

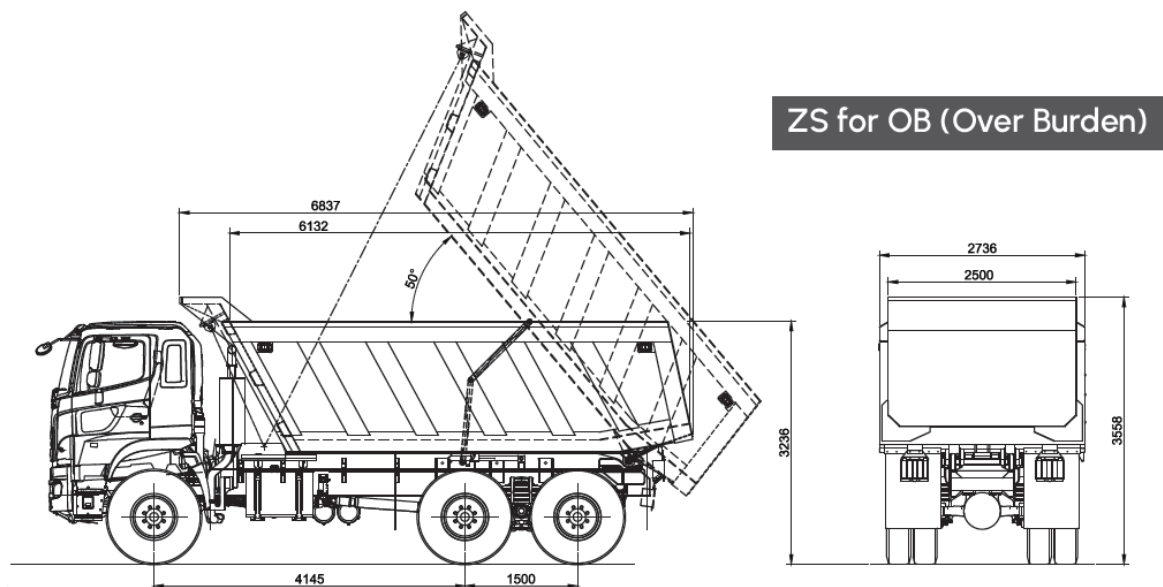
BAB IV

HASIL DAN ANALISIS PENELITIAN

4.1 Data Perencanaan Tebal Perkerasan Jalan

4.1.1 Unit Kendaraan Operasional

Beban kendaraan merupakan faktor eksternal utama yang menentukan degradasi struktur perkerasan. Perbedaan tingkat kerusakan yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya sumbu dan konfigurasi roda dari setiap jenis kendaraan yang melintas. Adapun kendaraan operasional yang digunakan untuk mengangkut batu bara dari tambang menuju pelabuhan menggunakan kendaraan Volvo FH16 *Single Vessel* dengan kapasitas angkut 85 ton dan Hino 500 FM280JD dengan kapasitas angkut di 27 ton.



Gambar 4. 1 Kendaraan Operasional Hino 500 FM280JD

Sumber : Dokumen Teknis Perencanaan

Gambar 4. 2 Kendaraan Operasional Volvo FH16 – *Single Vessel*

Sumber : Dokumen Teknis Perencanaan

4.1.2 Lalu Lintas Harian

Lalu lintas rencana ditetapkan melalui analisis kapasitas produksi tambang serta kapasitas angkut rata-rata dari kendaraan yang dioperasikan. Kendaraan Volvo yang dioperasikan adalah 40% dan kendaraan Hino yang dioperasikan oleh 60% dari total produksi tahunan batu bara.

