

BAB V

ANALISIS DAN PEMECAHAN MASALAH

A. Analisis

1. Kondisi Lengkung

Lengkung nomor 111.I, lengkung yang berlokasi pada jalur hilir di wilayah kerja Resor Jalan Rel 6.8 Solobalapan. Lengkung hilir nomor 111.I berlokasi lintas Purwosari-Gawok Km 112+698 – 112+991 dengan radius 800 meter dengan batas kecepatan maksimum sarana yang melintas adalah 115 Km/Jam. Secara keseluruhan, lengkung hilir nomor 111.I memiliki kondisi bantalan beton serta penambat yang cukup baik.

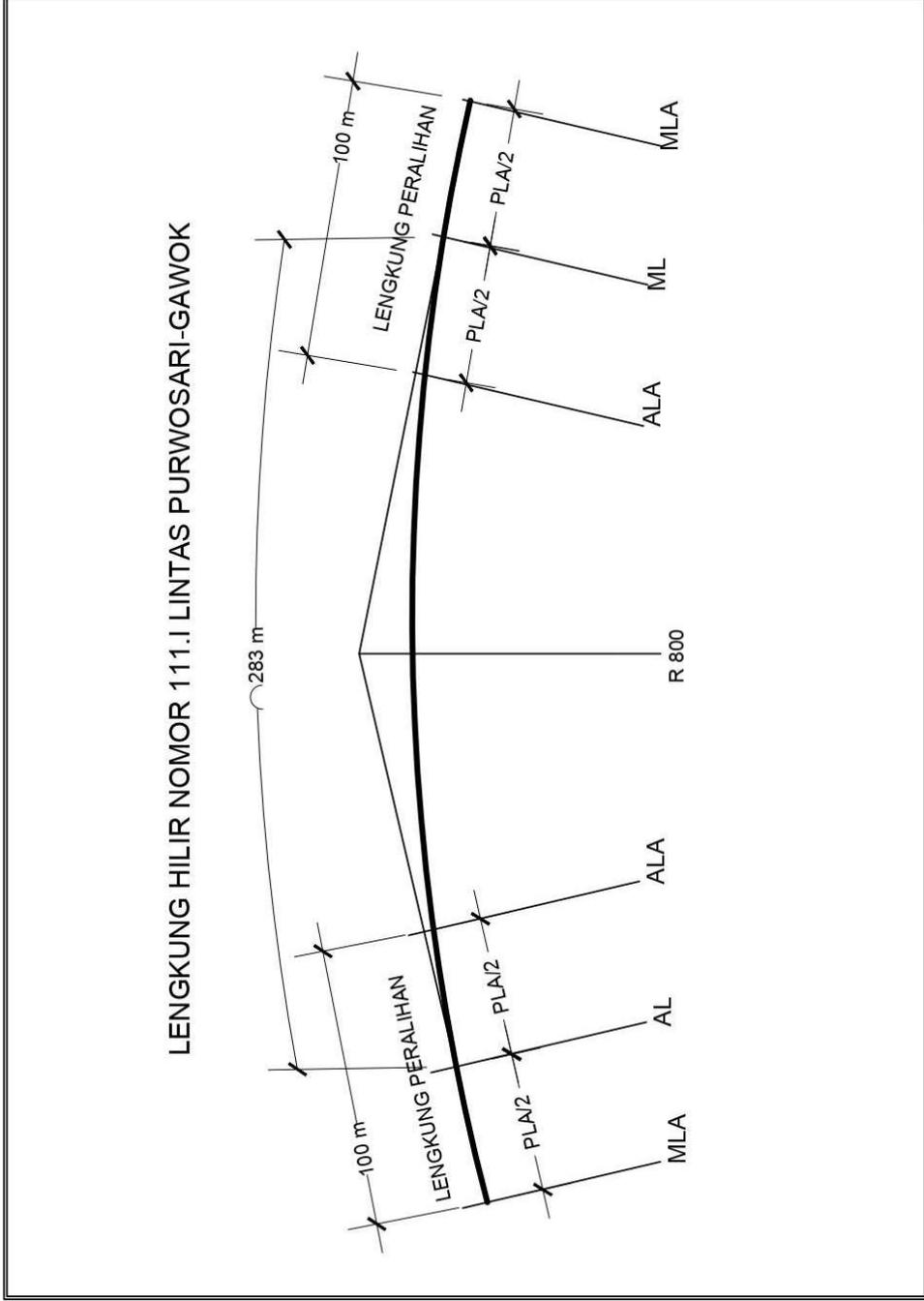
a. Spesifikasi Lengkung

Berikut merupakan spesifikasi lengkung hilir nomor 111.I Km 112+698 - 112+991 lintas Purwosari-Gawok:

Tabel V. 1 Spesifikasi Lengkung

Komponen		Register
Radius (m)		800
Lokasi Km/Hm	ML	112+698
	AL	112+991
Panjang Lengkung (PL) (m)		283
Kecepatan (V) (Km/Jam)		115
Pertinggian (H) (mm)		91
Panjang Lengkung Alih (PLA) (m)		100
Anak Panah (AP) (mm)		63
Lebar Jalur (mm)		1067
Sudut		21° 12' 22"
Arah Lengkung		KIRI

Sumber: Resor Jalan Rel 6.8 Solobalapan



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 1 Lengkung Nomor 111.I

Keterangan:

ML: Mulai Lengkung

AL: Akhir Lengkung

MLA: Mulai Lengkung Alih

ALA: Akhir Lengkung Alih

PLA: Panjang Lengkung Alih

R: Radius

Lengkung Hilir Nomor 111.I dimulai pada Km 112+698 (ML) sampai dengan Km 112+991 (AL). Panjang total lengkung hilir nomor 111.I adalah 383 meter dengan panjang lengkung alih 100 meter. Batas kecepatan maksimum sarana yang melintas pada lengkung nomor 111.I adalah 115 km/jam berdasarkan gapeka. Lengkung nomor 111.I memiliki radius sebesar 800 meter dan tergolong sebagai lengkung sedang.

b. Kualitas Jalan Rel

TQI (*Track Quality Index*) kualitas lintasan pada suatu jalur dapat diukur menggunakan kereta ukur yang menghasilkan menghasilkan nilai sebagai indikator untuk menilai kualitas jalan rel. Kualitas jalan rel akan semakin menurun apabila lalu lintas kereta api meningkat (Fikria Erdiana dan Zhafirah: 2023)

Tabel V. 2 TQI Berdasarkan Kelas Jalan

Kecepatan (Km/Jam)	Kelas Jalan	Very Good	Good	Fair	Poor	Very Poor
> 120 - 160	I	$TQI < 2.5$	$25 \geq TQI < 3.5$	$35 \geq TQI < 5.0$	$50 \geq TQI < 6.5$	$TQI \geq 6.5$
> 80 - 120	II	$TQI < 3.0$	$30 \geq TQI < 4.5$	$45 \geq TQI < 6.0$	$60 \geq TQI < 7.5$	$TQI \geq 7.5$
> 40 - 80	III	$TQI < 4.0$	$40 \geq TQI < 5.5$	$55 \geq TQI < 7.0$	$70 \geq TQI < 8.5$	$TQI \geq 8.5$
≤ 40	IV	$TQI < 4.0$	$40 \geq TQI < 5.5$	$55 \geq TQI < 7.0$	$70 \geq TQI < 8.5$	$TQI \geq 8.5$

Sumber: Resor Jalan Rel 6.8 Solobalapan

Tabel V. 3 Data TQI

Trip Ka Ukur	Dari (Km+Hm)	Ke (Km+Hm)	Total TQI	Resor	V_{maks} Gapeka (Km/Jam)	Jalur
PWS-YK	112+ 651	112 +977	24,3	6.8 Slo	120	HI
PWS-YK	112 + 977	113 + 28	28,4	6.8 Slo	120	HI

Sumber: Resor Jalan Rel 6.8 Solobalapan

Lengkung nomor 111.I berlokasi di lintas Purwosari-Gawok dengan nilai TQI sebesar 24,3 sehingga masuk dalam keadaan *Very Good* sesuai tabel dasar nilai TQI pada Tabel V.2. Lengkung nomor 111.I secara keseluruhan menggunakan bantalan beton, penambat E Klip dan KA Klip, serta tipe rel 54 dalam keadaan baik. Lengkung tersebut memasuki kelas jalan I dengan batas kecepatan maksimum berdasarkan gapeka adalah 115 km/jam.

2. Opname Lengkung

Opname lengkung dilaksanakan dengan mengukur anak panah, pertinggian, dan pelebaran. Hasil opname pada umumnya divisualisasikan dengan menggambar grafik untuk melihat ketidaksesuaian hasil opname dengan standar yang telah ditetapkan.

a. Kondisi Anak Panah

Kondisi anak panah dapat diketahui dengan melakukan pengukuran anak panah. Hasil pengukuran anak panah mengidentifikasi titik-titik pada lengkung yang mengalami pergeseran akibat gaya sentrifugal dan beban sarana. Pengukuran anak panah dilakukan dengan mengukur jarak antara tengah-tengah tali busur dengan busur lengkung lingkaran. Hasil pengukuran anak panah pada lengkung Hilir Nomor 111.I Km 112+698 – Km 112+991 adalah sebagai berikut:

Tabel V. 4 Perbedaan Anak Panah

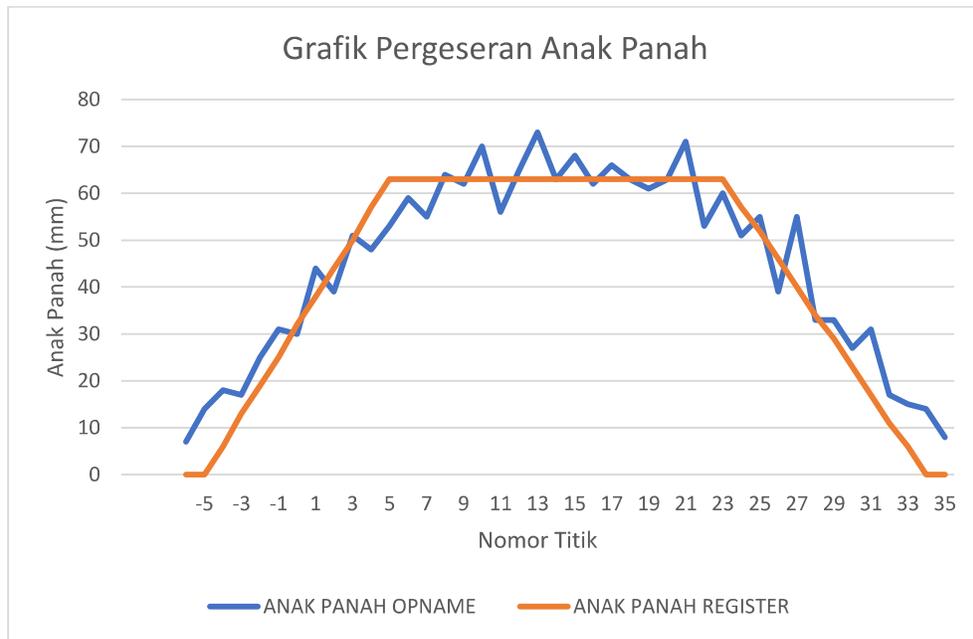
Nomor Titik	Letak Pada		Letak	Anak Panah Opname	Anak Panah Register	Perbedaan (mm)
	Km	Hm	MLA			
			ML			
			ALA			
-6				7	0	-7
-5			MLA	14	0	-14
-4				18	6	-12
-3				17	13	-4
-2				25	19	-6
-1				31	25	-6
0	112	698	ML	30	32	2
1				44	38	-6
2				39	44	5
3				51	50	-1
4				48	57	9
5			ALA	53	63	10
6				59	63	4
7				55	63	8
8				64	63	-1
9				62	63	1
10				70	63	-7
11				56	63	7
12				65	63	-2
13				73	63	-10
14				63	63	0
15				68	63	-5
16				62	63	1
17				66	63	-3
18				63	63	0
19				61	63	2
20				63	63	0
21				71	63	-8
22				53	63	10
23			ALA'	60	63	3
24				51	57	6
25				55	52	-3
26				39	46	7
27				55	40	-15
28	112	991	AL	33	34	1

