto, nilai 11.30% selanjutnya diuji melalui analisis sensitivitas menggunakan skenario 9% dan 14%.

5.2.4 Perhitungan *Present Value* (PV) Penggantian

Perhitungan *Present Value* (PV) dilakukan untuk mengubah biaya yang terjadi pada masa mendatang menjadi nilai biaya pada tahun dasar penelitian. Perhitungan ini diperlukan karena biaya pengadaan, pemeliharaan, dan penggantian

bantalan rel dapat terjadi pada waktu yang berbeda selama periode analisis. Tetapi pada perhitungan kali ini Ct dianggap sebagai nilai konstan mengambil dari Co atau Data Awal. Nilai PV dihitung berdasarkan biaya pada tahun ke-t, discount rate (i), dan waktu terjadinya biaya. Perhitungan *Present Value* (PV) dapat dilihat dibawah ini.

A. Bantalan Kayu

1. Lokasi JR 6.1 Jenar

   Diketahui :

   - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
   - Ct = Rp195,300,000.00
   - Umur Rencana = Per 10 Tahun

   Perhitungan:

   $$PV_{10} = \frac{\text{Rp195,300,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

   $$PV_{10} = \text{Rp66,950,002.87}$$

   $$PV_{20} = \frac{\text{Rp195,300,000.00}}{(1+0{,}113)^{20}}$$

   $$PV_{20} = \text{Rp22,950,859.62}$$

   $$PV_{30} = \frac{\text{Rp195,300,000.00}}{(1+0{,}113)^{30}}$$

   $$PV_{30} = \text{Rp7,867,691.33}$$

   $$PV_{40} = \frac{\text{Rp195,300,000.00}}{(1+0{,}113)^{40}}$$

   $$PV_{40} = \text{Rp2,697,091.44}$$

   Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.1 Jenar adalah sebesar Rp100,465,645.25.

2. Lokasi JR 6.2 Wojo

   Diketahui :

   - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
   - Ct = Rp1,814,120,000.00
   - Umur Rencana = Per 10 Tahun

Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp1,814,120,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$$PV_{10} = \text{Rp621,891,137.74}$$

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp1,814,120,000.00}}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$$PV_{20} = \text{Rp213,187,984.91}$$

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp1,814,120,000.00}}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$$PV_{30} = \text{Rp73,082,110.60}$$

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp1,814,120,000.00}}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$$PV_{40} = \text{Rp25,052,982.66}$$

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.2 Wojo adalah sebesar Rp933,214,215.92.

3. Lokasi JR 6.3 Wates

Diketahui :

- *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
- Ct = Rp792,050,000.00
- Umur Rencana = Per 10 Tahun

Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp792,050,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$$PV_{10} = \text{Rp271,519,456.07}$$

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp792,050,000.00}}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$$PV_{20} = \text{Rp93,078,486.24}$$

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp792,050,000.00}}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$$PV_{30} = \text{Rp31,907,859.30}$$

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp792,050,000.00}}{(1+0{,}113)^{40}}$$

PV_{40} = Rp10,938,204.15

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.3 Wates adalah sebesar Rp407,444,005.75.

4. Lokasi JR 6.4 Yogyakarta

   Diketahui :

   - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
   - Ct = Rp82,460,000.00
   - Umur Rencana = Per 10 Tahun

   Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp82,460,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

PV_{10} = Rp28,267,778.99

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp82,460,000.00}}{(1+0{,}113)^{20}}$$

PV_{20} = Rp9,690,362.95

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp82,460,000.00}}{(1+0{,}113)^{30}}$$

PV_{30} = Rp3,321,914.12

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp82,460,000.00}}{(1+0{,}113)^{40}}$$

PV_{40} = Rp1,138,771.94

   Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.4 Yogyakarta adalah sebesar Rp42,418,828.00.

5. Lokasi JR 6.5 Brambanan

   Diketahui :

   - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
   - Ct = Rp624,960,000.00
   - Umur Rencana = Per 10 Tahun

   Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp624,960,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

PV_{10} = Rp214,240,009.17

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp}624{,}960{,}000.00}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$PV_{20} =$ Rp73,442,750.78

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp}624{,}960{,}000.00}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$PV_{30} =$ Rp25,176,612.27

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp}624{,}960{,}000.00}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$PV_{40} =$ Rp8,630,692.59

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.5 Brambanan adalah sebesar Rp321,490,064.81.

6. Lokasi JR 6.6 Klaten

Diketahui :

- *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
- Ct = Rp677,040,000.00
- Umur Rencana = Per 10 Tahun

Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp}677{,}040{,}000.00}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$PV_{10} =$ Rp232,093,343.27

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp}677{,}040{,}000.00}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$PV_{20} =$ Rp79,562,980.02

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp}677{,}040{,}000.00}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$PV_{30} =$ Rp27,274,663.29

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp}677{,}040{,}000.00}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$PV_{40} =$ Rp9,349,916.98

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.6 Klaten adalah sebesar Rp348,280,903.55.

7. Lokasi JR 6.7 Delanggu

   Diketahui :

   - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
   - Ct = Rp180,110,000.00
   - Umur Rencana = Per 10 Tahun

   Perhitungan:

   $$PV_{10} = \frac{\text{Rp180,110,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

   $PV_{10} =$ Rp61,742,780.42

   $$PV_{20} = \frac{\text{Rp180,110,000.00}}{(1+0{,}113)^{20}}$$

   $PV_{20} =$ Rp21,165,792.76

   $$PV_{30} = \frac{\text{Rp180,110,000.00}}{(1+0{,}113)^{30}}$$

   $PV_{30} =$ Rp7,255,759.78

   $$PV_{40} = \frac{\text{Rp180,110,000.00}}{(1+0{,}113)^{40}}$$

   $PV_{40} =$ Rp2,487,317.66

   Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.7 Delanggu adalah sebesar Rp92,651,650.62.

8. Lokasi JR 6.8 Solo Balapan

   Diketahui :

   - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
   - Ct = Rp65,100,000.00
   - Umur Rencana = Per 10 Tahun

   Perhitungan:

   $$PV_{10} = \frac{\text{Rp65,100,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

   $PV_{10} =$ Rp22,316,667.62

   $$PV_{20} = \frac{\text{Rp65,100,000.00}}{(1+0{,}113)^{20}}$$

   $PV_{20} =$ Rp7,650,286.54

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp}65{,}100{,}000.00}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$PV_{30} =$ Rp2,622,563.78

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp}65{,}100{,}000.00}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$PV_{40} =$ Rp899,030.48

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.8 Solo Balapan adalah sebesar Rp33,488,548.42.

9. Lokasi JR 6.9 Wonogiri

   Diketahui :

   - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
   - Ct = Rp1,894,410,000.00
   - Umur Rencana = Per 10 Tahun

   Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp}1{,}894{,}410{,}000.00}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$PV_{10} =$ Rp649,415,027.80

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp}1{,}894{,}410{,}000.00}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$PV_{20} =$ Rp222,623,338.31

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp}1{,}894{,}410{,}000.00}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$PV_{30} =$ Rp76,316,605.93

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp}1{,}894{,}410{,}000.00}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$PV_{40} =$ Rp26,161,786.92

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.9 Wonogiri adalah sebesar Rp974,516,758.97.

10. Lokasi JR 6.10 Sumberlawang

    Diketahui :

    - *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
    - Ct = Rp219,170,000.00

- Umur Rencana = Per 10 Tahun

Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp}219{,}170{,}000.00}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$$PV_{10} = \text{Rp}75{,}132{,}780.99$$

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp}219{,}170{,}000.00}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$$PV_{20} = \text{Rp}25{,}755{,}964.68$$

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp}219{,}170{,}000.00}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$$PV_{30} = \text{Rp}8{,}829{,}298.05$$

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp}219{,}170{,}000.00}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$$PV_{40} = \text{Rp}3{,}026{,}735.94$$

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang adalah sebesar Rp112,744,779.67.

11. Lokasi JR 6.11 Palur

Diketahui :

- *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
- Ct = Rp1,783,740,000.00
- Umur Rencana = Per 10 Tahun

Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp}1{,}783{,}740{,}000.00}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$$PV_{10} = \text{Rp}611{,}476{,}692.84$$

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp}1{,}783{,}740{,}000.00}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$$PV_{20} = \text{Rp}209{,}617{,}851.20$$

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp}1{,}783{,}740{,}000.00}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$$PV_{30} = \text{Rp}71{,}858{,}247.51$$

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp1,783,740,000.00}}{(1+113)^{40}}$$

$PV_{40} =$ Rp24,633,435.11

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.11 Palur adalah sebesar Rp917,586,226.66.

12. Lokasi JR 6.12 Sragen

Diketahui :

- *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
- Ct = Rp56,420,000.00
- Umur Rencana = Per 10 Tahun

Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp56,420,000.00}}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$PV_{10} =$ Rp19,341,111.94

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp56,420,000.00}}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$PV_{20} =$ Rp6,630,248.33

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp56,420,000.00}}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$PV_{30} =$ Rp2,272,888.61

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp56,420,000.00}}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$PV_{40} =$ Rp779,159.75

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.12 Sragen adalah sebesar Rp29,023,408.63.

13. Lokasi JR 6.13 Kebonromo

Diketahui :

- *Discount Rate (i)* = 11.30% (Menurut STPR)
- Ct = Rp718,270,000.00
- Umur Rencana = Per 10 Tahun

Perhitungan:

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp}718{,}270{,}000.00}{(1+0{,}113)^{10}}$$

$$PV_{10} = \text{Rp}246{,}227{,}232.76$$

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp}718{,}270{,}000.00}{(1+0{,}113)^{20}}$$

$$PV_{20} = \text{Rp}84{,}408{,}161.49$$

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp}718{,}270{,}000.00}{(1+0{,}113)^{30}}$$

$$PV_{30} = \text{Rp}28{,}935{,}620.35$$

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp}718{,}270{,}000.00}{(1+0{,}113)^{40}}$$

$$PV_{40} = \text{Rp}9{,}919{,}302.95$$

Dari total perhitungan PV untuk di Lokasi JR 6.13 Kebonromo adalah sebesar Rp369,490,317.55.

Diatas merupakan perhitungan *Present Value* (PV) untuk Bantalan Kayu dari setiap lokasi yang berada di DAOP 6 Yogyakarta, dari mulai JR 6.1 Jenar sampai dengan JR 6.13 Kebonromo. Total PV dari semua lokasi yang ada sebesar Rp4,682,815,353.81.

B. Bantalan Sintetis

Pada penelitian ini, biaya penggantian bantalan sintetis tidak diperhitungkan selama periode analisis 50 tahun karena umur layan bantalan sintetis diasumsikan sama dengan horizon analisis, yaitu 50 tahun. Dengan demikian, penggantian yang secara teoritis terjadi pada akhir tahun ke-50 berada tepat pada batas akhir periode evaluasi dan tidak dimasukkan sebagai arus biaya baru dalam perhitungan LCCA. Perhitungan hanya mencakup biaya yang terjadi selama masa analisis, sehingga pada akhir tahun ke-50 bantalan sintetis dianggap masih menyelesaikan satu siklus layan penuh dan tidak dibebani biaya penggantian untuk siklus berikutnya. Pendekatan ini digunakan agar tidak terjadi pembebanan biaya di luar horizon analisis yang telah ditetapkan.

5.2.5 Perhitungan *Life Cycle Cost Analysis*

Pada penelitian ini, Life Cycle Cost Analysis (LCCA) digunakan untuk membandingkan total biaya selama periode analisis 50 tahun antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan harga konstan (*constant price*), sehingga harga material dan biaya pemasangan dianggap tetap selama periode analisis. Biaya pemeliharaan dimasukkan secara kuantitatif menggunakan literatur yang ada. Komponen biaya yang diperhitungkan terdiri atas biaya awal, biaya penggantian yang dikonversikan ke nilai sekarang (Present Value) menggunakan discount rate sebesar 11.30%, dan biaya pemeliharaan. Perhitungan *Life Cycle Cost* bisa dilihat dibawah ini.

a. Bantalan Kayu

1. Lokasi JR 6.1 Jenar

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp195,300,000.00 + Rp729,712,487.97 + Rp100,465,645.25

   LCC = Rp1,025,478,133.22

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.1 Jenar sebesar Rp1,025,478,133.22.

2. Lokasi JR 6.2 Wojo

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp1,814,120,000.00 + Rp6,778,218,221.57 + Rp933,214,215.92

   LCC = Rp9,525,552,437.49

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.2 Wojo sebesar Rp9,525,552,437.49.

3. Lokasi JR 6.3 Wates

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp792,050,000.00 + Rp2,959,389,534.54 + Rp407,444,005.75

   LCC = Rp4,158,883,540.29

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.3 Wates sebesar Rp4,158,883,540.29.

4. Lokasi JR 6.4 Yogyakarta

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp82,460,000.00 + Rp308,100,828.25 + Rp42,418,828.00

   LCC = Rp432,979,656.25

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.4 Yogyakarta sebesar Rp432,979,656.25.

5. Lokasi JR 6.5 Brambanan

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp624,960,000.00 + Rp2,335,079,961.50 + Rp321,490,064.81

   LCC = Rp3,281,530,026.31

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.5 Brambanan sebesar Rp3,281,530,026.31.

6. Lokasi JR 6.6 Klaten

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp677,040,000.00 + Rp2,529,669,958.29 + Rp348,280,903.55

   LCC = Rp3,554,990,861.84

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.6 Klaten sebesar Rp3,554,990,861.84.

7. Lokasi JR 6.7 Delanggu

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp180,110,000.00 + Rp672,957,072.24 + Rp92,651,650.62

   LCC = Rp945,718,722.86

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.7 Delanggu sebesar Rp945,718,722.86.

8. Lokasi JR 6.8 Solo Balapan

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp65,100,000.00 + Rp243,237,495.99 + Rp33,488,548.42

   LCC = Rp341,826,044.41

Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.8 Solo Balapan sebesar Rp341,826,044.41.

9. Lokasi JR 6.9 Wonogiri

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp1,894,410,000.00 + Rp7,078,211,133.29 + Rp974,516,758.97

   LCC = Rp9,947,137,892.26

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.9 Wonogiri sebesar Rp9,947,137,892.26.

10. Lokasi JR 6.10 Sumberlawang

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

    LCC = Rp219,170,000.00 + Rp818,899,569.83 + Rp112,744,779.67

    LCC = Rp1,150,814,349.51

    Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.10 Sumberlawang sebesar Rp1,150,814,349.51.

11. Lokasi JR 6.11 Palur

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

    LCC = Rp1,783,740,000.00 + Rp6,664,707,390.11 + Rp917,586,226.66

    LCC = Rp9,366,033,616.77

    Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.11 Palur sebesar Rp9,366,033,616.77.

12. Lokasi JR 6.12 Sragen

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

    LCC = Rp56,420,000.00 + Rp210,805,829.86 + Rp29,023,408.63

    LCC = Rp296,249,238.49

    Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.12 Sragen sebesar Rp296,249,238.49.

13. Lokasi JR 6.13 Kebonromo

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

LCC = Rp718,270,000.00 + Rp2,683,720,372.42 + Rp369,490,317.55

LCC = Rp3,771,480,689.96

Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.13 Kebonromo sebesar Rp3,771,480,689.96.

Berdasarkan perhitungan dari biaya awal sampai biaya penggantian pada tahun ke-t, diperoleh nilai LCC Bantalan kayu sebesar Rp47,798,675,209.67. Sedangkan untuk perhitungan LCC per batang adalah sebagai berikut ini.

LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

LCC = Rp2,170,000.00 + Rp8,107,916.53 + Rp1,116,284.95

LCC = Rp11,394,201.48

Perhitungan total untuk LCC per batang dengan LCC total keseluruhan bantalan adalah sama.

b. Bantalan Sintetis

1. Lokasi JR 6.1 Jenar

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp3,227,144,000.00 + Rp3,658,119,299.63 + Rp0

   LCC = Rp6,885,263,299.63

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.1 Jenar sebesar Rp6,885,263,299.63.

2. Lokasi JR 6.2 Wojo

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp1,176,958,400.00 + Rp1,334,137,626.93 + Rp0

   LCC = Rp2,511,096,026.93

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.2 Wojo sebesar Rp2,511,096,026.93.

3. Lokasi JR 6.3 Wates

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp2,624,427,400.00 + Rp2,974,911,724.56 + Rp0

   LCC = Rp5,599,339,124.56

Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.3 Wates sebesar Rp5,599,339,124.56.

4. Lokasi JR 6.4 Yogyakarta

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp1,917,303,200.00 + Rp2,173,353,230.96 + Rp0

   LCC = Rp4,090,656,430.96

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.4 Yogyakarta sebesar Rp4,090,656,430.96.

5. Lokasi JR 6.5 Brambanan

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp2,448,832,800.00 + Rp2,775,866,997.96 + Rp0

   LCC = Rp5,224,699,797.96

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.5 Brambanan sebesar Rp5,224,699,797.96.

6. Lokasi JR 6.6 Klaten

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp783,057,000.00 + Rp887,631,888.88 + Rp0

   LCC = Rp1,670,688,888.88

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.6 Klaten sebesar Rp1,670,688,888.88.

7. Lokasi JR 6.7 Delanggu

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp1,642,046,800.00 + Rp1,861,337,173.05 + Rp0

   LCC = Rp3,503,383,973.05

   Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.7 Delanggu sebesar Rp3,503,383,973.05.

8. Lokasi JR 6.8 Solo Balapan

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp180,340,400.00 + Rp204,424,313.80 + Rp0

   LCC = Rp384,764,713.80

Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.8 Solo Balapan sebesar Rp384,764,713.80.

9. Lokasi JR 6.9 Wonogiri

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   Tidak terdapat bantalan sintetis pada JR 6.9 Wonogiri, jadi tidak ada perhitungan LCC Bantalan Sintetis untuk JR 6.9 Wonogiri.

10. Lokasi JR 6.10 Sumberlawang

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

    LCC = Rp469,834,200.00 + Rp532,579,133.33 + Rp0

    LCC = Rp1,002,413,333.33

    Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.10 Sumberlawang sebesar Rp1,002,413,333.33.

11. Lokasi JR 6.11 Palur

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

    LCC = Rp1,309,840,800.00 + Rp1,484,766,068.67 + Rp0

    LCC = Rp2,794,606,868.67

    Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.11 Palur sebesar Rp2,794,606,868.67.

12. Lokasi JR 6.12 Sragen

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

    LCC = Rp3,136,973,800.00 + Rp3,555,907,142.73 + Rp0

    LCC = Rp6,692,880,942.73

    Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.12 Sragen sebesar Rp6,692,880,942.73.

13. Lokasi JR 6.13 Kebonromo

    LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

    LCC = Rp2,928,158,600.00 + Rp3,319,205,305.70 + Rp0

    LCC = Rp6,247,363,905.70

    Perhitungan LCC pada Lokasi JR 6.13 Kebonromo sebesar Rp6,247,363,905.70.

Berdasarkan perhitungan dari biaya awal sampai biaya penggantian pada tahun ke-t, diperoleh nilai LCC Bantalan Sintetis sebesar Rp46,607,157,306.20.

LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

LCC = Rp4,745,800.00 + Rp5,379,587.21 + Rp0

LCC = Rp10,125,387.21

Perhitungan total untuk LCC per batang dengan LCC total keseluruhan bantalan adalah sama.

5.2.6 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas tingkat diskonto dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan tingkat diskonto terhadap hasil *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Dalam penelitian ini digunakan tiga skenario tingkat diskonto, yaitu 9%, 11.30%, dan 14%. Tingkat diskonto sebesar 11.30% ditetapkan sebagai kondisi dasar (*base case*) yang mengacu pada pendekatan *Social Time Preference Rate* (STPR) yang digunakan dalam penelitian Wibowo dan Zuna (2024) pada evaluasi proyek penyediaan infrastruktur. Pemilihan STPR dilakukan karena tingkat diskonto sosial lebih merepresentasikan penilaian terhadap biaya dan manfaat proyek infrastruktur dalam jangka panjang dibandingkan dengan penggunaan suku bunga kebijakan moneter secara langsung.

Tingkat diskonto sebesar 9% digunakan sebagai skenario rendah (*lower scenario*). Penetapan nilai tersebut mengacu pada Pedoman Direktorat Jenderal Bina Marga No. 03/P/BM/2022, yang dalam contoh kajian kelayakan infrastruktur menggunakan *Social Discount Rate* sebesar 9%. Sementara itu, tingkat diskonto sebesar 14% digunakan sebagai skenario tinggi (*upper scenario*). Pedoman yang sama memberikan contoh analisis sensitivitas *Social Discount Rate* dengan perubahan tingkat diskonto hingga 14%. Oleh karena itu, penggunaan rentang 9%–14% dalam penelitian ini dimaksudkan untuk mengevaluasi kestabilan hasil LCCA terhadap perubahan tingkat diskonto, sedangkan nilai 11.30% tetap digunakan sebagai skenario dasar penelitian. Perhitungan sensitivitas akan diterapkan ke setiap

hitungan yang menggunakan tingkat diskonto, seperti Biaya Pemeliharaan, PV, dan LCC. Rekapitulasi perhitungan sensitivitas dapat dilihat dibawah ini.

a. Sensitivitas 9%

Diketahui:

Co Bantalan Kayu = Rp9,103,150,000.00

Co Bantalan Sintetis = Rp21,844,917,400.00

Biaya Pemeliharaan Kayu = Rp920,552.60

Biaya Pemeliharaan Sintetis = Rp610,784.90

Tingkat Diskonto (i) = 9%

Perhitungan:

1. PV Pemeliharaan Bantalan Kayu

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Cpemeliharaan}}{(1+i)^t}$

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Rp920,552.60}}{(1+0{,}09)^t}$

PV total = Rp10,090,805.70

2. PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Cpemeliharaan}}{(1+i)^t}$

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Rp610,784.90}}{(1+0{,}09)^t}$

PV total = Rp6,695,230.39

3. Perhitungan PV Bantalan Kayu

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0{,}09)^{10}}$$

PV_{10} = Rp3,845,268,936.79

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0{,}09)^{20}}$$

PV_{20} = Rp1,624,283,154.32

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0{,}09)^{30}}$$

PV_{30} = Rp686,114,757.84

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0{,}09)^{40}}$$

PV_{40} = Rp289,822,288.48

PV total = Rp6,445,489,137.44

4. Perhitungan PV Bantalan Sintetis

   Pada penelitian ini, biaya penggantian bantalan sintetis tidak diperhitungkan selama periode analisis 50 tahun karena umur layan bantalan sintetis diasumsikan sama dengan horizon analisis, yaitu 50 tahun.

5. Perhitungan LCC Bantalan Kayu

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp9,103,150,000.00 + (Rp10,090,805.70 x 4195) + Rp6,455,907,586.03

   LCC = Rp57,889,987,477.25

   LCC per bantalan = Rp57,889,987,477.25 / 4195

   LCC per bantalan = Rp13,799,758.64

6. Perhitungan LCC Bantalan Sintetis

   LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

   LCC = Rp21,844,917,400.00+ (Rp6,695,230.39 x 4603) + Rp0

   LCC = Rp52,663,062,906.81

   LCC per bantalan = Rp52,663,062,906.81 / 4603

   LCC per bantalan = Rp11,441,030.39

b. Sensitivitas 14%

   Diketahui:

   Co Bantalan Kayu = Rp9,103,150,000.00

   Co Bantalan Sintetis = Rp21,844,917,400.00

   Biaya Pemeliharaan Kayu = Rp920,552.60

   Biaya Pemeliharaan Sintetis = Rp610,784.90

   Tingkat Diskonto (i) = 14%

   Perhitungan:

   1. PV Pemeliharaan Bantalan Kayu

      PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Cpemeliharaan}}{(1+i)^t}$

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Rp920,552.60}}{(1+0,14)^t}$

PV total = Rp6,565,985.45

2. PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Cpemeliharaan}}{(1+i)^t}$

PV Pemeliharaan $= \frac{\text{Rp610,784.90}}{(1+0,14)^t}$

PV total = Rp4,356,518.86

3. Perhitungan PV Bantalan Kayu

$$PV_{10} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0,14)^{10}}$$

PV_{10} = Rp2,455,518,359.62

$$PV_{20} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0,14^{20})}$$

PV_{20} = Rp662,360,876.67

$$PV_{30} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0,14)^{30}}$$

PV_{30} = Rp178,667,746.15

$$PV_{40} = \frac{\text{Rp9,103,150,000.00}}{(1+0,14)^{40}}$$

PV_{40} = Rp48,194,518.48

PV total = Rp3,344,741,500.92

4. Perhitungan PV Bantalan Sintetis

Pada penelitian ini, biaya penggantian bantalan sintetis tidak diperhitungkan selama periode analisis 50 tahun karena umur layan bantalan sintetis diasumsikan sama dengan horizon analisis, yaitu 50 tahun.

5. Perhitungan LCC Bantalan Kayu

LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

LCC = Rp9,103,150,000.00 + (Rp6,565,985.45 x 4195) + Rp3,344,741,500.92

LCC = Rp39,992,200,446.35

LCC per bantalan = Rp39,992,200,446.35 / 4195

LCC per bantalan = Rp9,533,301.66

6. Perhitungan LCC Bantalan Sintetis

LCC = Co + ΣPV Pemeliharaan + ΣPV Penggantian

LCC = Rp21,844,917,400.00+ (Rp4,356,518.86 x 4603) + Rp0

LCC = Rp43,340,958,731.38

LCC per bantalan = Rp43,340,958,731.38 / 4603

LCC per bantalan = Rp9,415,806.81

5.2.7 Analisis Perbandingan

Berdasarkan hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), dilakukan perbandingan biaya antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis selama periode analisis 50 tahun. Perbandingan dilakukan dengan mempertimbangkan biaya awal pengadaan dan pemasangan, umur layanan, biaya penggantian, biaya pemeliharaan, serta nilai sekarang (*Present Value*) dari biaya yang terjadi pada masa mendatang. Dalam analisis ini digunakan discount rate sebesar 11.30% dan asumsi harga konstan (*constant price*), sehingga harga material maupun biaya pemasangan, serta biaya pemeliharaan dianggap tidak mengalami perubahan selama periode analisis

Bantalan kayu memiliki harga material sebesar Rp1,850,000.00 per batang dengan biaya pemasangan sebesar Rp320,000.00 per batang, sedangkan bantalan sintetis memiliki harga material sebesar Rp4.495.800.00 per batang dengan biaya pemasangan Rp250,000.00. Berdasarkan jumlah bantalan yang dianalisis, yaitu 4.195 batang untuk bantalan kayu dan 4.603 batang untuk bantalan sintetis, biaya awal bantalan kayu lebih rendah dibandingkan bantalan sintetis. Namun, dalam LCCA, perbedaan biaya awal tersebut dibandingkan dengan kebutuhan penggantian selama periode analisis. Bantalan kayu dalam penelitian ini diasumsikan memiliki umur penggantian setiap 10 tahun, sehingga penggantian terjadi pada tahun ke-10, ke-20, ke-30, dan ke-40. Sementara itu, bantalan sintetis memiliki umur layanan 50 tahun sehingga tidak dilakukan penggantian selama periode analisis. Analisis perbandingan dapat dilihat pada Tabel 5.4 dibawah ini.

Tabel 5. 4 Analisis Perbandingan Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis

Komponen Perbandingan	Bantalan Kayu	Bantalan Sintetis
Jumlah Bantalan	4195	4603
Harga Material/batang	Rp1,850,000.00	Rp4,495,800.00
Biaya Pemasangan/batang	Rp320,000.00	Rp250,000.00
Total Biaya Awal (Co)	Rp9,103,150,000.00	Rp21,844,917,400.00
Biaya Awal per batang	Rp2,170,000.00	Rp4,745,800.00
Periode Analisis	50 tahun	50 tahun
Umur Penggantian (tahun)	Per 10 tahun	Tidak dilakukan pergantian
Tahun Penggantian	10, 20, 30, dan 40	-
Discount Rate	11.30%	11.30%
Biaya Pemeliharaan (per batang)	Rp920,552.60	Rp610,784.90
PV Pemeliharaan per tahun sampai 50 tahun	Rp8,107,916.53	Rp5,379,587.21
PV Penggantian	Rp4,682,815,353.81	Rp0
PV Penggantian per batang	Rp1,116,284.95	Rp0
Life Cycle Cost Analysis (LCCA)	Rp47,798,675,209.67	Rp46,607,157,306.20
Life Cycle Cost Analysis (LCCA) per batang	Rp11,394,201.48	Rp10,125,387.21
Discount Rate	9%	9%
Biaya Pemeliharaan (per batang)	Rp920,552.60	Rp610,784.90
PV Pemeliharaan per tahun sampai 50 tahun	Rp10,090,805.70	Rp6,695,230.39
PV Penggantian	Rp6,455,907,586.03	Rp0
PV Penggantian per batang	Rp1,538,952.94	Rp0
Life Cycle Cost Analysis (LCCA)	Rp57,889,987,477.25	Rp52,663,062,906.81

Lanjutan Tabel 5. 5 Analisis Perbandingan Bantalan Kayu dan Bantalan Sintetis

Komponen Perbandingan	Bantalan Kayu	Bantalan Sintetis
Life Cycle Cost Analysis (LCCA) per batang	Rp11,394,201.48	Rp10,125,387.21
Discount Rate	9%	9%
Biaya Pemeliharaan (per batang)	Rp920,552.60	Rp610,784.90
PV Pemeliharaan per tahun sampai 50 tahun	Rp10,090,805.70	Rp6,695,230.39
PV Penggantian	Rp6,455,907,586.03	Rp
PV Penggantian per batang	Rp1,538,952.94	Rp0
Life Cycle Cost Analysis (LCCA)	Rp57,889,987,477.25	Rp52,663,062,906.81
Life Cycle Cost Analysis (LCCA) per batang	Rp13,799,758.64	Rp11,441,030.39
Discount Rate	14%	14%
Biaya Pemeliharaan (per batang)	Rp920,552.60	Rp610,784.90
PV Pemeliharaan per tahun sampai 50 tahun	Rp6,565,985.45	Rp4,356,518.86
PV Penggantian	Rp3,344,741,500.92	Rp0
PV Penggantian per batang	Rp797,316.21	Rp0
Life Cycle Cost Analysis (LCCA)	Rp39,992,200,446.35	Rp43,340,958,731.38
Life Cycle Cost Analysis (LCCA) per batang	Rp9,533,301.66	Rp9,415,806.81

Berdasarkan Tabel 5.4, terlihat bahwa bantalan kayu memiliki biaya awal total yang lebih rendah, yaitu sebesar Rp9,103,150,000.00, dibandingkan bantalan sintetis sebesar Rp21,844,917,400.00. Meskipun demikian, bantalan kayu memerlukan penggantian secara berkala setiap 10 tahun. Akumulasi nilai sekarang

dari biaya penggantian bantalan kayu selama periode analisis mencapai sekitar Rp4,682,815,353.81. Setelah biaya awal, biaya pemeliharaan, dan biaya penggantian tersebut dijumlahkan, diperoleh nilai LCC bantalan kayu sebesar sekitar Rp47,798,675,209.67. Sementara itu, karena bantalan sintetis memiliki umur layanan 50 tahun, tidak dilakukan penggantian sampai akhir periode analisis sehingga nilai LCC-nya ditambah dengan biaya awal dan biaya pemeliharaan, yaitu sekitar Rp46,607,157,306.20.