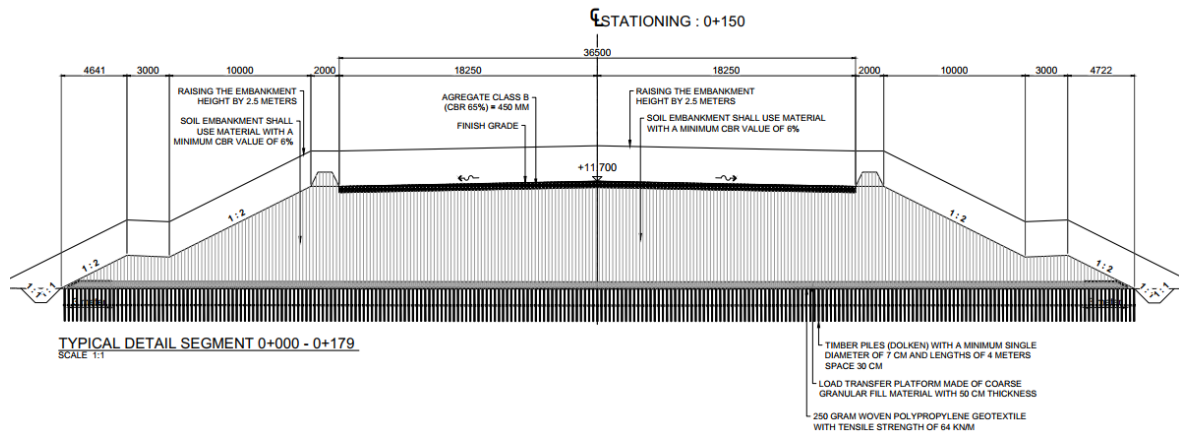
Tabel 4. 1 Populasi Kendaraan Operasional

Produksi (ton)		Populasi Unit (hari)		Total Kendaraan Perhari	Pertumbuhan Tahunan
		Volvo	Hino		
Produksi 2025	3.500.000,00	46	216	262	
Produksi 2026	4.000.000,00	52	247	299	14,29%
Produksi 2027	4.500.000,00	59	278	337	12,50%
Produksi 2028	5.000.000,00	65	309	374	11,11%
Rata-Rata Pertumbuhan Tahunan					12,63%

Sumber : Dokumen Teknis Perencanaan

4.1.3 Daya Dukung Tanah Dasar

Pada tahap perencanaan struktur perkerasan jalan, dilakukan evaluasi kondisi tanah dasar oleh ahli geoteknik dengan mempertimbangkan persyaratan teknis yang berlaku. Lokasi jalan berada pada daerah timbunan, sehingga daya dukung tanah dasar memerlukan penilaian khusus. Melalui metode perbaikan tanah yang direncanakan, nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah dasar yang digunakan sebagai parameter desain ditetapkan sebesar 6%. Penetapan nilai CBR sebesar 6% ini menunjukkan bahwa kualitas tanah dasar hasil timbunan telah ditargetkan untuk mencapai tingkat kekuatan yang memadai dan layak digunakan sebagai dasar perencanaan struktur perkerasan jalan.



Gambar 4. 3 Tipikal Desain Timbunan Segmen 0+000 – 0+179

Sumber : Dokumen Infrastructure Detailed Drawing

4.2 Analisa Kepadatan Lalu Lintas Di Area Stockpile.

Perhitungan kepadatan dan *cycle time* kendaraan tambang dilakukan untuk mengevaluasi kinerja operasional jalan angkut serta kesesuaiannya terhadap target produksi yang direncanakan. Analisis kepadatan dan *cycle time* ini menjadi dasar dalam pengambilan keputusan teknis terkait kebutuhan peningkatan kapasitas jalan angkut, pengaturan lalu lintas operasional. Jenis kendaraan yang digunakan untuk memperhitungkan waktu siklus adalah dump truk dengan kapasitas angkut 40 ton.

4.2.1 Derajat Kejenuhan (Dj)

1) Skenario 1 – *Hopper* Eksisting Beroperasi

- Waktu Penimbangan Muatan $t_1 = 2$ menit
- Kecepatan $v = 20$ km/jam = 333 m/menit
- Jarak $J = 787$ m
- Waktu Rata-Rata *Unloading* $t_2 = 2,5$ menit
- Waktu Penimbangan Kosongan $t_3 = 2$ menit
- Waktu tempuh $t_4 = \frac{L}{v} = \frac{787}{333} = 2,36$ menit
- Waktu Siklus (s):

$$s = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 2 + 2,5 + 2 + 2,36 = 8,86 \text{ menit}$$

Lalu lintas kendaraan dalam satu hari pada akhir umur rencana jalan (2028) adalah 374 kendaraan/hari.