Tabel V.4 Lanjutan

Nomor Titik	Letak Pada		Letak	Anak Panah Opname	Anak Panah Register	Perbedaan (mm)
	Km	Hm	MLA			
			ML			
			ALA			
29				33	29	-4
30				27	23	-4
31				31	17	-14
32				17	11	-6
33			MLA'	15	6	-9
34				14	0	-14
35				8	0	-8

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Nilai pergeseran anak panah pada lengkung hilir nomor 111.I divisualisasikan pada gambar berikut:



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 2 Grafik Pergeseran Anak Panah

Perhitungan nilai AP lengkung penuh, dengan radius lengkung hilir nomor 111.I adalah 800 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 A &= 50/R \\
 &= 50/800 \\
 &= 0,0625 \text{ m} \\
 &= 63 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Keterangan:

AP = Anak Panah

R = Radius

Hasil perhitungan anak panah pada lengkung 111.I dengan radius sebesar 800 m adalah sebesar 63 milimeter. Hasil pengecekan lengkung nomor 111.I ditemukan 34 titik yang tidak sesuai dengan register dengan rata-rata penyimpangan adalah -2 milimeter, penyimpangan terkecil -15 mm dan penyimpangan terbesar adalah 10 milimeter. Maka dari itu perlu dilakukan perawatan berupa angkatan dan listringan agar titik anak panah kembali sesuai dengan register.

b. Pertinggian

Pada lengkungan, sarana yang melintas mengakibatkan gaya sentrifugal yang mengakibatkan rel bagian luar mendapatkan tekanan lebih besar daripada rel bagian dalam. Untuk menyeimbangi gaya sentrifugal, elevasi rel luar dibuat lebih tinggi daripada rel dalam (Rahardjo : 2015). Pertinggian rel didapat dengan memposisikan rel dalam pada posisi semestinya dan rel luar lebih tinggi dari rel dalam. Hasil pengukuran lapangan yang tidak sesuai dengan pertinggian yang telah ditetapkan merupakan penyimpangan pertinggian baik dengan nilai yang lebih besar maupun lebih kecil. Hasil opname pertinggian pada lengkung hilir nomor 111.I Km 112+698 – 112+991 Lintas Purwosari-Gawok adalah sebagai berikut:

Tabel V. 5 Perbedaan Pertinggian

Nomor Titik	Letak Pada		Letak	Pertinggian Opname	Pertinggian Register	Perbedaan (mm)
	Km	Hm	MLA			
			ML			
			ALA			
-6				-3	0	3
-5			MLA	-5	0	5
-4				5	9	4
-3				7	18	11
-2				19	27	8
-1				28	36	8
0	112	698	ML	36	46	10

Tabel V.5 Lanjutan

Nomor Titik	Letak Pada		Letak	Pertinggian Opname	Pertinggian Register	Perbedaan (mm)
	Km	Hm	MLA			
			ML			
			ALA			
1				45	55	10
2				54	64	10
3				67	73	6
4				73	82	9
5			ALA	82	91	9
6				90	91	1
7				90	91	1
8				90	91	1
9				88	91	3
10				86	91	5
11				89	91	2
12				91	91	0
13				89	91	2
14				88	91	3
15				89	91	2
16				90	91	1
17				90	91	1
18				90	91	1
19				92	91	-1
20				91	91	0
21				92	91	-1
22				91	91	0
23			ALA'	90	91	1
24				80	83	3
25				78	74	-4
26				60	66	6
27				51	58	7
28	112	991	AL	40	50	10
29				30	41	11
30				23	33	10
31				13	25	12
32				4	17	13
33			MLA'	-3	8	11
34				-3	0	3
35				-3	0	3

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Perhitungan pertinggian normal jalan rel pada jalur lengkung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$h_{normal} = 5,95 \times \frac{V^2}{R}$$

Keterangan :

h = pertinggian

V = kecepatan

R = radius

Kecepatan untuk lengkung nomor 111.I tidak tercantum dalam tabel pertinggian sehingga kecepatan maksimum dapat dicari menggunakan pertinggian yang tertera pada spesifikasi lengkung pada Tabel V.1 dengan perhitungan sebagai berikut:

$$h = 5,95 \times \frac{Vr^2}{R}$$

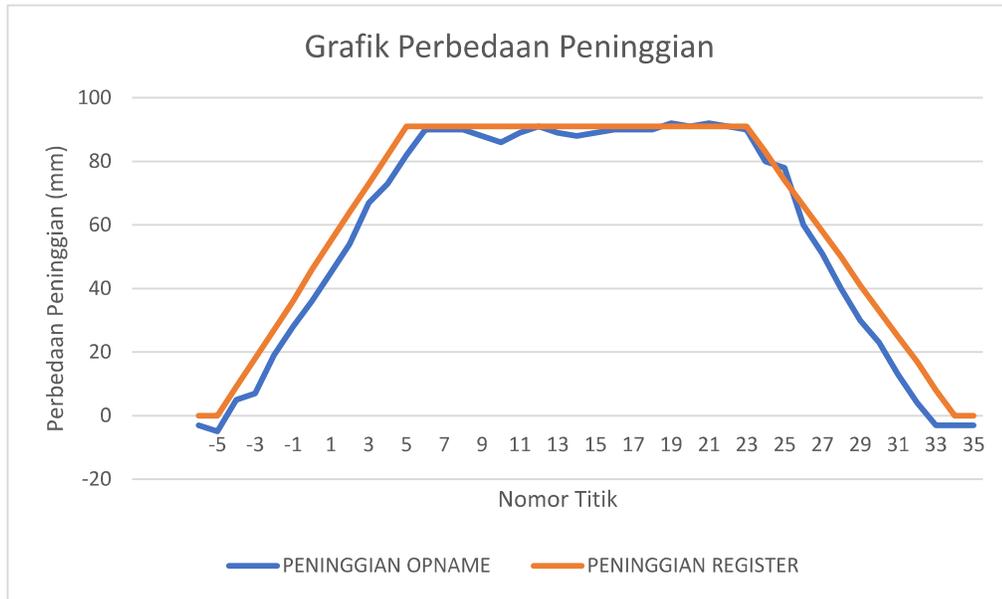
$$91 = 5,95 \times \frac{Vr^2}{800}$$

$$\frac{Vr^2}{800} = \frac{91}{5,95}$$

$$Vr^2 = 12.236$$

$$Vr = \sqrt{12.235} = 110 \text{ Km/jam}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, kecepatan rencana seharusnya 110 km/jam namun pada batas kecepatan yang terdapat pada marka lengkung adalah 115km/jam.



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 3 Perbedaan Peninggian

Berdasarkan grafik di atas, terdapat perbedaan peninggian pada titik-titik lengkung nomor 111.I. Rata rata perbedaan peninggian tersebut sebesar 5 milimeter dengan penyimpangan terkecil adalah -4 milimeter dan penyimpangan terbesar 13 milimeter. Maka dari itu, perlu dilakukan analisis perhitungan perbedaan di tiap titik dengan cara mencari selisih peninggian rel hasil opname dengan peninggian rel register yang nantinya angka perhitungan menjadi dasar dilakukannya pengangkatan rel luar pada lengkung.

c. Pelebaran pada lengkung

Menurut Hapsoro dan Utomo (2006), rel aus terjadi akibat gaya tekan yang timbul karena roda kereta/gerbong yang terjepit pada saat melewati rel. Terjadinya keausan rel dan roda dapat dilakukan dengan adanya pelebaran yang dilakukan dengan penggeseran rel dalam lengkung ke arah dalam. Besar pelebaran jalur pada lengkung hilir nomor 111.I Km 112+698 – Km 112+991 Lintas Purwosari-Gawok adalah sebagai berikut:

Tabel V. 6 Perbedaan Pelebaran Jalur

Nomor Titik	Letak Pada		Letak	Pelebaran Opname	Pelebaran Register	Perbedaan (mm)
	Km	Hm	MLA			
			ML			
			ALA			
-6				1065	1067	2
-5			MLA	1065	1067	2
-4				1065	1067	2
-3				1064	1067	3
-2				1065	1067	2
-1				1064	1067	3
0	112	698	ML	1065	1067	2
1				1065	1067	2
2				1063	1067	4
3				1062	1067	5
4				1065	1067	2
5			ALA	1066	1067	1
6				1065	1067	2
7				1065	1067	2
8				1065	1067	2
9				1065	1067	2
10				1067	1067	0
11				1068	1067	-1
12				1065	1067	2
13				1065	1067	2
14				1065	1067	2
15				1067	1067	0
16				1065	1067	2
17				1065	1067	2
18				1065	1067	2
19				1065	1067	2
20				1067	1067	0
21				1065	1067	2
22				1065	1067	2
23			ALA'	1068	1067	-1
24				1065	1067	2
25				1070	1067	-3
26				1065	1067	2
27				1071	1067	-4
28	112	991	AL	1068	1067	-1
29				1067	1067	0

Tabel V.6 Lanjutan

Nomor Titik	Letak Pada		Letak	Pelebaran Opname	Pelebaran Register	Perbedaan (mm)
	Km	Hm	MLA			
			ML			
			ALA			
30				1065	1067	2
31				1070	1067	-3
32				1065	1067	2
33			MLA'	1066	1067	1
34				1065	1067	2
35				1065	1067	2

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Tabel V. 7 Pelebaran Jalur Rel 1067 mm Berdasarkan Radius Lengkung

Jari Jari Tikungan (m)	Pelebaran (mm)
$R > 600$	0
$550 < R \leq 600$	5
$400 < R \leq 550$	10
$350 < R \leq 400$	15
$100 < R \leq 350$	20

Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012

Tabel V.6 menunjukkan perbedaan pelebaran jalur normal dengan register. Berdasarkan Permenhub No. 60 Tahun 2012, semakin besar radius suatu lengkung maka semakin kecil pelebaran jalur. Berdasarkan Tabel V.7 lengkung nomor 111.I dengan 800 meter seharusnya memiliki pelebaran sebesar 0 milimeter, namun lengkung nomor 111.I masih memiliki ketidaksesuaian rata-rata sebesar 1 milimeter dengan penyimpangan terbesar +5 milimeter dan penyimpangan terkecil sebesar -4 milimeter. Permenhub No. 60 Tahun 2012 menyebutkan bahwa penyimpangan lebar jalan rel untuk lebar 1067 yang dapat ditolerir adalah +4 mm dan -2 mm untuk jalan rel yang telah dioperasikan. Maka dari itu, pelebaran lengkung nomor 111.I tidak sesuai dengan batas toleransi yang diizinkan. Untuk mengembalikan pelebaran jalur sesuai dengan desain maka perlu dilakukan kegiatan perawatan pelebaran sesuai dengan register.