Dengan demikian, berdasarkan hasil analisis, terdapat selisih LCC sekitar Rp1,191,517,903.47, dengan nilai LCC bantalan sintetis lebih rendah dibandingkan bantalan kayu. Hal tersebut menunjukkan bahwa meskipun bantalan sintetis membutuhkan biaya investasi awal yang lebih besar, umur layanan yang lebih panjang dapat mengurangi kebutuhan penggantian dan menghasilkan biaya siklus hidup yang lebih rendah. Berdasarkan asumsi yang digunakan dalam penelitian, yaitu umur penggantian bantalan kayu 10 tahun, umur layanan bantalan sintetis 50 tahun, harga konstan, *discount rate* 11.30%, bantalan sintetis menunjukkan efisiensi biaya yang lebih baik selama periode analisis 50 tahun.

Hasil analisis sensitivitas terhadap tingkat suku bunga diskonto (*discount rate*) sebesar 9%, 11.30%, dan 14% menunjukkan bahwa nilai *Life Cycle Cost* (LCC). Dari nilai diskonto 9% Terlihat bahwa bantalan kayu memiliki PV Penggantian total yang lebih besar dari diskonto 11.30% terutama untuk diskonto 14%, yaitu sebesar Rp6,455,907,586.03, untuk nilai diskonto 11.86% adalah Rp3,344,741,500.92. Untuk PV Pemeliharaan diskonto 9% sendiri sebesar Rp42,330,929,891.22 hasil tersebut didapatkan dari PV Pemeliharaan per batang sebesar Rp10,090,805.70 dikalikan dengan jumlah bantalan kayu 4,195, untuk diskonto 14% sebesar Rp27,544,308,945.43 didapatkan dari PV Pemeliharaan per batang sebesar Rp6,565,985.45 dikalikan dengan jumlah bantalan sintetis 4,603. Dari perhitungan tersebut didapatkan nilai LCC dari sensitivitas 9% sebesar Rp57,889,987,477.25, untuk sensitivitas 14% sebesar Rp39,992,200,446.35. Selain dari perhitungan Bantalan Kayu, perhitungan PV Pemeliharaan untuk bantalan sintetis dari sensitivitas 9% adalah Rp30,818,145,506.81 dan untuk sensitivitas 14% adalah sebesar Rp21,496,041,331.38. Didapatkan nilai LCC untuk kedua

sensitivitas tersebut sebesar Rp52,663,062,906.81 untuk diskonto 9% dan untuk sensitivitas 14% sebesar Rp43,340,958,731.38. Perbandingan penggunaan sensitivitas sangat terlihat pada besarnya selisih pada LCC, diskonto 9% nilai selisih sangat tinggi untuk bantalan sintetis sedangkan diskonto 14% nilai bantalan kayu nilai selisih lebih tinggi dibanding bantalan sintetis. Maka dari itu penulis menggunakan Sensitivitas diskonto sebesar 11.30% karena dianggap nilai tengah daripada batas atas dan batas bawah tersebut.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data, perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), serta pembahasan perbandingan antara bantalan rel kayu dan bantalan rel sintetis pada Jalur Jembatan Rel R54 di wilayah DAOP 6 Yogyakarta, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Biaya Awal (Co)

   Biaya awal pengadaan dan pemasangan bantalan rel sintetis relatif lebih tinggi dibandingkan dengan bantalan rel kayu. Berdasarkan data lapangan, harga satuan material bantalan kayu adalah sebesar Rp1,850,000.00 per batang, sedangkan bantalan sintetis mencapai Rp4,495,800.00 per batang, dengan biaya pemasangan yang berbeda yaitu untuk Bantalan Kayu Rp320,000 per batang sedangkan Bantalan Sintetis Rp250,000.00. Secara akumulatif pada titik lokasi studi di DAOP 6 Yogyakarta (total 4.195 bantalan kayu dan 4.603 bantalan sintetis), total biaya awal (Co) untuk keseluruhan bantalan kayu sebesar Rp9,103,150,000.00, sedangkan untuk bantalan sintetis membutuhkan investasi awal sebesar Rp21,844,917,400.00. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan bantalan sintetis memerlukan alokasi modal awal jauh lebih besar di awal masa konstruksi atau pemasangan dengan selisih biaya awal sebesar sekitar Rp12,741,767,400.00.

2. Biaya Pemeliharaan

   Bantalan sintetis membutuhkan intensitas dan frekuensi kegiatan pemeliharaan fisik yang jauh lebih rendah dibandingkan bantalan kayu. Meskipun data biaya pemeliharaan spesifik belum tercatat secara terpisah

dalam pencatatan kuantitatif historis di Resort Jalan Rel, menurut PM No. 59 Tahun 2023 yang menyatakan bahwa harga satuan pekerjaan perawatan prasarana perkeretaapian mencakup kebutuhan personel, peralatan, material, dan suku cadang. Biaya tenaga kerja dalam penelitian ini menggunakan tarif tenaga teknis pemeliharaan sebesar Rp172.000/orang-hari (OH), serta analisis teknis menunjukkan bahwa bantalan kayu memerlukan perawatan rutin berfrekuensi tinggi, seperti pengencangan penambat atau tirfon yang longgar akibat penyusutan kayu, pelaburan zat kimia/oli bekas untuk mencegah rayap dan jamur, serta perbaikan lebar sepur (*regauging*) akibat membesarnya lubang baut. Sebaliknya, bantalan sintetis bersifat hidrofobik (menolak air), tahan korosi, anti-rayap, dan memiliki kestabilan dimensi yang sangat tinggi sehingga hampir tidak memerlukan intervensi perawatan fisik harian. Berdasarkan perhitungan satu unit pemeliharaan untuk 30 batang, biaya pemeliharaan bantalan kayu sebesar Rp27,616,578 per tahun atau Rp920,552.60 per batang per tahun, sedangkan bantalan sintetis sebesar Rp18,323,547 per tahun atau Rp610,784.90 per batang per tahun. Dengan discount rate dasar 11.30%, diperoleh PV biaya pemeliharaan selama 50 tahun sebesar Rp8,107,916.53 per batang untuk bantalan kayu dan Rp5,379,587.21 per batang untuk bantalan sintetis. Perbedaan tersebut terutama dipengaruhi oleh lebih tingginya frekuensi *regauging*, inspeksi visual, serta adanya perawatan kimia pada bantalan kayu yang tidak diperlukan pada bantalan sintetis. Berdasarkan analisis sensitivitas, PV biaya pemeliharaan bantalan kayu per batang selama 50 tahun berubah dari Rp10,090,805.70 pada diskonto 9%, menjadi Rp8,107,916.53 pada 11.30%, dan Rp6,565,985.45 pada 14%. Sementara itu, bantalan sintetis masing-masing sebesar Rp6,695,230.39, Rp5,379,587.21, dan Rp4,356,518.86. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada seluruh skenario tingkat diskonto, biaya pemeliharaan bantalan sintetis tetap lebih rendah dibandingkan bantalan kayu, tetapi di diskonto 14% LCC bantalan kayu lebih rendah dibandingkan bantalan sintetis.

3. Umur Teknis (*Service Life)*

   Bantalan sintetis memiliki umur teknis layanan yang jauh lebih panjang dan stabil dibandingkan bantalan kayu. Bantalan kayu pada jalur jembatan rel memiliki umur teknis yang relatif pendek, yaitu berkisar antara 5 hingga 18 tahun (dengan rata-rata penggantian tiap 10 tahun) akibat kerentanan terhadap pelapukan biologis, perubahan cuaca, kelembapan, serta beban dinamis kereta api. Selama periode analisis 50 tahun, penggantian bantalan kayu diperhitungkan pada tahun ke-10, 20, 30, dan 40. Sementara itu, bantalan sintetis berbasis material komposit/FFU didesain untuk memiliki umur teknis hingga 50 tahun berdasarkan uji penuaan material (*aging test*), sehingga tidak mengalami degradasi struktural dalam jangka panjang. Maka dari itu, bantalan sintetis tidak dilakukan penggantian dalam periode analisis karena akhir umur teknisnya bertepatan dengan batas akhir horizon perhitungan.

4. Efisiensi Biaya dan Keberlanjutan

   Berdasarkan base case discount rate 11.30%, total LCC bantalan kayu selama 50 tahun sebesar Rp47,798,675,209.67, sedangkan bantalan sintetis sebesar Rp46,607,157,306.20, sehingga bantalan sintetis memberikan penghematan sekitar Rp1,191,517,903.47 dibandingkan bantalan kayu. Pada diskonto 9%, LCC bantalan kayu sebesar Rp57,889,987,477.25 dan sintetis sebesar Rp52,663,062,906.81, sehingga sintetis lebih ekonomis sekitar Rp5,226,924,570.44. Sebaliknya, pada diskonto 14%, LCC bantalan kayu menjadi Rp39,992,200,446.35, sedangkan sintetis sebesar Rp43,340,958,731.38, sehingga bantalan kayu lebih rendah sekitar Rp3,348,758,285.02. Hasil ini menunjukkan bahwa keunggulan ekonomi bantalan sintetis pada base case 11.30% tidak bersifat mutlak dan sensitif terhadap pemilihan tingkat diskonto. Dari aspek *Green Construction*, keunggulan sintetis dalam penelitian ini dibatasi pada efisiensi penggunaan material dan kegiatan pemeliharaan,

yang ditunjukkan oleh tidak adanya siklus penggantian selama horizon 50 tahun, tidak diperlukannya perawatan kimia, lebih rendahnya kebutuhan *regauging* dan inspeksi, serta lebih rendahnya potensi timbulan material bekas akibat penggantian. Oleh karena itu, bantalan sintetis dinilai lebih efisien secara biaya siklus hidup sekaligus lebih mendukung pengelolaan sumber daya dan pemeliharaan yang berkelanjutan, tanpa menyimpulkan bahwa dampak lingkungan totalnya lebih rendah karena penelitian ini tidak melakukan LCA.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dari hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat disampaikan untuk pertimbangan manajemen prasarana perkeretaapian dan pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Rekomendasi Kebijakan Manajemen Aset (PT KAI DAOP 6 Yogyakarta)

   Disarankan bagi PT Kereta Api Indonesia (Persero) DAOP 6 Yogyakarta untuk memprioritaskan penggantian bantalan kayu menjadi bantalan sintetis secara bertahap pada seluruh jembatan rel. Pengambilan keputusan manajemen prasarana sebaiknya tidak hanya berfokus pada biaya pengadaan awal (*initial cost*), tetapi mengadopsi pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC). Penerapan bantalan sintetis terbukti menekan pengeluaran jangka panjang dan meminimalisasi gangguan operasional perjalanan kereta api (*window time*) yang biasanya timbul akibat proyek perbaikan atau penggantian bantalan kayu berkala.
2. Pengembangan Sistem Inventarisasi dan Pencatatan Biaya Pemeliharaan

   Perlu dilakukannya digitalisasi dan pemisahan pengarsipan data biaya pemeliharaan spesifik per komponen material pada unit Resort Jalan Rel. Untuk mendukung analisis manajemen aset berbasis risiko dan keandalan di masa mendatang, disarankan agar unit pemeliharaan jalan rel mencatat secara rinci alokasi biaya tenaga kerja, bahan kimia, dan frekuensi perbaikan harian yang khusus dikeluarkan untuk bantalan kayu maupun bantalan sintetis pada tiap-tiap jembatan.

3. Saran untuk Penelitian Selanjutnya

Peneliti selanjutnya dianjurkan untuk memperluas cakupan analisis pada aspek dampak lingkungan kuantitatif dan pengujian kinerja mekanis di lapangan. Penelitian lanjutan disarankan untuk memasukkan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) secara kuantitatif guna menghitung jejak karbon (*carbon footprint*) dari proses produksi bantalan sintetis dibandingkan dengan deforestasi kayu. Selain itu, dapat ditambahkan variabel pengujian lendutan dinamis, uji getaran, serta analisis perilaku struktur menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH) pada jalur rel R54 untuk melengkapi kajian ekonomi LCCA yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Astor, Y. (2013). Jurnal Konstruksi. *CIREBON Jurnal Konstruksi*, *1*(1), 2085–8744.

Djarwanto, D., Suprapti, S., & Rulliaty, S. (2018). Service Life of Railway Wood Sleepers in Indonesia. *Wood Research Journal*, *6*(1), 1–7. https://doi.org/10.51850/wrj.2015.6.1.1-7

Indrakusuma, R., Hafizah, N. El, & Ardi, D. R. A. (2024). Decision Support to Improve Railway Track Maintenance in Indonesia: A life Cycle Cost Approach. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen*, *5*(2), 162–177. https://doi.org/10.31284/j.jtm.2024.v5i2.5945

Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2011). Peraturan Menteri Perhubungan No 32 Tahun 2011 tentang Standar dan Tata Cara Perawatan Prasarana Perkeretaapian. *Kelas Dan Kegiatan Di Stasiun Kereta Api*, 2.

Kurniawan, M. A., Adi Perwira, D., & Leliana, A. (2022). Analisis Perilaku Struktur Bantalan Kereta Api dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, *6*(1), 39–44. https://doi.org/10.37367/jpi.v6i1.172

Maulana, A. T., & Gunawan, L. (2023). Optimization of Railway Infrastructure Asset – A Review. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, *7*(2), 11–26. https://doi.org/10.37367/jpi.v7i2.285

PM No. 60 Tahun 2012. (2012). Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api. *PM. No. 60 Tahun 2012*, 1–57.

Triwinanto, P. (2017). Analisis Kekuatan Lentur Statis Dan Dinamis Bantalan Sintetis Untuk Jalan Kereta Api Static and Dynamic Analysis of Bending Strength of Synthetic Sleepers for Railway. *M.P.I*, *11*(2), 95–100.

Utari, R. P., Samad, A., & Wahono, A. T. (2023). *Analisis Biaya Konstruksi Menggunakan Metode Life Cycle Cost pada Gedung Cordova Edupartment Semarang Construction Cost Analysis Using the Life Cycle Cost Method in the Cordova Edupartment Building Semarang*. *21*(2), 77–83.

Wibowo, A. (2024). Ju r n a lT e o r e t i s d a n e r a p a n i d a n g e k a y a s a i p i l Pemilihan Tingkat Diskonto untuk Pengukuran Nilai Manfaat Uang pada Proyek Penyediaan Infrastruktur dengan Skema KPBU. *31*(3), 335–344. https://doi.org/10.5614/jts.2024.31.3.11

Yusuf, M. A., Roestaman, R., & Walujodjati, E. (2022). Evaluasi Struktur Atas Komponen Jalan Rel dalam Kegiatan Reaktivasi Jalur Cibatu Cikajang. *Jurnal Konstruksi*, *20*(1), 30–40. https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.20-1.926

Kementrian Perhubungan, D. J. P. (2023). Peraturan Menteri Perhubungan Nomer 59 Tahun 2023 Tentang Pedoman Perhitungan Biaya Perawatan Dan Pengoperasian Prasarana Perkeretaapian Milik Negara. *3*, 1–103.

851283881-ISO-15686-5-2017.pdf. (n.d.).

LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Lapangan



Gambar L-1. 1 Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.4 Yogyakarta BH 538+4/5 Antara PTN-YK



Gambar L-1. 2 Bantalan Sintetis di Lokasi JR 6.4 Yogyakarta BH 541+5/6 Antara PTN-YK



Gambar L-1. 3 Contoh Kerusakan Bantalan Kayu



Gambar L-1. 4 Contoh Kerusakan Bantalan Kayu



Gambar L-1. 5 Narasumber Bapak Aan sebagai Staf Mabes JJ DAOP 6 Yogyakarta



Gambar L-1. 6 Narasumber Bapak Yadno dan Staf Resort JJ JR 6.4 Yogyakarta

Lampiran 2 Data yang digunakan

Tabel L-1. 1 Pendataan Bantalan Jembatan

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
1	JR 6.1 Jenar	1880	482+2/3	KTA-JN	Hulu	64	NORMAL					64		0
2	JR 6.1 Jenar	1880	482+2/3	KTA-JN	Hilir	64	NORMAL						64	0
3	JR 6.1 Jenar	1895	484+8/9	KTA-JN	Hulu	4	ABNORMAL							4
4	JR 6.1 Jenar	1895	484+8/9	KTA-JN	Hilir	4	ABNORMAL							4
5	JR 6.1 Jenar	1899	485+6/7	KTA-JN	Hulu	7	ABNORMAL							7
6	JR 6.1 Jenar	1899	485+6/7	KTA-JN	Hilir	7	ABNORMAL							7
7	JR 6.1 Jenar	1906	486+4/5	KTA-JN	Hulu	2	ABNORMAL							2

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
8	JR 6.1 Jenar	1909	487+0/1	KTA-JN	Hulu	18	ABNORMAL							18
9	JR 6.1 Jenar	1924	490+0/1	KTA-JN	Hulu	2	ABNORMAL							2
10	JR 6.1 Jenar	1938	492+1/2	KTA-JN	Hulu	15	ABNORMAL							15
11	JR 6.1 Jenar	1945	493+0/1	JN-WJ	Hilir	30	ABNORMAL							30
12	JR 6.1 Jenar	1947	494+0/1	JN-WJ	Hulu	238	NORMAL						238	0
13	JR 6.1 Jenar	1947	494+0/1	JN-WJ	Hilir	300	NORMAL		100	200				0
14	JR 6.1 Jenar	1955	497+2/3	JN-WJ	Hulu	15	ABNORMAL					8	6	1
15	JR 6.2 Wojo	1956	498+300	JN-WJ	Hulu	26	NORMAL			26				0
16	JR 6.2 Wojo	1957	498+606	JN-WJ	Hulu	14	NORMAL			14				0
17	JR 6.2 Wojo	1961	499+967	JN-WJ	Hulu	15	NORMAL			15				0
18	JR 6.2 Wojo	1964	501+048	WJ-KDG	Hulu	18	NORMAL			18				0
19	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hulu	4	NORMAL			4				0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
20	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hulu	6	ABNORMAL							6
21	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hulu	30	ABNORMAL							30
22	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hulu	30	ABNORMAL							30
23	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hulu	30	ABNORMAL							30
24	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hilir	10	ABNORMAL							10
25	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hilir	30	ABNORMAL							30
26	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hilir	30	ABNORMAL							30
27	JR 6.2 Wojo	1966	501+823	WJ-KDG	Hilir	30	ABNORMAL							30

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
28	JR 6.2 Wojo	1971	504+422	WJ-KDG	Hulu	15	NORMAL			15				0
29	JR 6.2 Wojo	1979	507+426	WJ-KDG	Hulu	42	ABNORMAL							42
30	JR 6.2 Wojo	1979	507+426	WJ-KDG	Hilir	42	ABNORMAL							42
31	JR 6.2 Wojo	1982	508+299	KDG-WT	Hulu	34	NORMAL			34				0
32	JR 6.2 Wojo	1982	508+299	KDG-WT	Hilir	42	NORMAL		42					0
33	JR 6.2 Wojo	1979	000+295	YIA-KDG	Hulu	38	NORMAL				38			0
34	JR 6.2 Wojo	1979	000+295	YIA-KDG	Hilir	38	NORMAL				38			0
35	JR 6.2 Wojo	3	001+533	YIA-KDG	Hulu	82	NORMAL							82
36	JR 6.2 Wojo	3	001+533	YIA-KDG	Hilir	82	NORMAL							82

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
37	JR 6.2 Wojo	7	003+210	YIA-KDG	Hulu	82	NORMAL							82
38	JR 6.2 Wojo	7	003+210	YIA-KDG	Hilir	4	NORMAL				4			0
39	JR 6.2 Wojo	7	003+210	YIA-KDG	Hilir	78	NORMAL							78
40	JR 6.2 Wojo	14	005+102	YIA-KDG	Hulu	116	NORMAL							116
41	JR 6.2 Wojo	14	005+102	YIA-KDG	Hilir	116	NORMAL							116
42	JR 6.3 Wates	2001	515+661	WT-STL	Hulu	132	NORMAL			88				44
43	JR 6.3 Wates	2007	518+147	WT-STL	Hulu	32	ABNORMAL							32
44	JR 6.3 Wates	2007	518+147	WT-STL	Hilir	32	ABNORMAL							32

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
45	JR 6.3 Wates	2008	518+409	WT-STL	Hulu	48	ABNORMAL							48
46	JR 6.3 Wates	2016	521+854	WT-STL	Hulu	105	ABNORMAL					105		0
47	JR 6.3 Wates	2034	527+474	STL-RWL	Hulu	296	NORMAL				296			0
48	JR 6.3 Wates	2034	527+474	STL-RWL	Hilir	209	ABNORMAL							209
49	JR 6.3 Wates	2044	530+277	STL-RWL	Hulu	64	ABNORMAL					64		0
50	JR 6.4 Yogyakarta	2104	538+4/5	PTN-YK	Hulu	38	NORMAL				38			0
51	JR 6.4 Yogyakarta	2104	538+4/5	PTN-YK	Hulu	38	ABNORMAL							38
52	JR 6.4 Yogyakarta	2135	541+5/6	PTN-YK	Hulu	81	NORMAL			18	63			0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
53	JR 6.4 Yogyakarta	732	166+4/6	LPN-MGW	Hulu	145	NORMAL			61	84			0
54	JR 6.4 Yogyakarta	732	166+4/6	LPN-MGW	Hilir	140	NORMAL			56	84			0
55	JR 6.5 Brambanan	561	147+439	BBN-SWT	Hilir	72	NORMAL				72			0
56	JR 6.5 Brambanan	561	147+439	BBN-SWT	Hulu	38	NORMAL		38					0
57	JR 6.5 Brambanan	562	147+583	BBN-SWT	Hilir	17	NORMAL				17			0
58	JR 6.5 Brambanan	562	147+583	BBN-SWT	Hulu	7	NORMAL				7			0
59	JR 6.5 Brambanan	562	147+583	BBN-SWT	Hulu	3	NORMAL							3
60	JR 6.5 Brambanan	582	149+858	BBN-SWT	Hilir	28	NORMAL	28						0
61	JR 6.5 Brambanan	582	149+858	BBN-SWT	Hulu	19	NORMAL	19						0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
62	JR 6.5 Brambanan	590	150+811	BBN-SWT	Hilir	18	NORMAL	18						0
63	JR 6.5 Brambanan	592	151+086	MGW-BBN	Hilir	2	NORMAL							2
64	JR 6.5 Brambanan	592	151+086	MGW-BBN	Hulu	2	NORMAL				2			0
65	JR 6.5 Brambanan	592	151+086	MGW-BBN	JLR 4 BBN	2	NORMAL							2
66	JR 6.5 Brambanan	593	151+099	MGW-BBN	Hilir	7	NORMAL				7			0
67	JR 6.5 Brambanan	593	151+099	MGW-BBN	Hulu	7	ABNORMAL							7
68	JR 6.5 Brambanan	593	151+099	MGW-BBN	Hulu JLR 3 BBN	6	NORMAL				6			0
69	JR 6.5 Brambanan	593	151+099	MGW-BBN	Hulu JLR 4 BBN	5	NORMAL				5			0
70	JR 6.5 Brambanan	605	152+852	MGW-BBN	Hilir	204	ABNORMAL							204

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
71	JR 6.5 Brambanan	605	152+852	MGW-BBN	Hulu	247	NORMAL				247			0
72	JR 6.5 Brambanan	627	155+680	MGW-BBN	Hilir	5	NORMAL							5
73	JR 6.5 Brambanan	627	155+680	MGW-BBN	Hulu	4	NORMAL							4
74	JR 6.5 Brambanan	641	156+551	MGW-BBN	Hilir	25	ABNORMAL							25
75	JR 6.5 Brambanan	641	156+551	MGW-BBN	Hilir	2	NORMAL							2
76	JR 6.5 Brambanan	641	156+551	MGW-BBN	Hulu	50	NORMAL			50				0
77	JR 6.5 Brambanan	669	158+714	MGW-BBN	Hilir	34	ABNORMAL							34
78	JR 6.6 Klaten	423	130+3/4	KT-CP	Hulu	62	ABNORMAL							62
79	JR 6.6 Klaten	423	130+3/4	KT-CP	Hilir	52	NORMAL					52		0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
80	JR 6.6 Klaten	432	133+0/1	KT-CP	Hulu	22	NORMAL							22
81	JR 6.6 Klaten	432	133+0/1	KT-CP	Hilir	18	NORMAL				18			0
82	JR 6.6 Klaten	461	138+2/3	KT-CP	Hulu	30	ABNORMAL							30
83	JR 6.6 Klaten	461	138+2/3	KT-CP	Hilir	12	ABNORMAL							12
84	JR 6.6 Klaten	482	140+3/4	SWT-KT	Hulu	56	NORMAL		56					0
85	JR 6.6 Klaten	482	140+3/4	SWT-KT	Hilir	14	ABNORMAL							14
86	JR 6.6 Klaten	482	140+3/4	SWT-KT	Hilir	18	NORMAL							18
87	JR 6.6 Klaten	482	140+3/4	SWT-KT	Hilir	14	ABNORMAL							14
88	JR 6.6 Klaten	509	142+7/8	SWT-KT	Hulu	39	NORMAL	39						0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
89	JR 6.6 Klaten	509	142+7/8	SWT-KT	Hilir	36	ABNORMAL							36
90	JR 6.6 Klaten	534	144+4/5	SWT-KT	Hulu	50	ABNORMAL							50
91	JR 6.6 Klaten	534	144+4/5	SWT-KT	Hilir	54	ABNORMAL							54
92	JR 6.7 Delanggu	351	117+739	DL-GWK	Hulu	19	NORMAL			19				0
93	JR 6.7 Delanggu	351	177+739	DL-GWK	Hilir	17	ABNORMAL							17
94	JR 6.7 Delanggu	358	119+171	DL-GWK	Hulu	100	NORMAL			100				0
95	JR 6.7 Delanggu	358	119+171	DL-GWK	Hilir	88	NORMAL				88			0
96	JR 6.7 Delanggu	382	123+357	CE-DL	Hulu	44	NORMAL				44			0
97	JR 6.7 Delanggu	382	123+357	CE-DL	Hilir	30	ABNORMAL							30

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
98	JR 6.7 Delanggu	410	128+130	CE-DL	Huli	77	NORMAL			77				0
99	JR 6.7 Delanggu	410	128+130	CE-DL	Hilir	18	ABNORMAL							18
100	JR 6.7 Delanggu	410	128+130	CE-DL	Hilir	18	NORMAL						18	0
101	JR 6.7 Delanggu	410	128+130	CE-DL	Hilir	18	ABNORMAL							18
102	JR 6.8 Solo Balapan	332	111+8/9	GW-PWS	Hulu	38	ABNORMAL					38		0
103	JR 6.8 Solo Balapan	332	111+8/9	GW-PWS	Hilir	30	ABNORMAL							30
104	JR 6.9 Wonogiri	1		STA-SKH	Tunggal	21	NORMAL							21
105	JR 6.9 Wonogiri	2		STA-SKH	Tunggal	264	NORMAL							264
106	JR 6.9 Wonogiri	3	3+498	STA-SKH	Tunggal	4	NORMAL							4

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
107	JR 6.9 Wonogiri	5	3+527	STA-SKH	Tunggal	4	NORMAL							4
108	JR 6.9 Wonogiri	6	3+789	STA-SKH	Tunggal	1	NORMAL							1
109	JR 6.9 Wonogiri	7	3+980	STA-SKH	Tunggal	2	NORMAL							2
110	JR 6.9 Wonogiri	8	4+057	STA-SKH	Tunggal	1	NORMAL							1
111	JR 6.9 Wonogiri	9	4+102	STA-SKH	Tunggal	4	NORMAL							4
112	JR 6.9 Wonogiri	11	4+936	STA-SKH	Tunggal	2	NORMAL							2
113	JR 6.9 Wonogiri	12	5+041	STA-SKH	Tunggal	4	NORMAL							4
114	JR 6.9 Wonogiri	13	5+129	STA-SKH	Tunggal	2	NORMAL							2
115	JR 6.9 Wonogiri	16	6+638	STA-SKH	Tunggal	2	NORMAL							2

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
116	JR 6.9 Wonogiri	18	8+447	STA-SKH	Tunggal	86	NORMAL							86
117	JR 6.9 Wonogiri	20	9+521	STA-SKH	Tunggal	4	NORMAL							4
118	JR 6.9 Wonogiri	22	9+938	STA-SKH	Tunggal	2	NORMAL							2
119	JR 6.9 Wonogiri	24	10+640	STA-SKH	Tunggal	2	NORMAL							2
120	JR 6.9 Wonogiri	27	11+408	STA-SKH	Tunggal	4	NORMAL							4
121	JR 6.9 Wonogiri	37	13+623	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4
122	JR 6.9 Wonogiri	38	13+643	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4
123	JR 6.9 Wonogiri	40	13+854	SKH-PNT	Tunggal	2	NORMAL							2
124	JR 6.9 Wonogiri	41	13+968	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
125	JR 6.9 Wonogiri	42	14+246	SKH-PNT	Tunggal	2	NORMAL							2
126	JR 6.9 Wonogiri	43	14+254	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4
127	JR 6.9 Wonogiri	47	15+303	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4
128	JR 6.9 Wonogiri	48	15+394	SKH-PNT	Tunggal	2	NORMAL							2
129	JR 6.9 Wonogiri	49	15+721	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4
130	JR 6.9 Wonogiri	50	15+970	SKH-PNT	Tunggal	6	NORMAL							6
131	JR 6.9 Wonogiri	51	15+984	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4
132	JR 6.9 Wonogiri	54	17+277	SKH-PNT	Tunggal	64	NORMAL							64
133	JR 6.9 Wonogiri	56A	18+673	SKH-PNT	Tunggal	4	NORMAL							4

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
134	JR 6.9 Wonogiri	57	18+696	SKH-PNT	Tunggal	6	NORMAL							6
135	JR 6.9 Wonogiri	58	20+021	SKH-PNT	Tunggal	32	NORMAL							32
136	JR 6.9 Wonogiri	58B	21+370	SKH-PNT	Tunggal	2	NORMAL							2
137	JR 6.9 Wonogiri	59	21+801	PNT-WNG	Tunggal	32	NORMAL							32
138	JR 6.9 Wonogiri	60	22+771	PNT-WNG	Tunggal	224	NORMAL							224
139	JR 6.9 Wonogiri	63	25+965	PNT-WNG	Tunggal	2	NORMAL							2
140	JR 6.9 Wonogiri	79	31+271	PNT-WNG	Tunggal	58	NORMAL							58
141	JR 6.10 Sumberlawang	220	69+7/8	GD-GPK	Tunggal	29	ABNORMAL						29	0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
142	JR 6.10 Sumberlawang	220	69+7/8	GD-GPK	Tunggal									0
143	JR 6.10 Sumberlawang	223	70+2/3	GD-GPK	Tunggal	15	ABNORMAL							15
144	JR 6.10 Sumberlawang	225	70+5/6	GD-GPK	Tunggal	14	ABNORMAL							14
145	JR 6.10 Sumberlawang	230	71+2/3	GD-GPK	Tunggal	13	ABNORMAL							13
146	JR 6.10 Sumberlawang	233	71+8/9	GD-GPK	Tunggal	13	ABNORMAL							13
147	JR 6.10 Sumberlawang	234	71+9/0	GD-GPK	Tunggal	13	ABNORMAL							13
148	JR 6.10 Sumberlawang	239	72+6/7	GPK-SUM	Tunggal	11	ABNORMAL							11
149	JR 6.10 Sumberlawang	241	73+2/3	GPK-SUM	Tunggal	11	ABNORMAL							11
150	JR 6.10 Sumberlawang	246	73+9/0	GPK-SUM	Tunggal	11	ABNORMAL							11