- Arus Lalu Lintas $q = \frac{374}{24} = 16 \text{ Kendaraan/jam}$
- Kapasitas Pelayanan $C = \frac{60 \text{ menit}}{8,86 \text{ menit}} = 6,77 \approx 7 \text{ Kendaraan/jam}$
- Derajat Kejenuhan $D_j = \frac{16}{7} = 2,28 \text{ (Kondisi tidak stabil)}$

2) Skenario 2 – *Hopper* Baru Beroperasi

PT. XYZ berencana membuka jalur baru di sisi barat pelabuhan dengan menambah 3 *hopper* untuk mengurangi waktu tunggu kendaraan.

- Waktu Penimbangan Muatan $t_1 = 2 \text{ menit}$
- Kecepatan $v = 20 \text{ km/jam} = 333 \text{ m/menit}$
- Jarak $J = 931 \text{ m}$
- Waktu Rata-Rata *Unloading* $t_4 = \frac{2,5}{3} = 0,833 \text{ menit}$
- Waktu Penimbangan Kosongan $t_3 = 2 \text{ menit}$
- Waktu tempuh $t_4 = \frac{L}{v} = \frac{931}{250} = 3,10 \text{ menit}$
- Waktu Siklus (s):

$$s = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 2 + 0,83 + 2 + 3,10 = 7,93 \text{ menit}$$

- Arus Lalu Lintas $q = \frac{374}{24} = 16 \text{ Kendaraan/jam}$
- Kapasitas Pelayanan $C = \frac{60 \text{ menit}}{7,93 \text{ menit}} = 7,6 \approx 8 \text{ Kendaraan/jam}$
- Derajat Kejenuhan $D_j = \frac{16}{8} = 2 \text{ (Kondisi tidak stabil)}$

3) Skenario 3 – *Hopper* Eksisting dan *Hopper* Baru Beroperasi Bersamaan

Hopper baru melayani 9 kendaraan/jam, sehingga rasio utilitas *hopper* baru :

- Arus Lalu Lintas $q_1 = 9 \text{ Kendaraan/jam}$
- Kapasitas Pelayanan $C_1 = \frac{60 \text{ menit}}{7,93 \text{ menit}} = 7,6 \approx 8 \text{ Kendaraan/jam}$
- Derajat Kejenuhan $D_j = \frac{9}{8} = 1,1 \text{ (Kondisi tidak stabil)}$

Hopper Eksisting melayani 7 kendaraan/jam, rasio utilitas *hopper* Eksisting :

- Arus Lalu Lintas $q_2 = 7 \text{ Kendaraan/jam}$
- Kapasitas Pelayanan $C_2 = \frac{60 \text{ menit}}{8,86 \text{ menit}} = 6,77 \approx 7 \text{ Kend/jam}$
- Derajat Kejenuhan $D_j = \frac{7}{7} = 1 \text{ (Kondisi Stabil)}$

Jika nilai $D_j > 1$, artinya sistem berada dalam kondisi tidak stabil. Antrean akan terus memanjang tanpa batas selama laju kedatangan tidak berkurang. Hal ini akan menciptakan efek domino yang memperburuk *cycle time*.

Tabel 4. 2 Rasio Utilitas

No	Parameter	Eksisting	Desain
1	Kebutuhan Pergerakan Kendaraan	16 Kendaraan/Jam	
2	Waktu Penimbangan Muatan (t1)	2 menit	2 menit
3	Waktu Bongkar Muatan (t3)	2,5 menit	0,833 menit / (2,5 menit / <i>hopper</i>)
4	Waktu Penimbangan Kosongan (t2)	2 menit	2 menit
5	Kecepatan Kendaraan (V)	20 km/jam	20 km/jam
6	Jarak Tempuh (J)	787 m	931 m
7	Waktu Tempuh (t4)	2,36 menit	3,10 menit
8	Total Waktu Siklus (s)	8,86 menit	7,93 menit
9	Kapasitas Pelayanan (C)	7 Kendaraan/jam	8 Kendaraan/jam
10	Derajat Kejenuhan (Jika salah satu ruas beroperasi)	2,28 (Tidak Stabil)	2 (Tidak Stabil)
11	Arus Lalu Lintas (q)	7 Kendaraan/jam	9 Kendaraan/jam
12	Derajat Kejenuhan (Eksisting dan Desain Beroperasi)	1 (Stabil)	1,1 (Tidak Stabil)

4.2.2 Panjang Antrian

Antrian Pada Hopper Existing :