3. Analisis Struktur Balas

Berdasarkan Permenhub No. 60 Tahun 2012, balas berfungsi untuk meneruskan dan menyebarkan beban yang diperoleh bantalan ke tanah dasar secara merata, menguatkan posisi bantalan, serta memungkinkan air mengalir dengan lancar agar tidak timbul genangan di area bantalan dan rel. Lengkung nomor 111.I tergolong sebagai lengkung dengan kelas jalan I yang memiliki standar menurut Permenhub No. 60 Tahun 2012 sebagai berikut:

Tabel V. 8 Penampang Melintang Jalan Rel

KELAS JALAN	V Maks (km/jam)	d1 (cm)	b (cm)	c (cm)	k1 (cm)	d2 (cm)	e (cm)	k2 (cm)
I	120	30	150	235	265	15 – 50	25	375
II	110	30	150	235	265	15 – 50	25	375
III	100	30	140	225	240	15 – 50	22	325
IV	90	25	140	215	240	15 – 35	20	300
V	80	25	135	210	240	15 – 35	20	300

Sumber: Permenhub No. 60 Tahun 2012

Diketahui bahwa lengkung nomor 111.I yang masuk dalam kelas jalan I dengan standar ketebalan balas di bawah bantalan adalah 30 cm, lebar bahu balas dari *as track* 150 cm, serta lebar kaki balas dari *as track* adalah 235 cm. Data hasil pengukuran struktur balas pada lengkung nomor 111.I terdapat pada Tabel V.9 dan Tabel V.10 sebagai berikut:

Tabel V. 9 Hasil Pengukuran Struktur Balas Pada Rel Luar

No Titik	Letak		Sisi Luar Lengkung				Lebar Kaki Balas Dari As Track (cm)	
	Km	Hm	Lebar Bahu Balas Dari As Track (cm)		Ketebalan Balas Bawah Bantalan (cm)		Eksisting	Perbedaan
			Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan		
-6			120	-30	95	65	290	55
-5			120	-30	110	80	290	55
-4			125	-25	75	45	320	85
-3			115	-35	74	44	320	85
-2			130	-20	80	50	290	55
-1			120	-30	73	43	275	40
0	112	698	120	-30	97	67	310	75
1			120	-30	90	60	290	55
2			120	-30	70	40	310	75
3			110	-40	99	69	326	91
4			150	0	95	65	340	105
5			110	-40	90	60	320	85
6			110	-40	96	66	330	95
7			120	-30	105	75	325	90
8			118	-32	97	67	340	105
9			125	-25	97	67	350	115
10			120	-30	79	49	310	75
11			125	-25	92	62	270	35
12			113	-37	105	75	280	45
13			115	-35	100	70	280	45

Tabel V.8 Lanjutan

No Titik	Letak		Lebar Bahu Balas Dari As Track (cm)	Sisi Luar Lengkung		Lebar Kaki Balas Dari As Track (cm)		
	Km	Hm		Ketebalan Balas Bawah Bantalan (cm)				
				EKSISTING	Perbedaan		Eksisting	Perbedaan
14			125	-25	70	40	250	15
15			118	-32	76	46	270	35
16			130	-20	92	62	270	35
17			112	-38	90	60	270	35
18			112	-38	85	55	260	25
19			110	-40	83	53	280	45
20			114	-36	92	62	290	55
21			121	-29	94	64	290	55
22			110	-40	69	39	300	65
23			114	-36	95	65	310	75
24			121	-29	84	54	280	45
25			112	-38	80	50	280	45
26			115	-35	88	58	310	75
27			121	-29	74	44	280	45
28			120	-30	73	43	290	55
29	112	991	125	-25	70	40	270	35
30			121	-29	53	23	260	25
31			120	-30	43	13	210	-25
32			115	-35	40	10	210	-25
33			115	-35	38	8	210	-25

Tabel V.8 Lanjutan

No Titik	Letak		Sisi Luar Lengkung					
	Km	Hm	Lebar Bahu Balas Dari As Track (cm)		Ketebalan Balas Bawah Bantalan (cm)		Lebar Kaki Balas Dari As Track (cm)	
			Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan
34			120	-30	36	6	210	-25
35			120	-30	38	8	210	-25

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Tabel V. 10 Hasil Pengukuran Struktur Balas Pada Rel Dalam

No Titik	Letak		Sisi Dalam Lengkung					
	Km	Hm	Lebar Bahu Balas Dari As Track (cm)		Ketebalan Balas Bawah Bantalan (cm)		Lebar Kaki Balas Dari As Track (cm)	
			Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan
-6			127	-23	39	9	275	40
-5		MLA	136	-14	40	10	275	40
-4			140	-10	40	10	310	75
-3			130	-20	39	9	326	91
-2			130	-20	41	11	310	75
-1			129	-21	42	12	320	85
0	112	698	ML	-21	39	9	220	-15
1			129	-21	38	8	280	45
2			135	-15	38	8	280	45
3			131	-19	39	9	270	35
4			135	-15	43	13	260	25
5			136	-14	43	13	280	45

Tabel V.9 Lanjutan

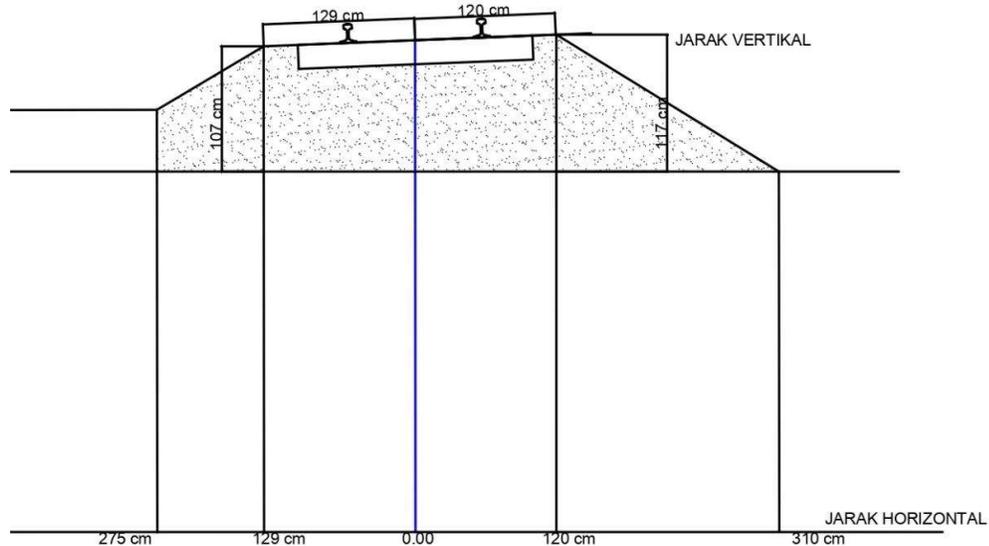
No Titik	Letak		Letak	Sisi Dalam Lengkung					
	Km	Hm		Lebar Bahu Balas Dari As Track (cm)		Ketebalan Balas Bawah Bantalan (cm)		Lebar Kaki Balas Dari As Track (cm)	
				Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan
ALA	ML	MLA	ALA	ML	MLA	ALA	ML	MLA	
6				136	-14	39	9	270	35
7				138	-12	38	8	270	35
8				138	-12	37	7	270	35
9				138	-12	39	9	310	75
10				135	-15	39	9	300	65
11				136	-14	40	10	310	75
12				135	-15	43	13	280	45
13				135	-15	40	10	290	55
14				136	-14	43	13	290	55
15				138	-12	39	9	285	50
16				131	-19	38	8	300	65
17				132	-18	38	8	305	70
18				131	-19	41	11	310	75
19				133	-17	43	13	310	75
20				136	-14	45	15	310	75
21				137	-13	39	9	280	45
22				137	-13	37	7	290	55
23				135	-15	39	9	270	35
24			ALA'	138	-12	38	8	290	55
25				136	-14	38	8	280	45

Tabel V.9 Lanjutan

No Titik	Letak		Letak	Sisi Dalam Lengkung				Lebar Kaki Balas Dari As Track (cm)	
	Km	Hm		Lebar Bahu Balas Dari As Track (cm)		Ketebalan Balas Bawah Bantalan (cm)		Eksisting	Perbedaan
				Eksisting	Perbedaan	Eksisting	Perbedaan		
26				136	-14	42	12	300	65
27				135	-15	45	15	310	75
28				135	-15	43	13	260	25
29	112	991	AL	134	-16	44	14	270	35
30				130	-20	41	11	290	55
31				131	-19	41	11	215	-20
32				139	-11	39	9	220	-15
33				131	-19	39	9	215	-20
34			MLA'	129	-21	37	7	215	-20
35				129	-21	39	9	210	-25

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Berikut merupakan visualisasi kondisi eksisting pada ML (Mulai Lengkung) pada lengkung nomor 111.I lintas Purwosari-Gawok pada Km 112 + 698 yang tidak sesuai Permenhub No. 60 Tahun 2012.