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
151	JR 6.10 Sumberlawang	294	96+4/5	SLM-KO	Tunggal	70	ABNORMAL					70		0
152	JR 6.11 Palur	280	250+6/7	KMR-MSR	Hilir	44	NORMAL				44			0
153	JR 6.11 Palur	280	250+6/7	KMR-MSR	Hilir									0
154	JR 6.11 Palur	280	250+6/7	KMR-MSR	Hilir									0
155	JR 6.11 Palur	280	250+6/7	KMR-MSR	Hulu	58	NORMAL				58			0
156	JR 6.11 Palur	287	252+6/7	PL-KMR	Hilir	62	NORMAL				62			0
157	JR 6.11 Palur	287	252+6/7	PL-KMR	Hulu	72	NORMAL						72	0
158	JR 6.11 Palur	303	256+0/1	PL-KMR	Hilir	14	ABNORMAL					14		0
159	JR 6.11 Palur	307	257+2/3	SK-PL	Hilir	26	ABNORMAL					26		0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
160	JR 6.11 Palur	308	258+1/3	SK-PL	Hulu	411	ABNORMAL							411
161	JR 6.11 Palur	308	258+1/3	SK-PL	Hilir	411	ABNORMAL							411
162	JR 6.12 Sragen	223	235+514	MSR-SR	Hulu	50	NORMAL	50						0
163	JR 6.12 Sragen	223	235+514	MSR-SR	Hilir	26	ABNORMAL							26
164	JR 6.12 Sragen	226	236+838	MSR-SR	Hulu	58	NORMAL			58				0
165	JR 6.12 Sragen	226	236+838	MSR-SR	Hilir	45	NORMAL			45				0
166	JR 6.12 Sragen	227	237+022	MSR-SR	Hulu	86	NORMAL	86						0
167	JR 6.12 Sragen	227	237+022	MSR-SR	Hilir	47	NORMAL	47						0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
168	JR 6.12 Sragen	243	240+451	MSR-SR	Hulu	30	NORMAL			30				0
169	JR 6.12 Sragen	262	245+019	KMR-MSR	Hilir	34	NORMAL	34						0
170	JR 6.12 Sragen	262	245+019	KMR-MSR	Hulu	58	NORMAL			58				0
171	JR 6.12 Sragen	263	245+474	KMR-MSR	Hilir	20	NORMAL	20						0
172	JR 6.12 Sragen	271	247+357	KMR-MSR	Hulu	128	NORMAL	128						0
173	JR 6.12 Sragen	271	247+357	KMR-MSR	Hilir	105	NORMAL					105		0
174	JR 6.13 Kebonromo	150	221+0/1	KDB-WK	Hilir	84	NORMAL	84						0
175	JR 6.13 Kebonromo	150	221+0/1	KDB-WK	Hulu	107	NORMAL						107	0
176	JR 6.13 Kebonromo	165	224+3/4	KRO-KDB	Hilir	67	NORMAL				67			0

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
177	JR 6.13 Kebonromo	165	224+3/4	KRO-KDB	Hulu	86	ABNORMAL							86
178	JR 6.13 Kebonromo	176	226+4/6	KRO-KDB	Hilir	97	NORMAL				97			0
179	JR 6.13 Kebonromo	176	226+4/6	KRO-KDB	Hulu	107	ABNORMAL							107
180	JR 6.13 Kebonromo	183	227+7/8	KRO-KDB	Hilir	62	NORMAL				62			0
181	JR 6.13 Kebonromo	183	227+7/8	KRO-KDB	Hilir									0
182	JR 6.13 Kebonromo	183	227+7/8	KRO-KDB	Hulu									0
183	JR 6.13 Kebonromo	183	227+7/8	KRO-KDB	Hulu	86	NORMAL						86	0
184	JR 6.13 Kebonromo	196	229+6/7	SR-KRO	Hilir	37	NORMAL			15	22			0
185	JR 6.13 Kebonromo	196	229+6/7	SR-KRO	Hulu	30	ABNORMAL							30

No	Resor	No. BH	KM + HM	Antara	Jalur (hulu/hilir/tunggal)	Jumlah Batangan (Batang)	Jenis Bantalan	Volume Pemasangan Bantalan Sintetis BH (batang) *Diisi sesuai Tahun Pengadaan						Sisa Bantalan Kayu (Batang)
								Tahun 2022	Tahun 2023 Tahap I	Tahun 2023 Tahap II	Tahun 2024	Tahun 2025	Tahun 2026	
186	JR 6.13 Kebonromo	200	230+8/9	SR-KRO	Hilir	30	NORMAL				30			0
187	JR 6.13 Kebonromo	200	230+8/9	SR-KRO	Hulu	50	ABNORMAL							50
188	JR 6.13 Kebonromo	209	232+6/7	SR-KRO	Hilir	47	NORMAL	47						0
189	JR 6.13 Kebonromo	209	232+6/7	SR-KRO	Hulu	58	ABNORMAL							58
186	JR 6.13 Kebonromo	200	230+8/9	SR-KRO	Hilir	30	NORMAL				30			0
187	JR 6.13 Kebonromo	200	230+8/9	SR-KRO	Hulu	50	ABNORMAL							50
188	JR 6.13 Kebonromo	209	232+6/7	SR-KRO	Hilir	47	NORMAL	47						0
189	JR 6.13 Kebonromo	209	232+6/7	SR-KRO	Hulu	58	ABNORMAL							58
Jumlah						8798		600	236	1001	1600	546	620	4195

Tabel L-1. 2 Data Awal (Co) Bantalan Kayu

Bahan = Kayu						
No	Lokasi	Vmaterial	Hmaterial	Vupah	Hupah	Co
1	JR 6.1 Jenar	Rp1,850,000.00	90	Rp320,000.00	90	Rp195,300,000.00
2	JR 6.2 Wojo	Rp1,850,000.00	836	Rp320,000.00	836	Rp1,814,120,000.00
3	JR 6.3 Wates	Rp1,850,000.00	365	Rp320,000.00	365	Rp792,050,000.00
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp1,850,000.00	38	Rp320,000.00	38	Rp82,460,000.00
5	JR 6.5 Brambanan	Rp1,850,000.00	288	Rp320,000.00	288	Rp624,960,000.00
6	JR 6.6 Klaten	Rp1,850,000.00	312	Rp320,000.00	312	Rp677,040,000.00
7	JR 6.7 Delanggu	Rp1,850,000.00	83	Rp320,000.00	83	Rp180,110,000.00
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp1,850,000.00	30	Rp320,000.00	30	Rp65,100,000.00
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp1,850,000.00	873	Rp320,000.00	873	Rp1,894,410,000.00
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp1,850,000.00	101	Rp320,000.00	101	Rp219,170,000.00
11	JR 6.11 Palur	Rp1,850,000.00	822	Rp320,000.00	822	Rp1,783,740,000.00
12	JR 6.12 Sragen	Rp1,850,000.00	26	Rp320,000.00	26	Rp56,420,000.00
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp1,850,000.00	331	Rp320,000.00	331	Rp718,270,000.00
Total						Rp9,103,150,000.00

Tabel L-1. 3 Data Awal (Co) Bantalan Sintetis

Bahan = Sintetis						
No	Lokasi	Vmaterial	Hmaterial	Vupah	Hupah	Co
1	JR 6.1 Jenar	Rp4,495,800.00	680	Rp250,000.00	680	Rp3,227,144,000.00
2	JR 6.2 Wojo	Rp4,495,800.00	248	Rp250,000.00	248	Rp1,176,958,400.00
3	JR 6.3 Wates	Rp4,495,800.00	553	Rp250,000.00	553	Rp2,624,427,400.00
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp4,495,800.00	404	Rp250,000.00	404	Rp1,917,303,200.00
5	JR 6.5 Brambanan	Rp4,495,800.00	516	Rp250,000.00	516	Rp2,448,832,800.00
6	JR 6.6 Klaten	Rp4,495,800.00	165	Rp250,000.00	165	Rp783,057,000.00
7	JR 6.7 Delanggu	Rp4,495,800.00	346	Rp250,000.00	346	Rp1,642,046,800.00
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp4,495,800.00	38	Rp250,000.00	38	Rp180,340,400.00
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp4,495,800.00	0	Rp250,000.00	0	Rp-
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp4,495,800.00	99	Rp250,000.00	99	Rp469,834,200.00
11	JR 6.11 Palur	Rp4,495,800.00	276	Rp250,000.00	276	Rp1,309,840,800.00
12	JR 6.12 Sragen	Rp4,495,800.00	661	Rp250,000.00	661	Rp3,136,973,800.00
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp4,495,800.00	617	Rp250,000.00	617	Rp2,928,158,600.00
Total						Rp21,844,917,400.00

Tabel L-1. 4 Perhitungan Harga Satuan Alat dan Bahan Pengencangan Baut/penambat

No	Alat atau bahan	Harga	Harga per kegiatan
1	*Torque wrench*	Rp1,500,000.00	Rp15,000.00
2	*socket set*	Rp300,000.00	Rp3,000.00
3	Pelumnas anti karat	Rp60,000.00	Rp60,000.00
Total			Rp78,000.00

Tabel L-1. 5 Perhitungan Harga Satuan Alat dan Bahan Perbaikan Lebar Sepur/*Regauging*

No	Alat atau bahan	Harga	Harga per kegiatan
1	Donkrak hidrolik 5 ton	Rp200,000.00	Rp2,000.00
2	Bor listrik	Rp450,000.00	Rp4,500.00
3	Bahan	Rp25,000.00	Rp25,000.00
Total			Rp31,500.00

Tabel L-1. 6 Perhitungan Harga Satuan Alat dan Bahan Perawatan Kimia

No	Alat atau bahan	Harga	Harga per kegiatan
1	Bahan Kimia 1 L	Rp300,000.00	Rp300,000.00
2	pressure sprayer	Rp250,000.00	Rp2,500.00
Total			Rp302,500.00

Tabel L-1. 7 Perhitungan Pemeliharaan Bantalan Kayu

No	Kegiatan	Frekuensi per tahun	Total Pekerja	Biaya Alat dan Bahan	Biaya	+ OH 10%	PPN 11%	Total Biaya/tahun
1	Pengencangan Baut	24	2	Rp78,000.00	Rp10,128,000.00	Rp11,140,800.00	Rp1,225,488.00	Rp12,366,288.00
2	Perawatan Kimia	2	4	Rp302,500.00	Rp1,981,000.00	Rp2,179,100.00	Rp239,701.00	Rp2,418,801.00
3	Regauging	6	2	Rp31,500.00	Rp2,253,000.00	Rp2,478,300.00	Rp272,613.00	Rp2,750,913.00
4	Inspeksi Visual	24	2	Rp-	Rp8,256,000.00	Rp9,081,600.00	Rp998,976.00	Rp10,080,576.00
Total per 30 batang								Rp27,616,578.00
Total per batang								Rp920,552.60

Tabel L-1. 8 Perhitungan Pemeliharaan Bantalan Sintetis

No	Kegiatan	Frekuensi per tahun	Total Pekerja	Biaya Alat dan Bahan	Biaya	+ OH 10%	PPN 11%	Total Biaya/tahun
1	Pengencangan Baut	24	2	Rp78,000.00	Rp10,128,000.00	Rp11,140,800.00	Rp1,225,488.00	Rp12,366,288.00

No	Kegiatan	Frekuensi per tahun	Total Pekerja	Biaya Alat dan Bahan	Biaya	+ OH 10%	PPN 11%	Total Biaya/tahun
2	Perawatan Kimia	0	4	Rp0	Rp0	Rp0	Rp0	Rp0
3	Regauging	2	2	Rp31,500.00	Rp751,000.00	Rp826,100.00	Rp90,871.00	Rp916,971.00
4	Inspeksi Visual	12	2	Rp-	Rp4,128,000.00	Rp4,540,800.00	Rp499,488.00	Rp5,040,288.00
Total per 30 batang								Rp18,323,547.00
Total per batang								Rp610,784.90

Tabel L-1. 9 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Kayu Per Batang

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
1	Rp920,552.60	11.30%	1	Rp827,091.28
2	Rp920,552.60	11.30%	2	Rp743,118.85
3	Rp920,552.60	11.30%	3	Rp667,671.93
4	Rp920,552.60	11.30%	4	Rp599,884.93
5	Rp920,552.60	11.30%	5	Rp538,980.17
6	Rp920,552.60	11.30%	6	Rp484,258.91
7	Rp920,552.60	11.30%	7	Rp435,093.36
8	Rp920,552.60	11.30%	8	Rp390,919.46
9	Rp920,552.60	11.30%	9	Rp351,230.43
10	Rp920,552.60	11.30%	10	Rp315,570.91
11	Rp920,552.60	11.30%	11	Rp283,531.82
12	Rp920,552.60	11.30%	12	Rp254,745.57
13	Rp920,552.60	11.30%	13	Rp228,881.91
14	Rp920,552.60	11.30%	14	Rp205,644.13
15	Rp920,552.60	11.30%	15	Rp184,765.61
16	Rp920,552.60	11.30%	16	Rp166,006.84
17	Rp920,552.60	11.30%	17	Rp149,152.60
18	Rp920,552.60	11.30%	18	Rp134,009.52
19	Rp920,552.60	11.30%	19	Rp120,403.88
20	Rp920,552.60	11.30%	20	Rp108,179.59
21	Rp920,552.60	11.30%	21	Rp97,196.40
22	Rp920,552.60	11.30%	22	Rp87,328.30
23	Rp920,552.60	11.30%	23	Rp78,462.08
24	Rp920,552.60	11.30%	24	Rp70,496.03
25	Rp920,552.60	11.30%	25	Rp63,338.75
26	Rp920,552.60	11.30%	26	Rp56,908.13

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
27	Rp920,552.60	11.30%	27	Rp51,130.40
28	Rp920,552.60	11.30%	28	Rp45,939.26
29	Rp920,552.60	11.30%	29	Rp41,275.17
30	Rp920,552.60	11.30%	30	Rp37,084.61
31	Rp920,552.60	11.30%	31	Rp33,319.50
32	Rp920,552.60	11.30%	32	Rp29,936.66
33	Rp920,552.60	11.30%	33	Rp26,897.27
34	Rp920,552.60	11.30%	34	Rp24,166.46
35	Rp920,552.60	11.30%	35	Rp21,712.90
36	Rp920,552.60	11.30%	36	Rp19,508.45
37	Rp920,552.60	11.30%	37	Rp17,527.80
38	Rp920,552.60	11.30%	38	Rp15,748.25
39	Rp920,552.60	11.30%	39	Rp14,149.37
40	Rp920,552.60	11.30%	40	Rp12,712.82
41	Rp920,552.60	11.30%	41	Rp11,422.12
42	Rp920,552.60	11.30%	42	Rp10,262.47
43	Rp920,552.60	11.30%	43	Rp9,220.54
44	Rp920,552.60	11.30%	44	Rp8,284.41
45	Rp920,552.60	11.30%	45	Rp7,443.31
46	Rp920,552.60	11.30%	46	Rp6,687.61
47	Rp920,552.60	11.30%	47	Rp6,008.64
48	Rp920,552.60	11.30%	48	Rp5,398.59
49	Rp920,552.60	11.30%	49	Rp4,850.49
50	Rp920,552.60	11.30%	50	Rp4,358.03
Total PV				Rp8,107,916.53