Jumlah Antrian Pada Fase Ke-1 $Nq_1 = q - C = 7 - 7 = 0$

Jumlah Antrian Pada Fase Ke-2 $Nq_2 = q = 7$

Jumlah Antrian Kendaraan Fase ke-1 $Nq = Nq_1 + Nq_2 = 0 + 7 = 7 \text{ Kend/jam}$

Antrian Pada Hopper Baru :

Jumlah Antrian Pada Fase Ke-1 $Nq_1 = q - C = 9 - 8 = 1$

Jumlah Antrian Pada Fase Ke-2 $Nq_2 = q = 9$

Jumlah Antrian Pada Fase Ke-2 $Nq = Nq_1 + Nq_2 = 1 + 9 = 10 \text{ Kend/jam}$

Jumlah Antrian Pada Fase Ke-24 $Nq = Nq_2 + (n - 1) Nq_1$

$$Nq = 9 + (24-1) 1 = 32 \text{ Kendaraan/Jam}$$

4.2.3 Lalu Lintas Maksimum Jalan Pada Hopper Baru

Kecepatan Maksimum $V = 20 \text{ km/jam} = 5,5 \text{ m/s}$

Jarak Beriringan $S = 3 \times V = 3 \times 5,5 = 16,5 \text{ m}$

Panjang Kendaraan $L = 8,67 \text{ m}$

Panjang Ruas Jalan Dibutuhkan $T = L + S = 16,5 + 8,67 = 25,17 \text{ m}$

Panjang Jalan Angkut $J = 931 \text{ m}$

Jumlah Kendaraan Maksimum di Jalan Angkut

$$N = 80\% \times \frac{J}{T} = 80\% \times \frac{931}{25,17} = 29 \text{ Kendaraan}$$

Kedua hopper saat ini beroperasi dengan tingkat beban yang tinggi, yaitu mencapai $\geq 100\%$.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki toleransi yang relatif rendah terhadap gangguan operasional, seperti kerusakan peralatan secara tiba-tiba maupun keterlambatan kedatangan unit. Nilai utilitas ≥ 1 mengindikasikan bahwa sistem berada dalam kondisi padat

(congested). Pada fase ke-24 atau menjelang akhir shift, jumlah kendaraan yang mengalami antrean mencapai 32 unit. Sementara itu, kapasitas maksimum kendaraan yang dapat berada secara bersamaan di jalan tambang adalah 29 unit. Oleh karena itu, diperlukan penyediaan buffer zone dengan kapasitas tambahan sekitar 9–10 kendaraan untuk mengantisipasi antrean dan menjaga kelancaran operasional.

4.3 Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Pertumbuhan lalu lintas merupakan peningkatan volume dan beban lalu lintas yang terjadi secara bertahap selama umur rencana jalan. Penentuan tingkat pertumbuhan lalu lintas umumnya didasarkan pada data historis, proyeksi aktivitas di wilayah studi, serta faktor-faktor pendukung lain yang berpengaruh terhadap intensitas pergerakan kendaraan. Adapun laju pertumbuhan kendaraan sebagai berikut:

Lalu lintas pada tahun 2025 = 46 Kendaraan

Lalu lintas pada tahun 2028 = 65 Kendaraan

$$i = \left\{ \left(\frac{P_t}{P_0} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \right\} \times 100 = \left\{ \left(\frac{65}{46} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} \times 100 = 12,62\%$$

4.4 Faktor Umur Rencana (N)

Faktor umur rencana digunakan sebagai dasar perhitungan akumulasi beban lalu lintas yang diterima perkerasan selama periode pelayanan rencana. Perhitungan pertumbuhan lalu lintas sepanjang umur rencana dilakukan dengan menggunakan faktor pertumbuhan kumulatif (*Cumulative Growth Factor*) sebagai berikut:

Umur rencana jalan (UR) = 10 tahun

Pertumbuhan lalu lintas (i) = 12,62%

$$N = \frac{[(1 + i)^{UR} - 1]}{i} = \frac{[(1 + 12,62\%)^{10} - 1]}{12,62\%} = 18,08$$

4.5 Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor (VDF)*)

Vehicle Damage Factor (VDF) merupakan faktor yang digunakan untuk menyatakan tingkat kerusakan relatif yang ditimbulkan oleh suatu jenis kendaraan terhadap struktur perkerasan jalan. Nilai VDF menunjukkan besarnya kontribusi kerusakan kendaraan terhadap perkerasan jika dibandingkan dengan beban sumbu standar.