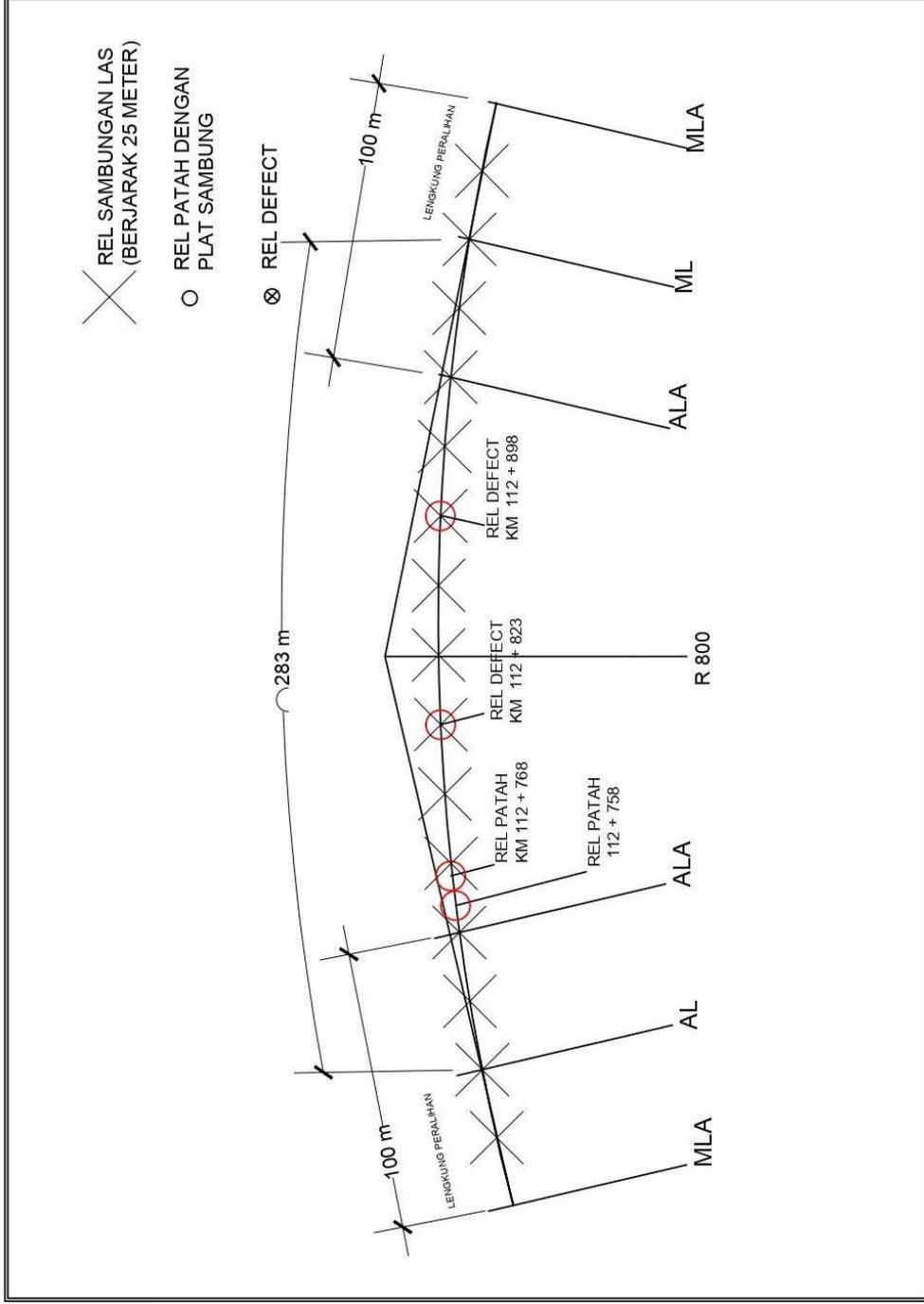
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 4 Hasil Pengukuran Penampang Melintang Lengkung 111.I

Kondisi struktur balas pada lengkung nomor 111.I dikatakan tinggi dan curam karena lebar bahu balas hanya 120 cm dari *as track*, lebar kaki balas sisi luar lengkung 310 cm, serta ketebalan balas rata bantalan pada lengkung luar mencapai 117 cm. Hal ini sangat berisiko terhadap kereta api yang melintas. Maka dari itu, diperlukan adanya struktur penahan balas atau *ballast stopper* untuk memperbaiki struktur balas agar sesuai dengan Permenhub No. 60 Tahun 2012.

4. Analisis Kerusakan Rel

Analisis kerusakan rel pada lengkung nomor 111.I digunakan untuk mengetahui kondisi kerusakan-kerusakan yang terjadi. Berdasarkan hasil observasi, lengkung nomor 111.I memiliki beberapa kerusakan antara lain keausan rel, rel patah, serta rel depek. Kondisi kerusakan yang terjadi pada lengkung hilir nomor 111.I divisualisasikan sebagai berikut:



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 5 Kondisi Kerusakan Rel Lengkung Nomor 111.I

a. Keausan Rel

Rel adalah salah satu bagian dari jalan rel yang mudah rusak. Rel berkontak langsung dengan roda kereta api. Karena rel berfungsi sebagai permukaan tempat perpindahan roda kereta maka rel mudah mengalami kerusakan seperti bergelombang, aus, retak, hingga patah (Tamtomo Wahyu : 2019). Standar keausan rel maksimum ditunjukkan Tabel V.10:

Tabel V. 11 Keausan Rel Maksimum

Tipe Rel	a maks (mm)	e maks (mm)
R.25	10	10
R.33	10	12
R.42	10	13
R.50	12	15
R.54	12	15
R.60	12	15

Sumber: Peraturan Dinas 10A

Tabel V. 12 Hasil Pengukuran Keausan Rel

Nomor Titik	Letak Pada		Letak	a (mm)	e (mm)
	Km	Hm	MLA		
			ML		
			ALA		
-6				0	0
-5			MLA	0	0
-4				0	1
-3				0	2
-2				0	1
-1				1	1
0	112	698	ML	1	3
1				0	3
2				1	1
3				2	1
4				0	3
5			ALA	0	2
6				1	2

Tabel V.11 Lanjutan

Nomor Titik	Letak Pada		Letak	a (mm)	e (mm)
	Km	Hm	MLA		
			ML		
			ALA		
7				1	3
8				2	3
9				1	2
10				1	2
11				1	2
12				1	2
13				3	3
14				3	3
15				1	1
16				1	2
17				2	3
18				1	3
19				1	3
20				2	2
21				3	2
22				1	1
23			ALA'	1	2
24				1	2
25				1	2
26				1	1
27				1	2
28	112	991	AL	1	1
29				1	1
30				1	1
31				2	2
32				1	1
33			MLA'	1	1
34				2	2
35				2	1

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Lengkung nomor 111.I menggunakan rel tipe R.54 sehingga memiliki batas maksimum keausan rel a yaitu 12 mm dan e 15 mm (Peraturan Dinas 10A). Dari Tabel V.11 dapat disimpulkan bahwa keausan pada lengkung nomor 111.I masih dalam batas toleransi. Apabila keausan rel sudah mencapai batas maksimal maka diperlukan perawatan karena lengkung lebih riskan terjadi keausan dibandingkan dengan jalur lurus.

b. Rel depek

Rel depek atau cacat termasuk salah satu dari jenis kerusakan yang terjadi pada rel. Rel cacat terbagi menjadi tiga macam antara lain:

1) Cacat Pada Sambungan

Cacat pada sambungan terjadi karena celah yang terlalu lebar sehingga hantaman roda membuat cacat pada bagian ujung rel.

2) *Dorslag*/Selip

Rel selip merupakan salah satu kondisi kerusakan dengan kondisi rel aus berupa titik pada kepala rel karena selipnya roda kereta.

3) Cacat pada Sambungan Las

Rel cacat pada sambungan las terjadi akibat sambungan las yang tidak siku, sehingga rel menjadi cacat akibat hantaman roda kereta api.

Rel pada lengkung hilir nomor 111.I merupakan rel panjang menerus yang memiliki panjang lebih dari 300 meter. Rel panjang menerus merupakan rel yang tersusun dari beberapa rel sepanjang 25 meter yang disambungkan menggunakan sistem pengelasan. Sehingga pada lengkung hilir nomor 111.I terdapat beberapa titik pengelasan yang merupakan sambungan rel dari rel panjang menerus. Untuk operasi kereta api yang aman, kondisi sambungan rel wajib dipastikan dalam keadaan baik dan tidak rusak. Berdasarkan hasil observasi pada lengkung hilir nomor 111.I, ditemukan kondisi berupa rel cacat pada sambungan las pada dua titik. Kondisi rel cacat pada lengkung hilir nomor 111.I adalah sebagai berikut:



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar V. 6 Rel Cacat Pada Sambungan Las



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar V. 7 Rel Cacat Pada Sambungan Las

c. Rel Patah

Kerusakan rel pada lengkung hilir nomor 111.I adalah rel patah pada dua titik yang berjarak 16 bantalan (9,5 meter). Metode perbaikan yang dilakukan oleh UPT Jalan Rel Resor 6.8 Solobalapan terhadap rel patah yang ada pada lengkung 111.I adalah perbaikan sementara menggunakan plat sambung. Kondisi rel patah pada lengkung hilir nomor 111.I adalah sebagai berikut:



Sumber: Dokumentasi Pribadi

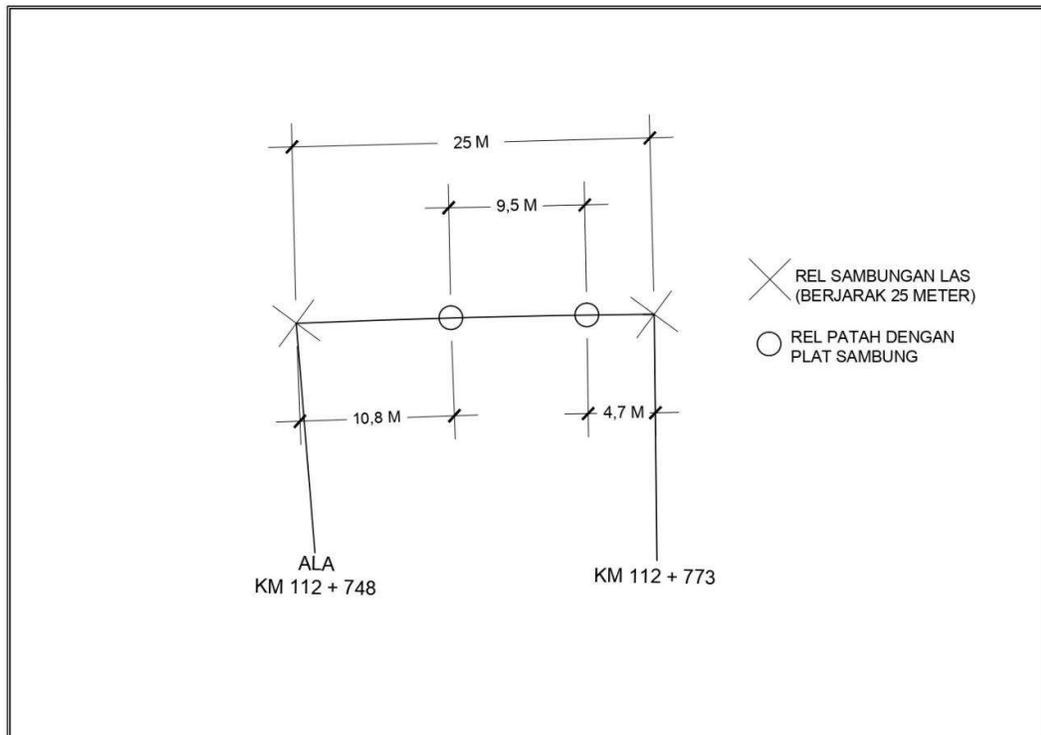
Gambar V. 8 Rel Patah KM 112 + 758



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar V. 9 Rel Patah KM 112 + 768