Tabel L-1. 10 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis Per Batang

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
1	Rp610,784.90	11.30%	1	Rp548,773.50
2	Rp610,784.90	11.30%	2	Rp493,057.95
3	Rp610,784.90	11.30%	3	Rp442,999.05
4	Rp610,784.90	11.30%	4	Rp398,022.51
5	Rp610,784.90	11.30%	5	Rp357,612.32
6	Rp610,784.90	11.30%	6	Rp321,304.87
7	Rp610,784.90	11.30%	7	Rp288,683.62
8	Rp610,784.90	11.30%	8	Rp259,374.32
9	Rp610,784.90	11.30%	9	Rp233,040.72
10	Rp610,784.90	11.30%	10	Rp209,380.70
11	Rp610,784.90	11.30%	11	Rp188,122.82
12	Rp610,784.90	11.30%	12	Rp169,023.20
13	Rp610,784.90	11.30%	13	Rp151,862.71
14	Rp610,784.90	11.30%	14	Rp136,444.49
15	Rp610,784.90	11.30%	15	Rp122,591.63
16	Rp610,784.90	11.30%	16	Rp110,145.22
17	Rp610,784.90	11.30%	17	Rp98,962.46
18	Rp610,784.90	11.30%	18	Rp88,915.06
19	Rp610,784.90	11.30%	19	Rp79,887.75
20	Rp610,784.90	11.30%	20	Rp71,776.95
21	Rp610,784.90	11.30%	21	Rp64,489.62
22	Rp610,784.90	11.30%	22	Rp57,942.16
23	Rp610,784.90	11.30%	23	Rp52,059.44
24	Rp610,784.90	11.30%	24	Rp46,773.98
25	Rp610,784.90	11.30%	25	Rp42,025.14
26	Rp610,784.90	11.30%	26	Rp37,758.44
27	Rp610,784.90	11.30%	27	Rp33,924.92
28	Rp610,784.90	11.30%	28	Rp30,480.61

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
29	Rp610,784.90	11.30%	29	Rp27,386.00
30	Rp610,784.90	11.30%	30	Rp24,605.57
31	Rp610,784.90	11.30%	31	Rp22,107.43
32	Rp610,784.90	11.30%	32	Rp19,862.92
33	Rp610,784.90	11.30%	33	Rp17,846.29
34	Rp610,784.90	11.30%	34	Rp16,034.40
35	Rp610,784.90	11.30%	35	Rp14,406.47
36	Rp610,784.90	11.30%	36	Rp12,943.82
37	Rp610,784.90	11.30%	37	Rp11,629.67
38	Rp610,784.90	11.30%	38	Rp10,448.94
39	Rp610,784.90	11.30%	39	Rp9,388.08
40	Rp610,784.90	11.30%	40	Rp8,434.93
41	Rp610,784.90	11.30%	41	Rp7,578.56
42	Rp610,784.90	11.30%	42	Rp6,809.13
43	Rp610,784.90	11.30%	43	Rp6,117.81
44	Rp610,784.90	11.30%	44	Rp5,496.69
45	Rp610,784.90	11.30%	45	Rp4,938.62
46	Rp610,784.90	11.30%	46	Rp4,437.22
47	Rp610,784.90	11.30%	47	Rp3,986.72
48	Rp610,784.90	11.30%	48	Rp3,581.96
49	Rp610,784.90	11.30%	49	Rp3,218.29
50	Rp610,784.90	11.30%	50	Rp2,891.55
Total PV				Rp5,379,587.21

Tabel L-1. 11 Perhitungan PV Bantalan Kayu Lokasi JR 6.1 Jenar

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp195,300,000.00	11.30%	Rp66,950,002.87
2	20	Rp195,300,000.00	11.30%	Rp22,950,859.62
3	30	Rp195,300,000.00	11.30%	Rp7,867,691.33
4	40	Rp195,300,000.00	11.30%	Rp2,697,091.44
Total				Rp100,465,645.25

Tabel L-1. 12 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.2 Wojo

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,814,120,000.00	11.30%	Rp621,891,137.74
2	20	Rp1,814,120,000.00	11.30%	Rp213,187,984.91
3	30	Rp1,814,120,000.00	11.30%	Rp73,082,110.60
4	40	Rp1,814,120,000.00	11.30%	Rp25,052,982.66
Total				Rp933,214,215.92

Tabel L-1. 13 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.3 Wates

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp792,050,000.00	11.30%	Rp271,519,456.07
2	20	Rp792,050,000.00	11.30%	Rp93,078,486.24
3	30	Rp792,050,000.00	11.30%	Rp31,907,859.30
4	40	Rp792,050,000.00	11.30%	Rp10,938,204.15
Total				Rp407,444,005.75

Tabel L-1. 14 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.4 Yogyakarta

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp82,460,000.00	11.30%	Rp28,267,778.99
2	20	Rp82,460,000.00	11.30%	Rp9,690,362.95

No	t	Ct	i	PV
3	30	Rp82,460,000.00	11.30%	Rp3,321,914.12
4	40	Rp82,460,000.00	11.30%	Rp1,138,771.94
Total				Rp42,418,828.00

Tabel L-1. 15 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.5 Brambanan

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp624,960,000.00	11.30%	Rp214,240,009.17
2	20	Rp624,960,000.00	11.30%	Rp73,442,750.78
3	30	Rp624,960,000.00	11.30%	Rp25,176,612.27
4	40	Rp624,960,000.00	11.30%	Rp8,630,692.59
Total				Rp321,490,064.81

Tabel L-1. 16 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.6 Klaten

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp677,040,000.00	11.30%	Rp232,093,343.27
2	20	Rp677,040,000.00	11.30%	Rp79,562,980.02
3	30	Rp677,040,000.00	11.30%	Rp27,274,663.29
4	40	Rp677,040,000.00	11.30%	Rp9,349,916.98
Total				Rp348,280,903.55

Tabel L-1. 17 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.7 Delanggu

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp180,110,000.00	11.30%	Rp61,742,780.42
2	20	Rp180,110,000.00	11.30%	Rp21,165,792.76
3	30	Rp180,110,000.00	11.30%	Rp7,255,759.78
4	40	Rp180,110,000.00	11.30%	Rp2,487,317.66
Total				Rp92,651,650.62

Tabel L-1. 18 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.8 Solo Balapan

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp65,100,000.00	11.30%	Rp22,316,667.62
2	20	Rp65,100,000.00	11.30%	Rp7,650,286.54
3	30	Rp65,100,000.00	11.30%	Rp2,622,563.78
4	40	Rp65,100,000.00	11.30%	Rp899,030.48
Total				Rp33,796,741.42

Tabel L-1. 19 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.9 Wonogiri

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,894,410,000.00	11.30%	Rp649,415,027.80
2	20	Rp1,894,410,000.00	11.30%	Rp222,623,338.31
3	30	Rp1,894,410,000.00	11.30%	Rp76,316,605.93
4	40	Rp1,894,410,000.00	11.30%	Rp26,161,786.92
Total				Rp974,516,758.97

Tabel L-1. 20 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp219,170,000.00	11.30%	Rp75,132,780.99
2	20	Rp219,170,000.00	11.30%	Rp25,755,964.68
3	30	Rp219,170,000.00	11.30%	Rp8,829,298.05
4	40	Rp219,170,000.00	11.30%	Rp3,026,735.94
Total				Rp112,744,779.67

Tabel L-1. 21 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.11 Palur

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,783,740,000.00	11.30%	Rp611,476,692.84

No	t	Ct	i	PV
2	20	Rp1,783,740,000.00	11.30%	Rp209,617,851.20
3	30	Rp1,783,740,000.00	11.30%	Rp71,858,247.51
4	40	Rp1,783,740,000.00	11.30%	Rp24,633,435.11
Total				Rp917,586,226.66

Tabel L-1. 22 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.12 Sragen

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp56,420,000.00	11.30%	Rp19,341,111.94
2	20	Rp56,420,000.00	11.30%	Rp6,630,248.33
3	30	Rp56,420,000.00	11.30%	Rp2,272,888.61
4	40	Rp56,420,000.00	11.30%	Rp779,159.75
Total				Rp29,023,408.63

Tabel L-1. 23 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.13 Kebonromo dan Total PV Keseluruhan

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp718,270,000.00	11.30%	Rp246,227,232.76
2	20	Rp718,270,000.00	11.30%	Rp84,408,161.49
3	30	Rp718,270,000.00	11.30%	Rp28,935,620.35
4	40	Rp718,270,000.00	11.30%	Rp9,919,302.95
Total				Rp369,490,317.55
Total PV Keseluruhan				Rp4,682,815,353.81

Tabel L-1. 24 Perhitungan LCC Bantalan Kayu

No	Lokasi	Co	PV Penggantian	PV Pemeliharaan	LCC
1	JR 6.1 Jenar	Rp100,465,645.25	Rp729,712,487.97	Rp1,025,478,133.22	Rp1,025,478,133.22
2	JR 6.2 Wojo	Rp933,214,215.92	Rp6,778,218,221.57	Rp9,525,552,437.49	Rp9,525,552,437.49
3	JR 6.3 Wates	Rp407,444,005.75	Rp2,959,389,534.54	Rp4,158,883,540.29	Rp4,158,883,540.29
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp42,418,828.00	Rp308,100,828.25	Rp432,979,656.25	Rp432,979,656.25
5	JR 6.5 Brambanan	Rp321,490,064.81	Rp2,335,079,961.50	Rp3,281,530,026.31	Rp3,281,530,026.31
6	JR 6.6 Klaten	Rp348,280,903.55	Rp2,529,669,958.29	Rp3,554,990,861.84	Rp3,554,990,861.84
7	JR 6.7 Delanggu	Rp92,651,650.62	Rp672,957,072.24	Rp945,718,722.86	Rp945,718,722.86
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp33,488,548.42	Rp243,237,495.99	Rp341,826,044.41	Rp341,826,044.41
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp974,516,758.97	Rp7,078,211,133.29	Rp9,947,137,892.26	Rp9,947,137,892.26
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp112,744,779.67	Rp818,899,569.83	Rp1,150,814,349.51	Rp1,150,814,349.51
11	JR 6.11 Palur	Rp917,586,226.66	Rp6,664,707,390.11	Rp9,366,033,616.77	Rp9,366,033,616.77
12	JR 6.12 Sragen	Rp29,023,408.63	Rp210,805,829.86	Rp296,249,238.49	Rp296,249,238.49
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp369,490,317.55	Rp2,683,720,372.42	Rp3,771,480,689.96	Rp3,771,480,689.96
Total		Rp9,103,150,000.00	Rp4,682,815,353.81	Rp34,012,709,855.86	Rp47,798,675,209.67
Total per batang		Rp2,170,000.00	Rp1,116,284.95	Rp8,107,916.53	Rp11,394,201.48

Tabel L-1. 25 Perhitungan LCC Bantalan Sintetis

No	Lokasi	Co	PV Penggantian	PV Pemeliharaan	LCC
1	JR 6.1 Jenar	Rp3,227,144,000.00	Rp0	Rp3,658,119,299.63	Rp6,885,263,299.63
2	JR 6.2 Wojo	Rp1,176,958,400.00	Rp0	Rp1,334,137,626.93	Rp2,511,096,026.93
3	JR 6.3 Wates	Rp2,624,427,400.00	Rp0	Rp2,974,911,724.56	Rp5,599,339,124.56
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp1,917,303,200.00	Rp0	Rp2,173,353,230.96	Rp4,090,656,430.96
5	JR 6.5 Brambanan	Rp2,448,832,800.00	Rp0	Rp2,775,866,997.96	Rp5,224,699,797.96
6	JR 6.6 Klaten	Rp783,057,000.00	Rp0	Rp887,631,888.88	Rp1,670,688,888.88
7	JR 6.7 Delanggu	Rp1,642,046,800.00	Rp0	Rp1,861,337,173.05	Rp3,503,383,973.05
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp180,340,400.00	Rp0	Rp204,424,313.80	Rp384,764,713.80
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp0	Rp0	Rp0	Rp0
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp469,834,200.00	Rp0	Rp532,579,133.33	Rp1,002,413,333.33
11	JR 6.11 Palur	Rp1,309,840,800.00	Rp0	Rp1,484,766,068.67	Rp2,794,606,868.67
12	JR 6.12 Sragen	Rp3,136,973,800.00	Rp0	Rp3,555,907,142.73	Rp6,692,880,942.73
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp2,928,158,600.00	Rp0	Rp3,319,205,305.70	Rp6,247,363,905.70
Total		Rp21,844,917,400.00	Rp0	Rp24,762,239,906.20	Rp46,607,157,306.20
Total per batang		Rp4,745,800.00	Rp0	Rp5,379,587.21	Rp10,125,387.21

Tabel L-1. 26 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Kayu Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
1	Rp920,552.60	9.00%	1	Rp844,543.67
2	Rp920,552.60	9.00%	2	Rp774,810.71
3	Rp920,552.60	9.00%	3	Rp710,835.51
4	Rp920,552.60	9.00%	4	Rp652,142.67
5	Rp920,552.60	9.00%	5	Rp598,296.03
6	Rp920,552.60	9.00%	6	Rp548,895.44
7	Rp920,552.60	9.00%	7	Rp503,573.80
8	Rp920,552.60	9.00%	8	Rp461,994.31
9	Rp920,552.60	9.00%	9	Rp423,847.99
10	Rp920,552.60	9.00%	10	Rp388,851.37
11	Rp920,552.60	9.00%	11	Rp356,744.37
12	Rp920,552.60	9.00%	12	Rp327,288.42
13	Rp920,552.60	9.00%	13	Rp300,264.60
14	Rp920,552.60	9.00%	14	Rp275,472.11
15	Rp920,552.60	9.00%	15	Rp252,726.71
16	Rp920,552.60	9.00%	16	Rp231,859.36
17	Rp920,552.60	9.00%	17	Rp212,715.01
18	Rp920,552.60	9.00%	18	Rp195,151.39
19	Rp920,552.60	9.00%	19	Rp179,037.97
20	Rp920,552.60	9.00%	20	Rp164,255.02
21	Rp920,552.60	9.00%	21	Rp150,692.68
22	Rp920,552.60	9.00%	22	Rp138,250.16
23	Rp920,552.60	9.00%	23	Rp126,835.01
24	Rp920,552.60	9.00%	24	Rp116,362.40
25	Rp920,552.60	9.00%	25	Rp106,754.49
26	Rp920,552.60	9.00%	26	Rp97,939.90
27	Rp920,552.60	9.00%	27	Rp89,853.12