4.5.1 Faktor Ekuivalen Beban Volvo FH16

Beban sumbu depan (STRT) = 10.330 kg

Beban sumbu tengah (STdRG) = 36.499 kg

Beban sumbu belakang (SQdRG) = 78.666 kg

4.5.1.1 Sumbu Tunggal Roda Tunggal (STRT)

Beban Sumbu $L_{ij} = 10.330 \text{ kg}$

$$L_{ij} = 101,23 \text{ kN}$$

Standar Beban $SL_i = 53 \text{ kN}$

Ekuivalen Sumbu Standar $ESA^4(1) = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i}\right)^4 = \left(\frac{101,23}{53}\right)^4 = 13,31$

4.5.1.2 Sumbu Tandem Roda Ganda

Beban Sumbu $L_{ij} = 36.499 \text{ kg}$

$$L_{ij} = 357,69 \text{ kN}$$

Standar Beban $SL_i = 135 \text{ kN}$

Ekuivalen Sumbu Standar $ESA^4(2) = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i}\right)^4 = \left(\frac{357,69}{135}\right)^4 = 49,28$

4.5.1.3 Sumbu Empat Roda Ganda

Beban Sumbu $L_{ij} = 78666 \text{ kg}$

$$L_{ij} = 770,92 \text{ kN}$$

Standar Beban $SL_i = 226 \text{ kN}$

Ekuivalen Sumbu Standar $ESA^4(2) = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i}\right)^4 = \left(\frac{770,92}{226}\right)^4 = 135,40$

Tabel 4. 3 Faktor Ekuivalen Beban Kendaraan Volvo FH16

Sumbu	Beban (kg)	Beban (kN)	Tipe Sumbu	Standar Beban (kN)	Ekuivalen Beban Sumbu
Depan	10.330	101,23	STRT	53	13,31
Tengah	36.499	357,69	STdRG	135	49,28
Belakang	78.666	770,92	SQdRG	226	135,40
				VDF	197,99

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan diatas didapat untuk ESAL/VDF untuk Volvo FH16 adalah 197,99.

4.5.2 Faktor Ekuivalen Beban Hino 500 FM280JD

Beban sumbu depan (STRT) $= 6.700 \text{ kg}$

Beban sumbu tengah (STdRG) $= 26.800 \text{ kg}$

4.5.2.1 Sumbu Tunggal Roda Tunggal (STRT)

Beban Sumbu $L_{ij} = 6.700 \text{ kg}$

$L_{ij} = 65,66 \text{ kN}$

Standar Beban $SL_i = 53 \text{ kN}$

Ekuivalen Sumbu Standar $ESA^4(1) = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i}\right)^4 = \left(\frac{65,66}{53}\right)^4 = 2,36$

4.5.2.2 Sumbu Tandem Roda Ganda

Beban Sumbu $L_{ij} = 26.800 \text{ kg}$

$L_{ij} = 262,64 \text{ kN}$

Standar Beban $SL_i = 135 \text{ kN}$

Ekuivalen Sumbu Standar $ESA^4(2) = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i}\right)^4 = \left(\frac{262,64}{135}\right)^4 = 14,32$

Tabel 4. 4 Faktor Ekuivalen Beban Kendaraan Hino 500 FM280JD

Sumbu	Beban (kg)	Beban (kN)	Tipe Sumbu	Standar Beban (kN)	Ekuivalen Beban Sumbu
Depan	6.700	65,66	STRT	53	2,36
Belakang	26.800	262,64	SQdRG	135	14,32
				VDF	16,68

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan diatas didapat untuk ESAL/VDF untuk Hino 500 FM280JD adalah 16,68.

Tabel 4. 5 Faktor Ekuivalen Kendaraan Rencana

No.	Jenis Kendaraan	VDF
1.	Kendaraan Volvo FH16	197,99
2.	Kendaraan Hino 500 FM280JD	16,68

4.6 Beban Sumbu Standar Kumulatif

Beban Sumbu Standar Kumulatif (*Cumulative Equivalent Standard Axle Load / CESAL*) merupakan akumulasi beban lalu lintas yang dinyatakan dalam beban sumbu standar selama umur rencana perkerasan. Nilai CESAL digunakan sebagai dasar perencanaan untuk menentukan kemampuan struktur perkerasan dalam menahan beban lalu lintas rencana.