Titik rel patah tersebut berada pada lengkung penuh setelah akhir lengkung alih (ALA) pada KM 112+758 dan pada KM 112 +768. Dua titik kerusakan tersebut memiliki letak yang berdekatan dengan sambungan las. Berdasarkan Peraturan DIInas 10A, jarak seharusnya antara plat sambung dengan sambungan las terdekat minimal adalah 6 meter. Namun, kondisi pada dua titik plat sambung pada patahan lengkung hilir nomor 111.I tidak sesuai dengan aturan yaitu terdapat salah satu titik plat sambung yang jaraknya 4,7 meter dari sambungan las. Posisi titik kerusakan rel patah divisualisasikan adalah sebagai berikut:



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 10 Rel Patah dengan Perbaikan Sementara

Berdasarkan analisis kerusakan rel, diketahui bahwa kondisi rel pada lengkung hilir nomor 111.I memiliki kondisi yang perlu dilakukan tindakan pada beberapa titik karena rel aus, patah, dan cacat. Kondisi keausan yang terjadi pada lengkung hilir nomor 111.I masih dalam batas toleransi. Selain itu, kondisi rel cacat dan rel patah pada lengkung nomor 111.I perlu

dilakukan tindak lanjut baik berupa pengelasan ulang agar profil rel kembali sempurna maupun berupa pergantian rel.

B. Pemecahan Masalah

1. Perbaikan dan Perawatan Lengkung

Menurut Permenhub No. 32 Tahun 2011, untuk mempertahankan kondisi jalan rel pada lengkung sesuai dengan desain kondisi awal maka perlu dilakukan perawatan. Hasil analisis kondisi lengkung dan opname lengkung menunjukkan terjadinya ketidaksesuaian nilai opname lengkung dengan nilai register. Lengkung memiliki desain awal yang harus dijaga kondisinya. Untuk mencegah terjadinya pergeseran nilai, maka hal yang dilakukan adalah pelaksanaan opname lengkung agar kondisi lengkung selalu terpelihara dengan baik. Apabila terjadi ketidaksesuaian maka perlu dilakukan pengembalian kondisi agar sesuai dengan desain atau register.

Berdasarkan analisis kondisi lengkung dan opname lengkung, maka diperlukan adanya perawatan jalan rel yang dilakukan dengan melakukan perawatan secara berkala dan perbaikan untuk mengembalikan fungsi. Perawatan lengkung dilakukan dengan mengukur nilai anak panah, pertinggian, serta pelebaran jalur di lapangan. Sedangkan perbaikan lengkung dilakukan dengan angkatan dan listringan.

2. *Ballast Stopper*

Konstruksi penahan balas (*Ballast Stopper*) dapat dibuat menggunakan beberapa jenis material seperti batu kali, bantalan beton, bantalan baja, plat beton, dan bronjong. Berdasarkan hasil observasi, Resor 6.8 Solobalapan memiliki material berupa bantalan besi tidak terpakai yang sebagian ketersediaannya terdapat di Depo Mesin Bubut Solobalapan. Selain itu, terdapat material sisa yang cukup banyak dari sisa proyek peningkatan kelas jalan pada Lintas Purwosari-Wonogiri berupa bantalan besi serta rel bekas tipe R.33 dan R.42. Sehingga pembuatan *ballast stopper* direkomendasikan menggunakan bantalan besi agar lebih efisien dengan memanfaatkan ketersediaan yang ada. Gambaran *ballast stopper* dari bantalan besi adalah sebagai berikut:



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar V. 11 Ballast Stopper 1 Lapis di Wilayah Solobalapan

Berdasarkan hasil analisis, *ballast stopper* dibuat tiap jarak 50 meter pada lengkung hilir nomor 111.I lintas Purwosari-Gawok. *Ballast stopper* dibuat menggunakan bantalan besi yang disusun memanjang vertikal pada samping sisi luar lengkung. Susunan bantalan besi ditahan menggunakan pancang berupa rel bekas tipe R.42 pada tiap sambungan. Bantalan-bantalan disusun dan disambungkan dengan metode pengelasan. Untuk mencapai kondisi sesuai dengan Permenhub No. 60 Tahun 2012, maka diberikan tambahan berupa urugan pasir dan batu agar ketebalan balas bawah bantalan, lebar bahu balas, dan lebar kaki balas sesuai dengan aturan yang ada. Desain

Setelah disesuaikan Permenhub No. 60 Tahun 2012, kondisi kebutuhan bantalan dan pancang tiap 50 meter lengkung berbeda-beda. Perhitungan kebutuhan bantalan besi dan pancang adalah sebagai berikut:

Diketahui:

Panjang bantalan besi	= 2000 mm
Lebar bantalan besi	= 232 mm
Tinggi bantalan besi	= 80 mm
Panjang total lengkung	= 393 meter
Panjang total pancang untuk bantalan 4 lapis	= 277,8 cm
Panjang total pancang untuk bantalan 3 lapis	= 208,2 cm
Panjang total pancang untuk bantalan 2 lapis	= 139,2 cm

Panjang total pancang untuk bantalan 1 lapis = 69,6 cm

Jika:

a. Kebutuhan bantalan 4 lapis dan pancang untuk 50 meter

$$\begin{aligned} \text{Bantalan} &= \text{jumlah lapisan} \times \frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang bantalan (m)}} \\ &= 4 \times \frac{50}{2} \\ &= 4 \times 25 \\ &= 100 \text{ bantalan} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pancang} &= \text{panjang pancang} \times \left(\frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang Bantalan (m)}} + 1 \right) \\ &= 277,8 \times \left(\frac{50}{2} + 1 \right) \\ &= 277,8 \times 26 \\ &= 72,228 \text{ meter} \end{aligned}$$

b. Kebutuhan bantalan 3 lapis dan pancang untuk 50 meter

$$\begin{aligned} \text{Bantalan} &= \text{jumlah lapisan} \times \frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang bantalan (m)}} \\ &= 3 \times \frac{50}{2} \\ &= 3 \times 25 \\ &= 75 \text{ bantalan} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pancang} &= \text{panjang pancang} \times \left(\frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang Bantalan (m)}} \right) \\ &= 208,2 \times \left(\frac{50}{2} \right) \\ &= 208,2 \times 25 \\ &= 52,20 \text{ meter} \end{aligned}$$

c. Kebutuhan bantalan 2 lapis dan pancang untuk 50 meter

$$\begin{aligned} \text{Bantalan} &= \text{jumlah lapisan} \times \frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang bantalan (m)}} \\ &= 2 \times \frac{50}{2} \\ &= 2 \times 25 \\ &= 50 \text{ bantalan} \end{aligned}$$

$$\text{Pancang} = \text{panjang pancang} \times \left(\frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang Bantalan (m)}} \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= 139,2 \times \left(\frac{50}{2}\right) \\
 &= 139,2 \times 25 \\
 &= 34,80 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

d. Kebutuhan bantalan 1 lapis dan pancang untuk 50 meter

$$\begin{aligned}
 \text{Bantalan} &= \text{jumlah lapisan} \times \frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang bantalan (m)}} \\
 &= 1 \times \frac{50}{2} \\
 &= 1 \times 25 \\
 &= 25 \text{ bantalan}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Pancang} &= \text{panjang pancang} \times \left(\frac{\text{Panjang lengkung (m)}}{\text{Panjang Bantalan (m)}}\right) \\
 &= 69,6 \times \left(\frac{50}{2}\right) \\
 &= 69,6 \times 25 \\
 &= 17,40 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

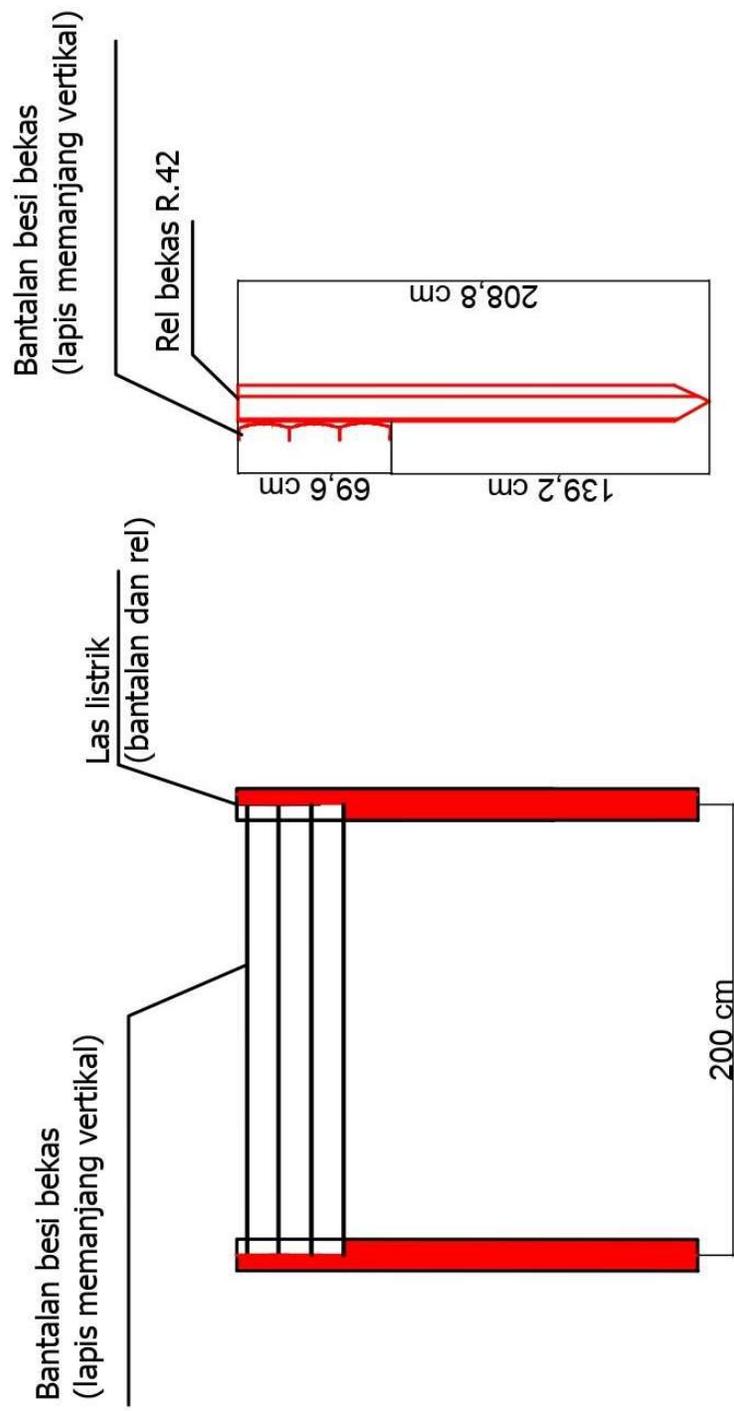
Maka:

Tabel V. 13 Hasil Analisis Kebutuhan Bantalan dan Pancang

Letak (Km + Hm)	Jumlah Lapisan Bantalan	Kebutuhan Bantalan	Kebutuhan Pancang (Meter)
112 + 648	4 Lapis	100	72,228
112 + 698	3 Lapis	75	52,20
112 + 748	3 Lapis	75	52,20
112 + 798	2 Lapis	50	34,80
112 + 848	2 Lapis	50	34,80
112 + 898	3 Lapis	75	52,20
112 + 948	2 Lapis	50	34,80
113 + 108	1 Lapis	25	17,40
Total		500	350,628

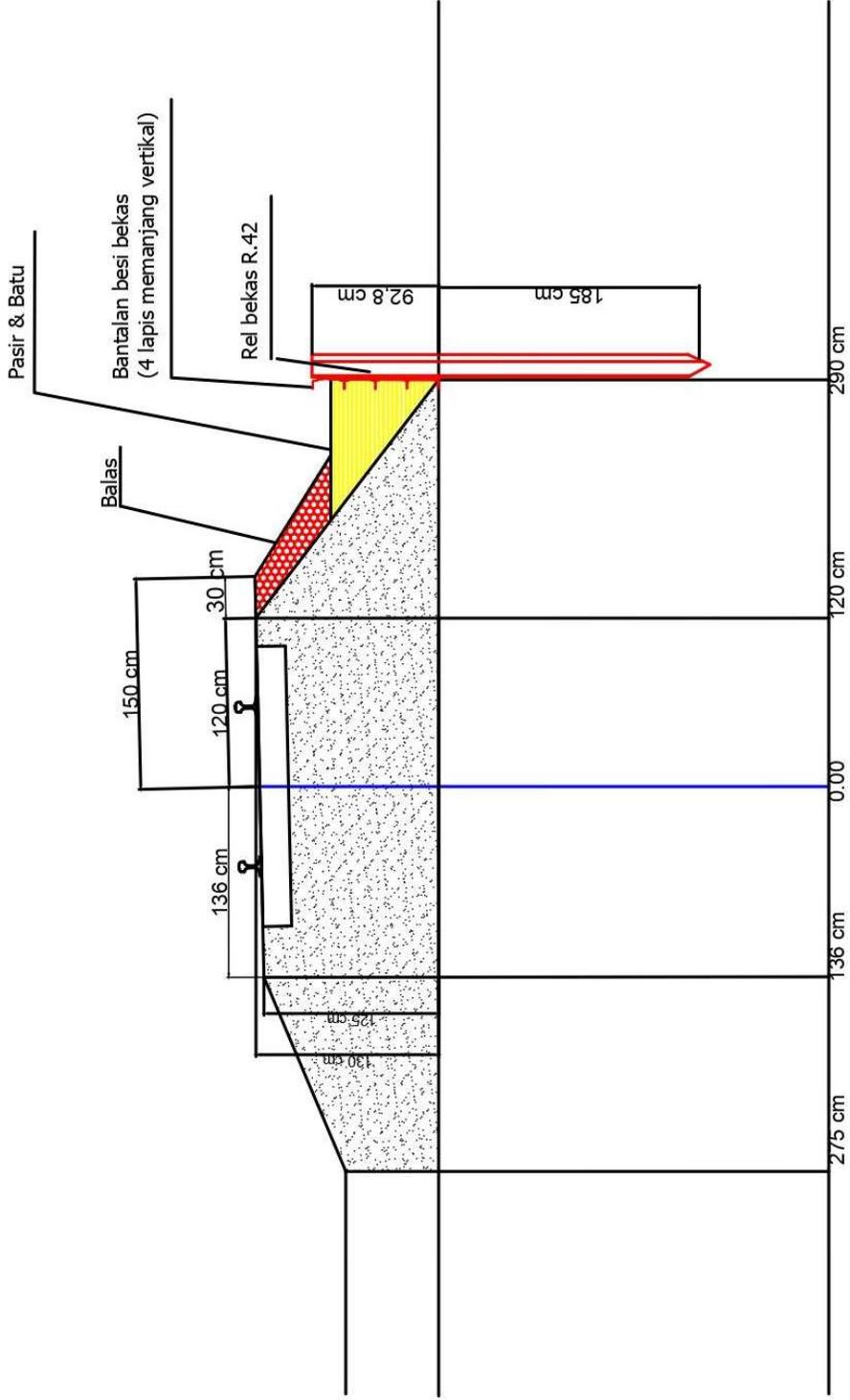
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Berdasarkan analisis di atas, maka pembuatan konstruksi penahan balas pada lengkung hilir nomor 111.I lintas Purwosari-Gawok disesuaikan dengan kebutuhan bantalan besi yang terdiri dari 4 lapis bantalan, 3 lapis bantalan, 2 bantalan, dan 1 bantalan per 50 meter. Total keseluruhan dari bantalan besi yang dibutuhkan adalah 500 bantalan beserta rel bekas tipe R.42 sepanjang 350,628 meter. Ketersediaan bantalan besi dan rel sangat mencukupi karena terdapat proyek peningkatan kelas jalan pada Lintas Purwosari-Wonogiri. Pada lintas tersebut terdapat pergantian bantalan besi menjadi bantalan beton serta pergantian rel tipe R.42 menjadi R.54. Hal tersebut menunjukkan ketersediaan yang mencukupi untuk dibuatnya konstruksi penahan balas menggunakan bantalan besi. Desain *Ballast Stopper* dapat dilihat pada Gambar V.12 Sampai dengan Gambar V.20.



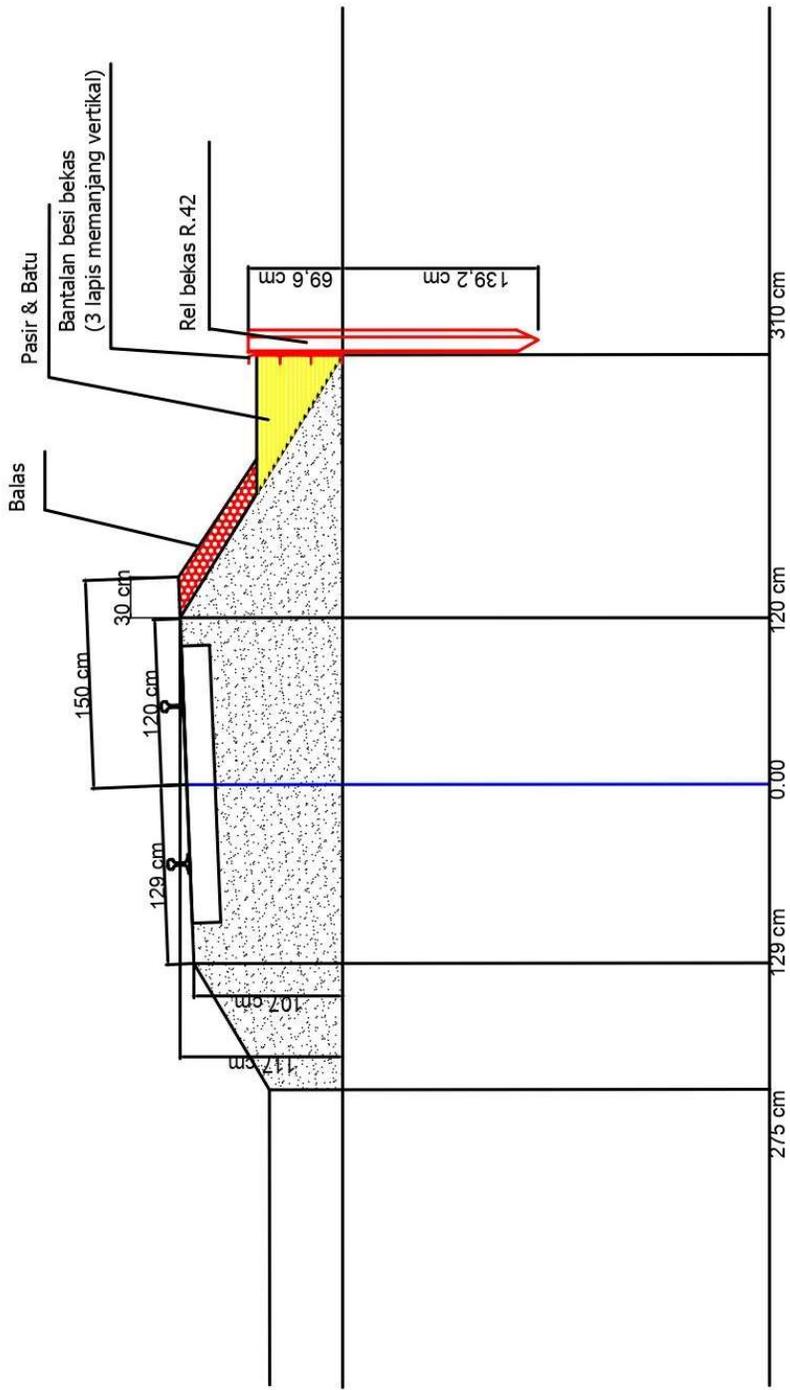
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 12 Detail *Ballast Stopper*