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
28	Rp920,552.60	9.00%	28	Rp82,434.06
29	Rp920,552.60	9.00%	29	Rp75,627.57
30	Rp920,552.60	9.00%	30	Rp69,383.10
31	Rp920,552.60	9.00%	31	Rp63,654.22
32	Rp920,552.60	9.00%	32	Rp58,398.36
33	Rp920,552.60	9.00%	33	Rp53,576.48
34	Rp920,552.60	9.00%	34	Rp49,152.73
35	Rp920,552.60	9.00%	35	Rp45,094.25
36	Rp920,552.60	9.00%	36	Rp41,370.87
37	Rp920,552.60	9.00%	37	Rp37,954.93
38	Rp920,552.60	9.00%	38	Rp34,821.04
39	Rp920,552.60	9.00%	39	Rp31,945.90
40	Rp920,552.60	9.00%	40	Rp29,308.17
41	Rp920,552.60	9.00%	41	Rp26,888.23
42	Rp920,552.60	9.00%	42	Rp24,668.10
43	Rp920,552.60	9.00%	43	Rp22,631.28
44	Rp920,552.60	9.00%	44	Rp20,762.65
45	Rp920,552.60	9.00%	45	Rp19,048.30
46	Rp920,552.60	9.00%	46	Rp17,475.50
47	Rp920,552.60	9.00%	47	Rp16,032.57
48	Rp920,552.60	9.00%	48	Rp14,708.78
49	Rp920,552.60	9.00%	49	Rp13,494.30
50	Rp920,552.60	9.00%	50	Rp12,380.09
Total PV				Rp10,090,805.70

Tabel L-1. 27 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
1	Rp610,784.90	9.00%	1	Rp560,353.12
2	Rp610,784.90	9.00%	2	Rp514,085.43
3	Rp610,784.90	9.00%	3	Rp471,638.01
4	Rp610,784.90	9.00%	4	Rp432,695.42
5	Rp610,784.90	9.00%	5	Rp396,968.28
6	Rp610,784.90	9.00%	6	Rp364,191.08
7	Rp610,784.90	9.00%	7	Rp334,120.26
8	Rp610,784.90	9.00%	8	Rp306,532.35
9	Rp610,784.90	9.00%	9	Rp281,222.34
10	Rp610,784.90	9.00%	10	Rp258,002.14
11	Rp610,784.90	9.00%	11	Rp236,699.21
12	Rp610,784.90	9.00%	12	Rp217,155.24
13	Rp610,784.90	9.00%	13	Rp199,224.99
14	Rp610,784.90	9.00%	14	Rp182,775.22
15	Rp610,784.90	9.00%	15	Rp167,683.69
16	Rp610,784.90	9.00%	16	Rp153,838.25
17	Rp610,784.90	9.00%	17	Rp141,136.01
18	Rp610,784.90	9.00%	18	Rp129,482.58
19	Rp610,784.90	9.00%	19	Rp118,791.35
20	Rp610,784.90	9.00%	20	Rp108,982.89
21	Rp610,784.90	9.00%	21	Rp99,984.31
22	Rp610,784.90	9.00%	22	Rp91,728.72
23	Rp610,784.90	9.00%	23	Rp84,154.79
24	Rp610,784.90	9.00%	24	Rp77,206.23
25	Rp610,784.90	9.00%	25	Rp70,831.40
26	Rp610,784.90	9.00%	26	Rp64,982.94
27	Rp610,784.90	9.00%	27	Rp59,617.37

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
28	Rp610,784.90	9.00%	28	Rp54,694.84
29	Rp610,784.90	9.00%	29	Rp50,178.75
30	Rp610,784.90	9.00%	30	Rp46,035.55
31	Rp610,784.90	9.00%	31	Rp42,234.45
32	Rp610,784.90	9.00%	32	Rp38,747.20
33	Rp610,784.90	9.00%	33	Rp35,547.89
34	Rp610,784.90	9.00%	34	Rp32,612.75
35	Rp610,784.90	9.00%	35	Rp29,919.95
36	Rp610,784.90	9.00%	36	Rp27,449.50
37	Rp610,784.90	9.00%	37	Rp25,183.02
38	Rp610,784.90	9.00%	38	Rp23,103.69
39	Rp610,784.90	9.00%	39	Rp21,196.05
40	Rp610,784.90	9.00%	40	Rp19,445.91
41	Rp610,784.90	9.00%	41	Rp17,840.29
42	Rp610,784.90	9.00%	42	Rp16,367.24
43	Rp610,784.90	9.00%	43	Rp15,015.81
44	Rp610,784.90	9.00%	44	Rp13,775.98
45	Rp610,784.90	9.00%	45	Rp12,638.51
46	Rp610,784.90	9.00%	46	Rp11,594.96
47	Rp610,784.90	9.00%	47	Rp10,637.58
48	Rp610,784.90	9.00%	48	Rp9,759.25
49	Rp610,784.90	9.00%	49	Rp8,953.44
50	Rp610,784.90	9.00%	50	Rp8,214.16
Total PV				Rp6,695,230.39

Tabel L-1. 28 Perhitungan PV Bantalan Kayu Lokasi JR 6.1 Jenar dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp195,300,000.00	9.00%	Rp82,496,830.59

No	t	Ct	i	PV
2	20	Rp195,300,000.00	9.00%	Rp34,847,552.77
3	30	Rp195,300,000.00	9.00%	Rp14,719,982.89
4	40	Rp195,300,000.00	9.00%	Rp6,217,879.85
Total				Rp138,282,246.10

Tabel L-1. 29 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.2 Wojo dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,814,120,000.00	9.00%	Rp766,303,893.01
2	20	Rp1,814,120,000.00	9.00%	Rp323,695,045.77
3	30	Rp1,814,120,000.00	9.00%	Rp136,732,285.47
4	40	Rp1,814,120,000.00	9.00%	Rp57,757,195.04
Total				Rp1,284,488,419.29

Tabel L-1. 30 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.3 Wates dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp792,050,000.00	9.00%	Rp334,570,479.60
2	20	Rp792,050,000.00	9.00%	Rp141,326,186.25
3	30	Rp792,050,000.00	9.00%	Rp59,697,708.37
4	40	Rp792,050,000.00	9.00%	Rp25,216,957.16
Total				Rp560,811,331.39

Tabel L-1. 31 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.4 Yogyakarta dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp82,460,000.00	9.00%	Rp34,831,995.14
2	20	Rp82,460,000.00	9.00%	Rp14,713,411.17
3	30	Rp82,460,000.00	9.00%	Rp6,215,103.89
4	40	Rp82,460,000.00	9.00%	Rp2,625,327.05

Total	Rp58,385,837.24

Tabel L-1. 32 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.5 Brambanan dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp624,960,000.00	9.00%	Rp263,989,857.88
2	20	Rp624,960,000.00	9.00%	Rp111,512,168.88
3	30	Rp624,960,000.00	9.00%	Rp47,103,945.23
4	40	Rp624,960,000.00	9.00%	Rp19,897,215.51
Total				Rp442,503,187.50

Tabel L-1. 33 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.6 Klaten dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp677,040,000.00	9.00%	Rp285,989,012.70
2	20	Rp677,040,000.00	9.00%	Rp120,804,849.62
3	30	Rp677,040,000.00	9.00%	Rp51,029,274.00
4	40	Rp677,040,000.00	9.00%	Rp21,555,316.81
Total				Rp479,378,453.13

Tabel L-1. 34 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.7 Delanggu dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp180,110,000.00	9.00%	Rp76,080,410.43
2	20	Rp180,110,000.00	9.00%	Rp32,137,187.56
3	30	Rp180,110,000.00	9.00%	Rp13,575,095.33
4	40	Rp180,110,000.00	9.00%	Rp5,734,266.97
Total				Rp127,526,960.29

Tabel L-1. 35 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.8 Solo Balapan dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp65,100,000.00	9.00%	Rp27,498,943.53
2	20	Rp65,100,000.00	9.00%	Rp11,615,850.92
3	30	Rp65,100,000.00	9.00%	Rp4,906,660.96
4	40	Rp65,100,000.00	9.00%	Rp2,072,626.62
Total				Rp46,094,082.03

Tabel L-1. 36 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.9 Wonogiri dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,894,410,000.00	9.00%	Rp800,219,256.69
2	20	Rp1,894,410,000.00	9.00%	Rp338,021,261.91
3	30	Rp1,894,410,000.00	9.00%	Rp142,783,833.99
4	40	Rp1,894,410,000.00	9.00%	Rp60,313,434.53
Total				Rp1,341,337,787.12

Tabel L-1. 37 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp219,170,000.00	9.00%	Rp92,579,776.55
2	20	Rp219,170,000.00	9.00%	Rp39,106,698.11
3	30	Rp219,170,000.00	9.00%	Rp16,519,091.91
4	40	Rp219,170,000.00	9.00%	Rp6,977,842.94
Total				Rp155,183,409.51

Tabel L-1. 38 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.11 Palur dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,783,740,000.00	9.00%	Rp753,471,052.69

No	t	Ct	i	PV
2	20	Rp1,783,740,000.00	9.00%	Rp318,274,315.34
3	30	Rp1,783,740,000.00	9.00%	Rp134,442,510.36
4	40	Rp1,783,740,000.00	9.00%	Rp56,789,969.28
Total				Rp1,262,977,847.67

Tabel L-1. 39 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.12 Sragen dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp56,420,000.00	9.00%	Rp23,832,417.73
2	20	Rp56,420,000.00	9.00%	Rp10,067,070.80
3	30	Rp56,420,000.00	9.00%	Rp4,252,439.50
4	40	Rp56,420,000.00	9.00%	Rp1,796,276.40
Total				Rp61,563,023.81

Tabel L-1. 40 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.13 Kebonromo dan Total PV Keseluruhan dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp718,270,000.00	9.00%	Rp303,405,010.27
2	20	Rp718,270,000.00	9.00%	Rp128,161,555.20
3	30	Rp718,270,000.00	9.00%	Rp54,136,825.95
4	40	Rp718,270,000.00	9.00%	Rp22,867,980.33
Total				Rp518,231,053.77
Total PV Keseluruhan				Rp6,455,907,586.03

Tabel L-1. 41 Perhitungan LCC Bantalan Kayu dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	Lokasi	Co	PV Penggantian	PV Pemeliharaan	LCC
1	JR 6.1 Jenar	Rp195,300,000.00	Rp138,282,246.10	Rp908,172,512.56	Rp1,241,754,758.66
2	JR 6.2 Wojo	Rp1,814,120,000.00	Rp1,284,488,419.29	Rp8,435,913,561.16	Rp11,534,521,980.44
3	JR 6.3 Wates	Rp792,050,000.00	Rp560,811,331.39	Rp3,683,144,078.74	Rp5,036,005,410.12
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp82,460,000.00	Rp58,385,837.24	Rp383,450,616.42	Rp524,296,453.66
5	JR 6.5 Brambanan	Rp624,960,000.00	Rp442,503,187.50	Rp2,906,152,040.21	Rp3,973,615,227.71
6	JR 6.6 Klaten	Rp677,040,000.00	Rp479,378,453.13	Rp3,148,331,376.89	Rp4,304,749,830.02
7	JR 6.7 Delanggu	Rp180,110,000.00	Rp127,526,960.29	Rp837,536,872.70	Rp1,145,173,832.99
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp65,100,000.00	Rp46,094,082.03	Rp302,724,170.85	Rp413,918,252.89
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp1,894,410,000.00	Rp1,341,337,787.12	Rp8,809,273,371.88	Rp12,045,021,159.00
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp219,170,000.00	Rp155,183,409.51	Rp1,019,171,375.21	Rp1,393,524,784.72
11	JR 6.11 Palur	Rp1,783,740,000.00	Rp1,262,977,847.67	Rp8,294,642,281.43	Rp11,341,360,129.10
12	JR 6.12 Sragen	Rp56,420,000.00	Rp40,706,970.99	Rp262,360,948.07	Rp359,487,919.07
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp718,270,000.00	Rp518,231,053.77	Rp3,340,056,685.10	Rp4,576,557,738.87
Total		Rp9,103,150,000.00	Rp6,455,907,586.03	Rp42,330,929,891.22	Rp57,889,987,477.25
Total per batang		Rp2,170,000.00	Rp1,538,952.94	Rp10,090,805.70	Rp13,799,758.64

Tabel L-1. 42 Perhitungan LCC Bantalan Sintetis dengan Sensitivitas Diskonto 9%

No	Lokasi	Co	PV Penggantian	PV Pemeliharaan	LCC
1	JR 6.1 Jenar	Rp3,227,144,000.00	Rp0	Rp4,552,756,668.40	Rp7,779,900,668.40
2	JR 6.2 Wojo	Rp1,176,958,400.00	Rp0	Rp1,660,417,137.89	Rp2,837,375,537.89
3	JR 6.3 Wates	Rp2,624,427,400.00	Rp0	Rp3,702,462,408.27	Rp6,326,889,808.27
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp1,917,303,200.00	Rp0	Rp2,704,873,079.46	Rp4,622,176,279.46
5	JR 6.5 Brambanan	Rp2,448,832,800.00	Rp0	Rp3,454,738,883.67	Rp5,903,571,683.67
6	JR 6.6 Klaten	Rp783,057,000.00	Rp0	Rp1,104,713,015.13	Rp1,887,770,015.13
7	JR 6.7 Delanggu	Rp1,642,046,800.00	Rp0	Rp2,316,549,716.57	Rp3,958,596,516.57
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp180,340,400.00	Rp0	Rp254,418,755.00	Rp434,759,155.00
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp0	Rp0	Rp0	Rp0
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp469,834,200.00	Rp0	Rp662,827,809.08	Rp1,132,662,009.08
11	JR 6.11 Palur	Rp1,309,840,800.00	Rp0	Rp1,847,883,588.94	Rp3,157,724,388.94
12	JR 6.12 Sragen	Rp3,136,973,800.00	Rp0	Rp4,425,547,290.90	Rp7,562,521,090.90
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp2,928,158,600.00	Rp0	Rp4,130,957,153.53	Rp7,059,115,753.53
Total		Rp21,844,917,400.00	Rp0	Rp30,818,145,506.81	Rp52,663,062,906.81
Total per batang		Rp4,745,800.00	Rp0	Rp6,695,230.39	Rp11,441,030.39

Tabel L-1. 43 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Kayu Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
1	Rp920,552.60	14.00%	1	Rp807,502.28
2	Rp920,552.60	14.00%	2	Rp708,335.33
3	Rp920,552.60	14.00%	3	Rp621,346.78
4	Rp920,552.60	14.00%	4	Rp545,041.04
5	Rp920,552.60	14.00%	5	Rp478,106.17
6	Rp920,552.60	14.00%	6	Rp419,391.38
7	Rp920,552.60	14.00%	7	Rp367,887.18
8	Rp920,552.60	14.00%	8	Rp322,708.05
9	Rp920,552.60	14.00%	9	Rp283,077.24
10	Rp920,552.60	14.00%	10	Rp248,313.37
11	Rp920,552.60	14.00%	11	Rp217,818.74
12	Rp920,552.60	14.00%	12	Rp191,069.07
13	Rp920,552.60	14.00%	13	Rp167,604.45
14	Rp920,552.60	14.00%	14	Rp147,021.45
15	Rp920,552.60	14.00%	15	Rp128,966.18
16	Rp920,552.60	14.00%	16	Rp113,128.23
17	Rp920,552.60	14.00%	17	Rp99,235.29
18	Rp920,552.60	14.00%	18	Rp87,048.50
19	Rp920,552.60	14.00%	19	Rp76,358.33
20	Rp920,552.60	14.00%	20	Rp66,980.99
21	Rp920,552.60	14.00%	21	Rp58,755.26
22	Rp920,552.60	14.00%	22	Rp51,539.70
23	Rp920,552.60	14.00%	23	Rp45,210.26
24	Rp920,552.60	14.00%	24	Rp39,658.12
25	Rp920,552.60	14.00%	25	Rp34,787.83
26	Rp920,552.60	14.00%	26	Rp30,515.64
27	Rp920,552.60	14.00%	27	Rp26,768.10