Faktor distribusi lajur, $D_L = 100\%$ (Berdasarkan Tabel 2. 4)

Faktor distribusi arah, $D_A = 100\%$

Jumlah hari kerja $D = 360$ hari

Umur rencana jalan $n = 10$ tahun

Pertumbuhan lalu lintas $i = 12,62\%$

Faktor umur rencana $N = 18,08$

$$CESAL = \sum LHR \times VDF_i \times D_A \times D_L \times 360 \times N$$

Kelas Kendaraan	Jenis Kendaraan	LHR	VDF4	ESAL
7C4	Volvo FH16 - Single Trailer	46	197,99	59.279.156,35

7A2	Hino 500 FM280JD - Rigid Truck	216	16,68	23.450.425,34
Beban Sumbu Kumulatif (CESAL)				82.729.581,69

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai lalu lintas ekuivalen rencana jalan selama umur rencana 10 tahun sebesar 82.729.581,69.

4.7 Analisis Tebal Perkerasan Jalan

4.7.1 Tebal Perkerasan Berbutir

Struktur perkerasan dengan lapis agregat tanpa penutup :

1. Beban rencana 82.729.581,69 ESA4
2. CBR desain tanah dasar 6%

Langkah – 1 : Memilih jenis dan ketebalan lapis agregat

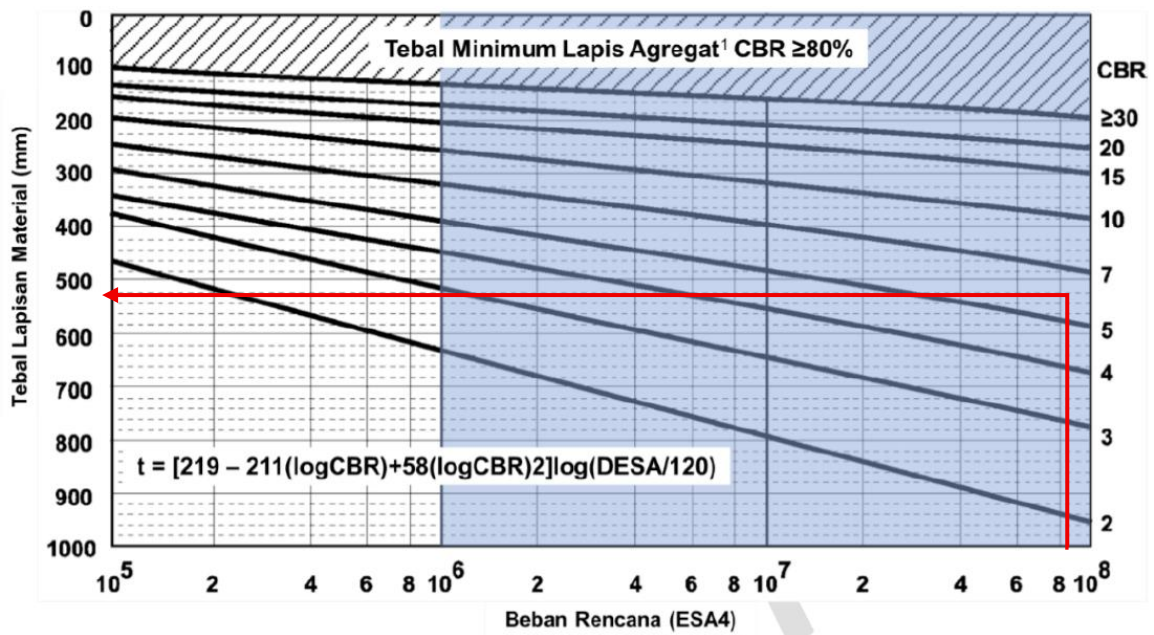
Dari melalui persamaan atau grafik pada Gambar 4. 4 untuk beban rencana 82.729.581,69 ESA4, di atas tanah dasar dengan CBR desain 6% diperlukan lapis penutup dengan tebal total 525,06 mm.

Ditunjukkan pula pada Gambar 4. 5 bahwa tebal minimum lapisan permukaan agregat 197,79 mm ($\text{CBR} \geq 80\%$) di atas lapisan fondasi dengan $\text{CBR} \geq 30\%$ dengan tebal 327,27 mm (dengan kata lain 525,06 – 197,79).