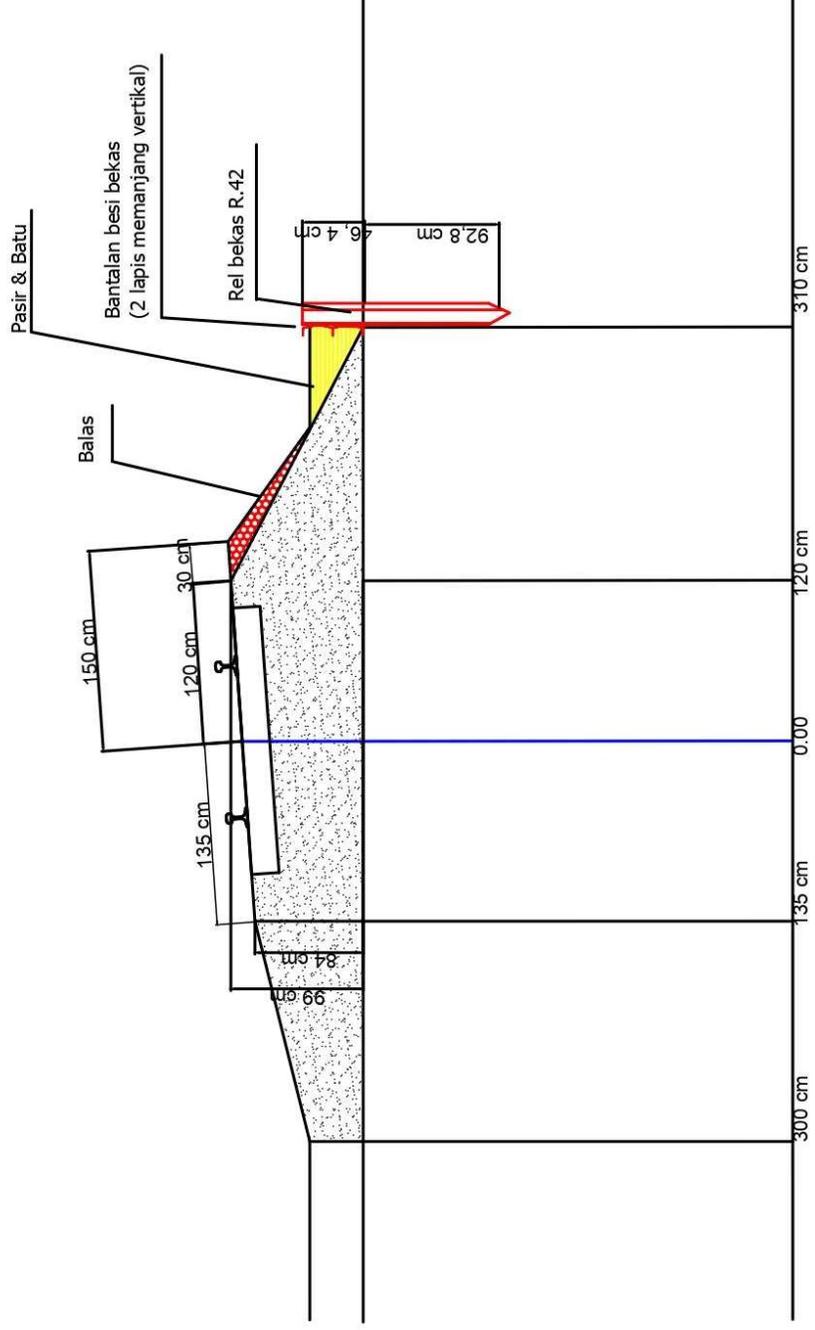
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 13 Kontruksi Penahan Balas KM 112 + 648



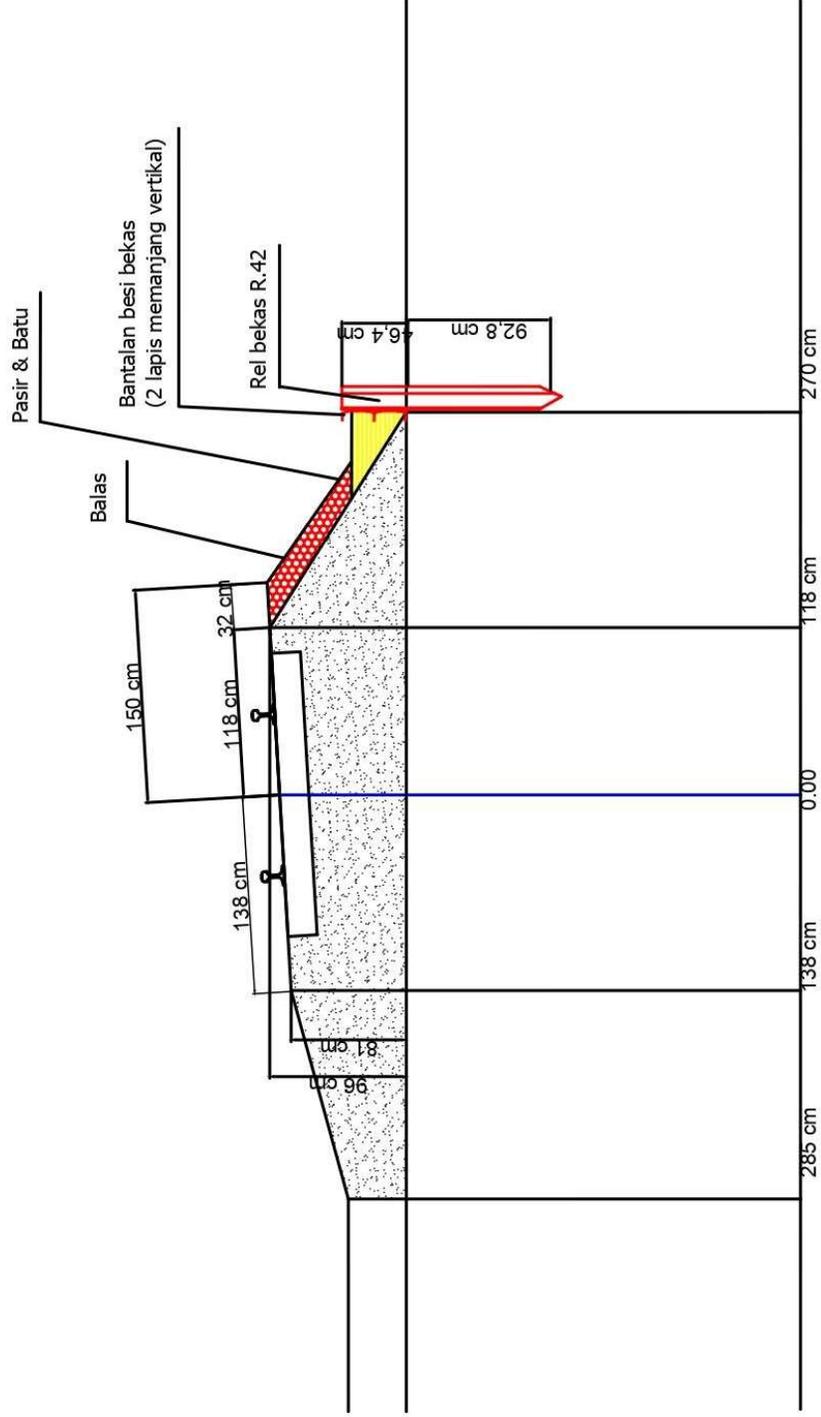
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 14 Kontruksi Penahan Balas KM 112 + 698



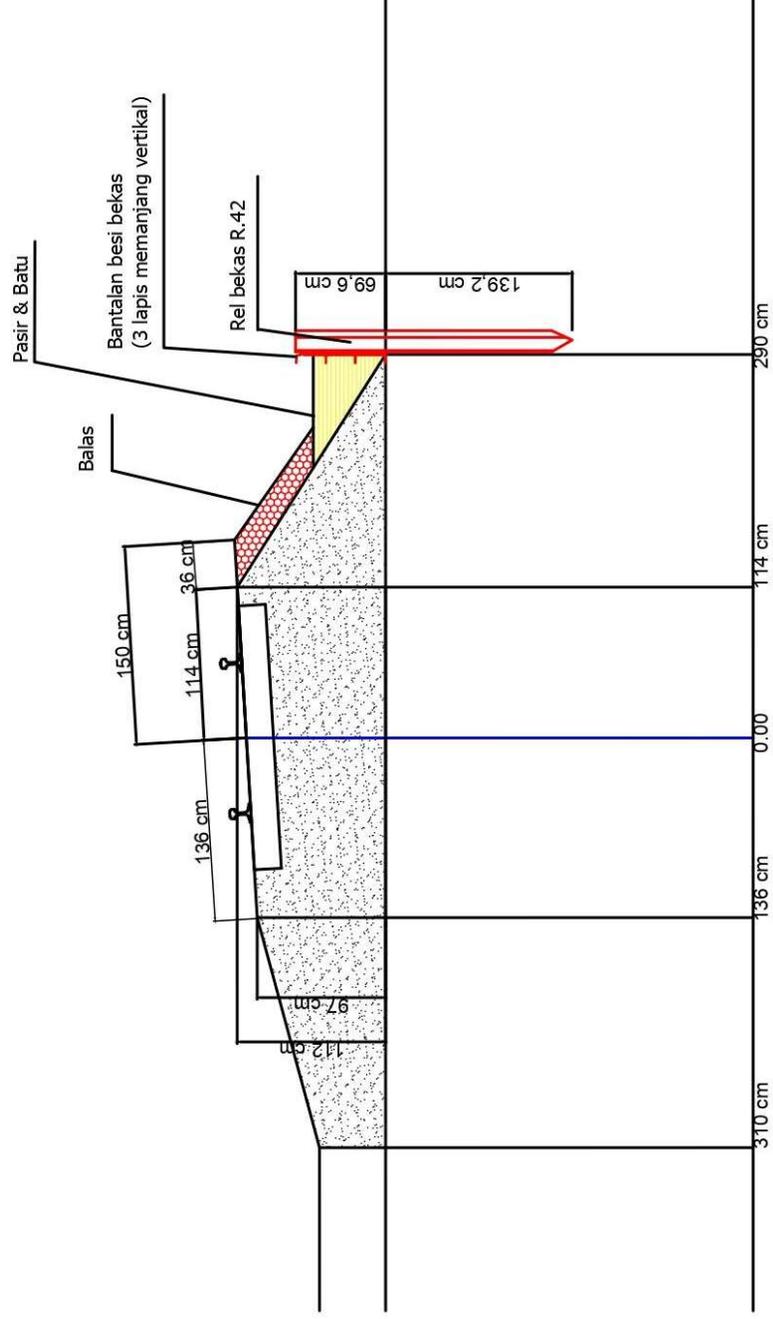
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 16 Kontruksi Penahan Balas KM 112 + 798