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
28	Rp920,552.60	14.00%	28	Rp23,480.79
29	Rp920,552.60	14.00%	29	Rp20,597.19
30	Rp920,552.60	14.00%	30	Rp18,067.71
31	Rp920,552.60	14.00%	31	Rp15,848.87
32	Rp920,552.60	14.00%	32	Rp13,902.51
33	Rp920,552.60	14.00%	33	Rp12,195.19
34	Rp920,552.60	14.00%	34	Rp10,697.53
35	Rp920,552.60	14.00%	35	Rp9,383.80
36	Rp920,552.60	14.00%	36	Rp8,231.40
37	Rp920,552.60	14.00%	37	Rp7,220.53
38	Rp920,552.60	14.00%	38	Rp6,333.80
39	Rp920,552.60	14.00%	39	Rp5,555.96
40	Rp920,552.60	14.00%	40	Rp4,873.65
41	Rp920,552.60	14.00%	41	Rp4,275.13
42	Rp920,552.60	14.00%	42	Rp3,750.12
43	Rp920,552.60	14.00%	43	Rp3,289.58
44	Rp920,552.60	14.00%	44	Rp2,885.59
45	Rp920,552.60	14.00%	45	Rp2,531.22
46	Rp920,552.60	14.00%	46	Rp2,220.37
47	Rp920,552.60	14.00%	47	Rp1,947.69
48	Rp920,552.60	14.00%	48	Rp1,708.50
49	Rp920,552.60	14.00%	49	Rp1,498.69
50	Rp920,552.60	14.00%	50	Rp1,314.64
Total PV				Rp6,565,985.45

Tabel L-1. 44 Perhitungan PV Pemeliharaan Bantalan Sintetis Per Batang dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
1	Rp610,784.90	14.00%	1	Rp535,776.23
2	Rp610,784.90	14.00%	2	Rp469,979.15
3	Rp610,784.90	14.00%	3	Rp412,262.41
4	Rp610,784.90	14.00%	4	Rp361,633.69
5	Rp610,784.90	14.00%	5	Rp317,222.54
6	Rp610,784.90	14.00%	6	Rp278,265.38
7	Rp610,784.90	14.00%	7	Rp244,092.44
8	Rp610,784.90	14.00%	8	Rp214,116.18
9	Rp610,784.90	14.00%	9	Rp187,821.21
10	Rp610,784.90	14.00%	10	Rp164,755.45
11	Rp610,784.90	14.00%	11	Rp144,522.32
12	Rp610,784.90	14.00%	12	Rp126,773.97
13	Rp610,784.90	14.00%	13	Rp111,205.23
14	Rp610,784.90	14.00%	14	Rp97,548.45
15	Rp610,784.90	14.00%	15	Rp85,568.82
16	Rp610,784.90	14.00%	16	Rp75,060.36
17	Rp610,784.90	14.00%	17	Rp65,842.43
18	Rp610,784.90	14.00%	18	Rp57,756.51
19	Rp610,784.90	14.00%	19	Rp50,663.61
20	Rp610,784.90	14.00%	20	Rp44,441.76
21	Rp610,784.90	14.00%	21	Rp38,984.00
22	Rp610,784.90	14.00%	22	Rp34,196.49
23	Rp610,784.90	14.00%	23	Rp29,996.92
24	Rp610,784.90	14.00%	24	Rp26,313.09
25	Rp610,784.90	14.00%	25	Rp23,081.66
26	Rp610,784.90	14.00%	26	Rp20,247.07
27	Rp610,784.90	14.00%	27	Rp17,760.59

No	Biaya/tahun (c)	i	t	PVt
28	Rp610,784.90	14.00%	28	Rp15,579.46
29	Rp610,784.90	14.00%	29	Rp13,666.19
30	Rp610,784.90	14.00%	30	Rp11,987.89
31	Rp610,784.90	14.00%	31	Rp10,515.69
32	Rp610,784.90	14.00%	32	Rp9,224.29
33	Rp610,784.90	14.00%	33	Rp8,091.48
34	Rp610,784.90	14.00%	34	Rp7,097.79
35	Rp610,784.90	14.00%	35	Rp6,226.13
36	Rp610,784.90	14.00%	36	Rp5,461.52
37	Rp610,784.90	14.00%	37	Rp4,790.81
38	Rp610,784.90	14.00%	38	Rp4,202.46
39	Rp610,784.90	14.00%	39	Rp3,686.37
40	Rp610,784.90	14.00%	40	Rp3,233.66
41	Rp610,784.90	14.00%	41	Rp2,836.54
42	Rp610,784.90	14.00%	42	Rp2,488.20
43	Rp610,784.90	14.00%	43	Rp2,182.63
44	Rp610,784.90	14.00%	44	Rp1,914.59
45	Rp610,784.90	14.00%	45	Rp1,679.46
46	Rp610,784.90	14.00%	46	Rp1,473.21
47	Rp610,784.90	14.00%	47	Rp1,292.29
48	Rp610,784.90	14.00%	48	Rp1,133.59
49	Rp610,784.90	14.00%	49	Rp994.38
50	Rp610,784.90	14.00%	50	Rp872.26
Total PV				Rp4,356,518.86

Tabel L-1. 45 Perhitungan PV Bantalan Kayu Lokasi JR 6.1 Jenar dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp195,300,000.00	14.00%	Rp52,680,966.00

No	t	Ct	i	PV
2	20	Rp195,300,000.00	14.00%	Rp14,210,364.46
3	30	Rp195,300,000.00	14.00%	Rp3,833,157.84
4	40	Rp195,300,000.00	14.00%	Rp1,033,970.60
Total				Rp94,125,672.43

Tabel L-1. 46 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.2 Wojo dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,814,120,000.00	14.00%	Rp489,347,639.72
2	20	Rp1,814,120,000.00	14.00%	Rp131,998,496.52
3	30	Rp1,814,120,000.00	14.00%	Rp35,605,777.30
4	40	Rp1,814,120,000.00	14.00%	Rp9,604,438.01
Total				Rp666,556,351.55

Tabel L-1. 47 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.3 Wates dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp792,050,000.00	14.00%	Rp213,650,584.33
2	20	Rp792,050,000.00	14.00%	Rp57,630,922.52
3	30	Rp792,050,000.00	14.00%	Rp15,545,584.59
4	40	Rp792,050,000.00	14.00%	Rp4,193,325.21
Total				Rp291,020,416.65

Tabel L-1. 48 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.4 Yogyakarta dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp82,460,000.00	14.00%	Rp22,243,074.53
2	20	Rp82,460,000.00	14.00%	Rp5,999,931.66
3	30	Rp82,460,000.00	14.00%	Rp1,618,444.42
4	40	Rp82,460,000.00	14.00%	Rp436,565.36

Total	Rp30,298,015.98

Tabel L-1. 49 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.5 Brambanan dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp624,960,000.00	14.00%	Rp168,579,091.20
2	20	Rp624,960,000.00	14.00%	Rp45,473,166.26
3	30	Rp624,960,000.00	14.00%	Rp12,266,105.10
4	40	Rp624,960,000.00	14.00%	Rp3,308,705.92
Total				Rp229,627,068.48

Tabel L-1. 50 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.6 Klaten dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp677,040,000.00	14.00%	Rp182,627,348.80
2	20	Rp677,040,000.00	14.00%	Rp49,262,596.79
3	30	Rp677,040,000.00	14.00%	Rp13,288,280.52
4	40	Rp677,040,000.00	14.00%	Rp3,584,431.41
Total				Rp248,762,657.52

Tabel L-1. 51 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.7 Delanggu dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp180,110,000.00	14.00%	Rp48,583,557.53
2	20	Rp180,110,000.00	14.00%	Rp13,105,113.89
3	30	Rp180,110,000.00	14.00%	Rp3,535,023.34
4	40	Rp180,110,000.00	14.00%	Rp953,550.66
Total				Rp66,177,245.43

Tabel L-1. 52 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.8 Solo Balapan dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp65,100,000.00	14.00%	Rp17,560,322.00
2	20	Rp65,100,000.00	14.00%	Rp4,736,788.15
3	30	Rp65,100,000.00	14.00%	Rp1,277,719.28
4	40	Rp65,100,000.00	14.00%	Rp344,656.87
Total				Rp23,919,486.30

Tabel L-1. 53 Perhitungan PV Bantalan Kayu di JR 6.9 Wonogiri dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,894,410,000.00	14.00%	Rp511,005,370.19
2	20	Rp1,894,410,000.00	14.00%	Rp137,840,535.24
3	30	Rp1,894,410,000.00	14.00%	Rp37,181,631.08
4	40	Rp1,894,410,000.00	14.00%	Rp10,029,514.81
Total				Rp696,057,051.32

Tabel L-1. 54 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.10 Sumberlawang dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp219,170,000.00	14.00%	Rp59,119,750.73
2	20	Rp219,170,000.00	14.00%	Rp15,947,186.78
3	30	Rp219,170,000.00	14.00%	Rp4,301,654.91
4	40	Rp219,170,000.00	14.00%	Rp1,160,344.78
Total				Rp80,528,937.21

Tabel L-1. 55 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.11 Palur dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp1,783,740,000.00	14.00%	Rp481,152,822.79

No	t	Ct	i	PV
2	20	Rp1,783,740,000.00	14.00%	Rp129,787,995.38
3	30	Rp1,783,740,000.00	14.00%	Rp35,009,508.30
4	40	Rp1,783,740,000.00	14.00%	Rp9,443,598.14
Total				Rp655,393,924.61

Tabel L-1. 56 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.12 Sragen dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp56,420,000.00	14.00%	Rp15,218,945.73
2	20	Rp56,420,000.00	14.00%	Rp4,105,216.40
3	30	Rp56,420,000.00	14.00%	Rp1,107,356.71
4	40	Rp56,420,000.00	14.00%	Rp298,702.62
Total				Rp20,730,221.46

Tabel L-1. 57 Perhitungan PV Bantalan Kayu di Lokasi JR 6.13 Kebonromo dan Total PV Keseluruhan dengan Sensitivitas Diskonto 11.86%

No	t	Ct	i	PV
1	10	Rp718,270,000.00	14.00%	Rp193,748,886.06
2	20	Rp718,270,000.00	14.00%	Rp52,262,562.62
3	30	Rp718,270,000.00	14.00%	Rp14,097,502.74
4	40	Rp718,270,000.00	14.00%	Rp3,802,714.09
Total				Rp263,911,665.51
Total PV Keseluruhan				Rp3,344,741,500.92

Tabel L-1. 58 Perhitungan LCC Bantalan Kayu dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	Lokasi	Co	PV Penggantian	PV Pemeliharaan	LCC
1	JR 6.1 Jenar	Rp195,300,000.00	Rp71,758,458.90	Rp590,938,690.13	Rp857,997,149.03
2	JR 6.2 Wojo	Rp1,814,120,000.00	Rp666,556,351.55	Rp5,489,163,832.75	Rp7,969,840,184.30
3	JR 6.3 Wates	Rp792,050,000.00	Rp291,020,416.65	Rp2,396,584,687.74	Rp3,479,655,104.39
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp82,460,000.00	Rp30,298,015.98	Rp249,507,446.94	Rp362,265,462.92
5	JR 6.5 Brambanan	Rp624,960,000.00	Rp229,627,068.48	Rp1,891,003,808.41	Rp2,745,590,876.89
6	JR 6.6 Klaten	Rp677,040,000.00	Rp248,762,657.52	Rp2,048,587,459.11	Rp2,974,390,116.63
7	JR 6.7 Delanggu	Rp180,110,000.00	Rp66,177,245.43	Rp544,976,792.01	Rp791,264,037.44
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp65,100,000.00	Rp23,919,486.30	Rp196,979,563.38	Rp285,999,049.68
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp1,894,410,000.00	Rp696,057,051.32	Rp5,732,105,294.25	Rp8,322,572,345.57
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp219,170,000.00	Rp80,528,937.21	Rp663,164,530.03	Rp962,863,467.24
11	JR 6.11 Palur	Rp1,783,740,000.00	Rp655,393,924.61	Rp5,397,240,036.51	Rp7,836,373,961.12
12	JR 6.12 Sragen	Rp56,420,000.00	Rp20,730,221.46	Rp170,715,621.59	Rp247,865,843.05
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp718,270,000.00	Rp263,911,665.51	Rp2,173,341,182.58	Rp3,155,522,848.09
Total		Rp9,103,150,000.00	Rp3,344,741,500.92	Rp27,544,308,945.43	Rp39,992,200,446.35
Total per batang		Rp2,170,000.00	Rp797,316.21	Rp6,565,985.45	Rp9,533,301.66

Tabel L-1. 59 Perhitungan LCC Bantalan Sintetis dengan Sensitivitas Diskonto 14%

No	Lokasi	Co	PV Penggantian	PV Pemeliharaan	LCC
1	JR 6.1 Jenar	Rp3,227,144,000.00	Rp0	Rp2,962,432,825.12	Rp6,189,576,825.12
2	JR 6.2 Wojo	Rp1,176,958,400.00	Rp0	Rp1,080,416,677.40	Rp2,257,375,077.40
3	JR 6.3 Wates	Rp2,624,427,400.00	Rp0	Rp2,409,154,929.84	Rp5,033,582,329.84
4	JR 6.4 Yogyakarta	Rp1,917,303,200.00	Rp0	Rp1,760,033,619.63	Rp3,677,336,819.63
5	JR 6.5 Brambanan	Rp2,448,832,800.00	Rp0	Rp2,247,963,732.00	Rp4,696,796,532.00
6	JR 6.6 Klaten	Rp783,057,000.00	Rp0	Rp718,825,611.98	Rp1,501,882,611.98
7	JR 6.7 Delanggu	Rp1,642,046,800.00	Rp0	Rp1,507,355,525.72	Rp3,149,402,325.72
8	JR 6.8 Solo Balapan	Rp180,340,400.00	Rp0	Rp165,547,716.70	Rp345,888,116.70
9	JR 6.9 Wonogiri	Rp0	Rp0	Rp0	Rp0
10	JR 6.10 Sumberlawang	Rp469,834,200.00	Rp0	Rp431,295,367.19	Rp901,129,567.19
11	JR 6.11 Palur	Rp1,309,840,800.00	Rp0	Rp1,202,399,205.49	Rp2,512,240,005.49
12	JR 6.12 Sragen	Rp3,136,973,800.00	Rp0	Rp2,879,658,966.77	Rp6,016,632,766.77
13	JR 6.13 Kebonromo	Rp2,928,158,600.00	Rp0	Rp4,130,957,153.53	Rp7,059,115,753.53
Total		Rp21,844,917,400.00	Rp0	Rp21,496,041,331.38	Rp43,340,958,731.38
Total per batang		Rp4,745,800.00	Rp0	Rp4,670,006.81	Rp9,415,806.81

Tabel L-1. 60 Lampiran Permintaan Data Penelitian

Judul: Analisis Life Cycle Cost antara Bantalan Rel Kayu dan Bantalan Sintetis pada Jalur Jembatan Rel R54 di DAOP 6 Yogyakarta			
A. Data Umum Jalan Rel			
No	Data yang Diminta	Satuan	Keterangan
1	Lokasi penelitian (KM)		
2	Panjang segmen		m
3	Jenis rel		
4	Kelas jalan rel		
5	Jenis bantalan		Kayu/Sintetis
B. Data Teknis Bantalan			
No	Data		Kayu/Sintetis
1	Dimensi		
2	Jumlah		
3	Tahun pemasangan		
4	Umur rencana		
5	Umur aktual		
C. Data Biaya			
No	Data	Nilai	Satuan
1	Harga satuan material		Rp/buah
2	Volume pekerjaan material		
3	Harga satuan pemasangan		Rp/buah
4	Volume satuan pemasangan		
5	Biaya pemeliharaan		Rp/tahun
6	Biaya penggantian		Rp/buah
7	Biaya Alat		Rp/alat