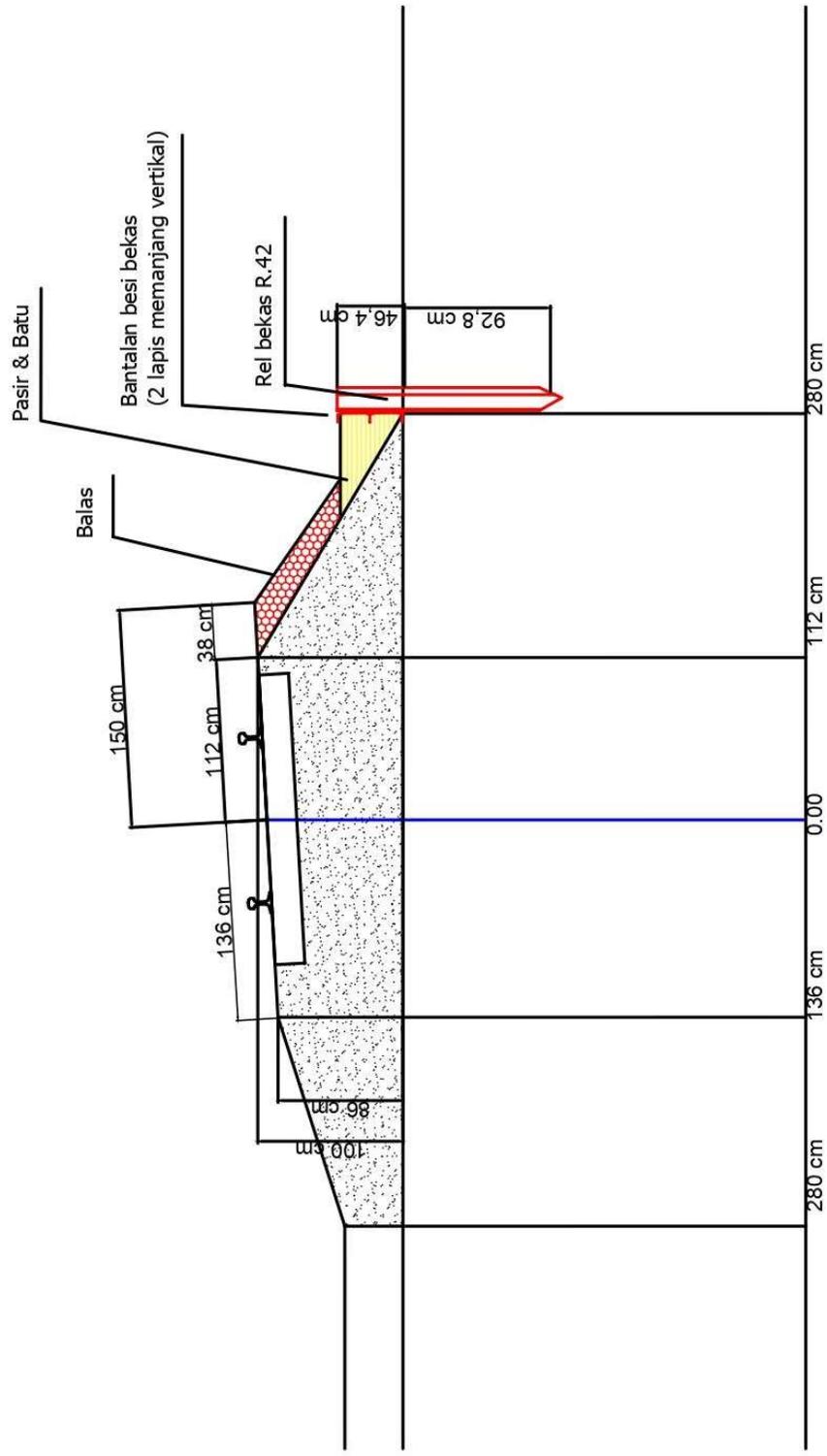
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 17 Kontruksi Penahan Balas KM 112 + 848



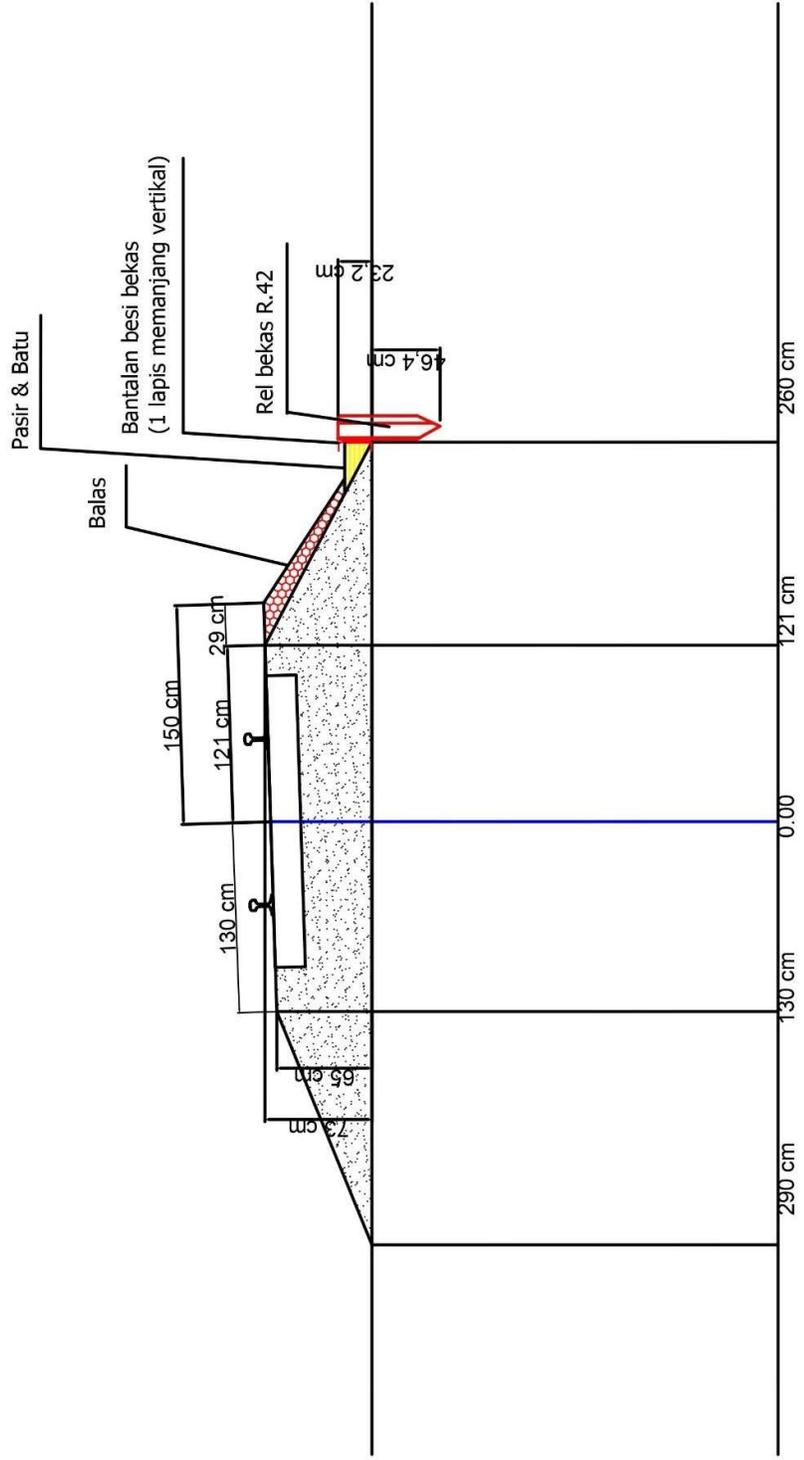
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 18 Kontruksi Penahan Balas KM 112 + 898



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 19 Kontruksi Penahan Balas KM 112 + 948



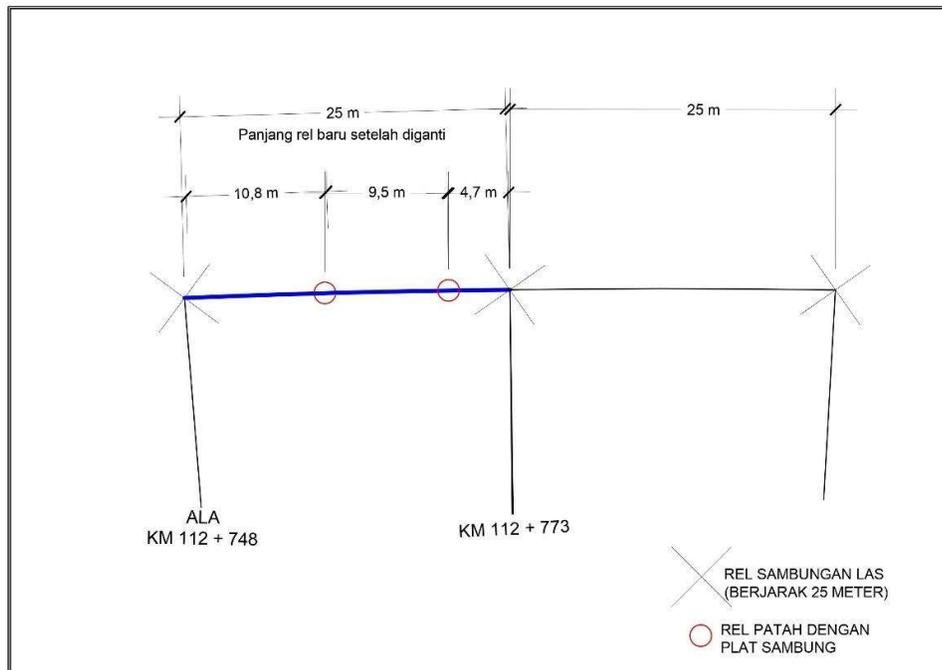
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 20 Kontruksi Penahan Balas KM 113 + 108

2. Perbaikan jalan rel

Berdasarkan hasil analisis, kerusakan yang perlu ditindaklanjuti pada lengkung hilir nomor 111.I adalah sebagai berikut:

- a. Rel patah yang saat ini ditangani dengan perbaikan sementara menggunakan plat sambung tidak sesuai dengan standar dimana jarak terdekat plat sambung dengan sambungan las minimal adalah 6 meter. Kondisi rel patah pada lengkung nomor 111.I menunjukkan jarak asli hanyalah 4,7 meter sehingga terjadi ketidaksesuaian. Berdasarkan PD 10 A, penanganan permanen pada rel patah dilakukan dengan pengelasan atau ganti rel. Maka dari itu, dengan mempertimbangkan jarak antara plat sambung dengan sambungan las tidak sesuai standar maka tindak lanjut yang dilakukan adalah pergantian rel. Berikut merupakan kondisi apabila rel diganti:



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar V. 21 Kondisi Lengkung Setelah Pergantian Rel

b. Kerusakan rel depek pada KM 112 + 823 dan KM 112 + 898 dapat ditindaklanjuti dengan beberapa metode. Berdasarkan Peraturan Dinas 10A apabila terjadi kerusakan rel depek maka terdapat 2 alternatif program perbaikan yang bisa dilakukan, antara lain:

- 1) Pergantian rel dengan dua titik las sambung. Panjang rel pengganti yang boleh digunakan untuk perbaikan rel depek minimal 6 meter.
- 2) Pemopokan rel pada titik yang mengalami depek.

Berdasarkan Peraturan Dinas 10A, alternatif perbaikan dan perawatan harus mempertimbangkan asumsi apabila dalam jarak 25 m terdapat rel cacat memungkinkan terjadinya pembengkakan biaya pemopokan rel, maka disarankan untuk dilakukan penggantian rel. Dengan mempertimbangkan jarak rel depek yang terjadi pada lengkung hilir nomor 111.I adalah 75 meter, maka tindakan yang dapat dilakukan adalah pemopokan rel pada dua titik yang mengalami cacat yaitu pada KM 112 + 823 dan KM 112 + 898. Apabila Resor 6.8 Solobalapan memiliki ketersediaan rel pengganti, maka lebih baik dilakukan pergantian rel dikarenakan kondisi rel depek pada lengkung 111.I sudah dilakukan lebih dari 3 kali pemopokan dan kondisi kerusakan cukup parah.