Tebal total material ditingkatkan menjadi 530mm, untuk Lapis Fondasi Atas (LFA) digunakan agregat kelas A dengan ketebalan 200 mm dan untuk lapisan fondasi bawah (LFB) kelas B dapat digunakan ketebalan praktis 330 mm.

Langkah – 2 : Periksa apakah total struktur perkerasan memenuhi syarat ketebalan lapis agregat tanpa penutup diatas tanah dasar

Dengan demikian struktur lapis agregat perkerasan diatas tanah dasar menjadi: 200 mm LFA kelas A + 320 mm LFB Kelas B atau total 520 mm ($>512,14$ mm persyaratan tebal minimum diatas tanah dasar dengan CBR 6%).

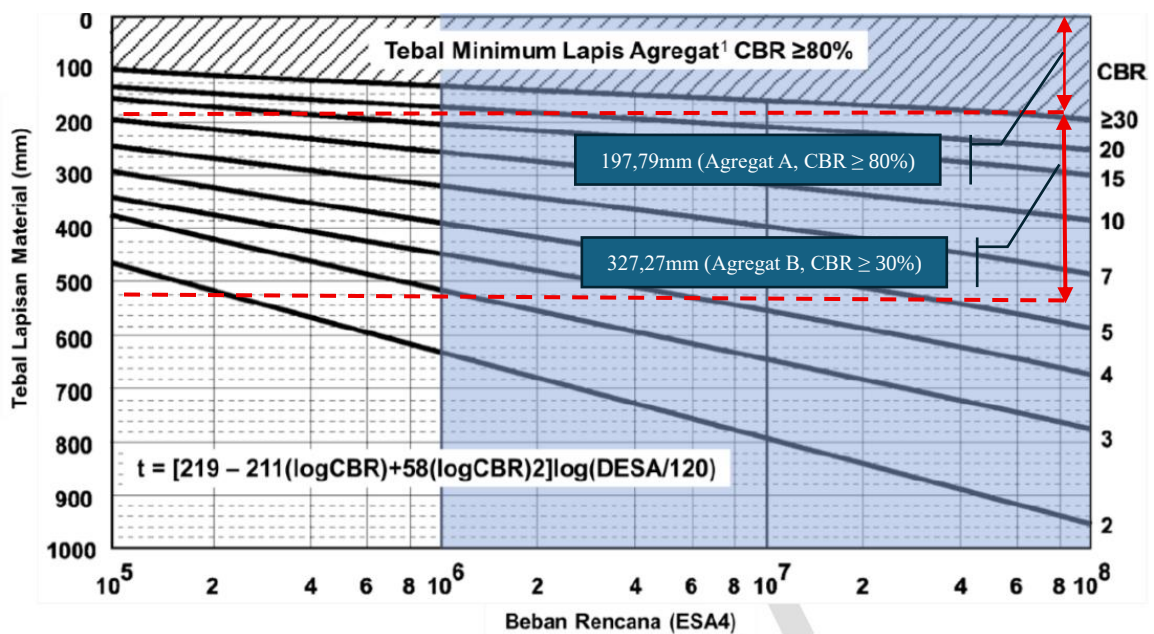


Gambar 4. 4 Penentuan Tebal Perkerasan Berbutir

$$t = [219 - 211(\log \text{CBR}) + 58(\log \text{CBR})^2] \log(\text{DESA}/120)$$

$$t = [219 - 211(\log 6) + 58(\log 6)^2] \log(82.729.581,69/120)$$

$$t = 525,06 \text{ mm}$$



Gambar 4. 5 Kontrol Tebal Minimum Setiap Lapisan Perkerasan

Berdasarkan perhitungan diatas untuk tanah dasar dengan CBR desain 6% membutuhkan lapisan perkerasan berbutir setebal 525,06 mm dengan sifat-sifat material yang tersedia yaitu Lapis Permukaan dengan Agregat ($\text{CBR} \geq 80\%$) dan Lapis Fondasi dengan ($\text{CBR} \geq 30\%$). Ketebalan dapat ditingkatkan menjadi 530 mm dengan struktur perkerasan sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Struktur Perkerasan Minimum

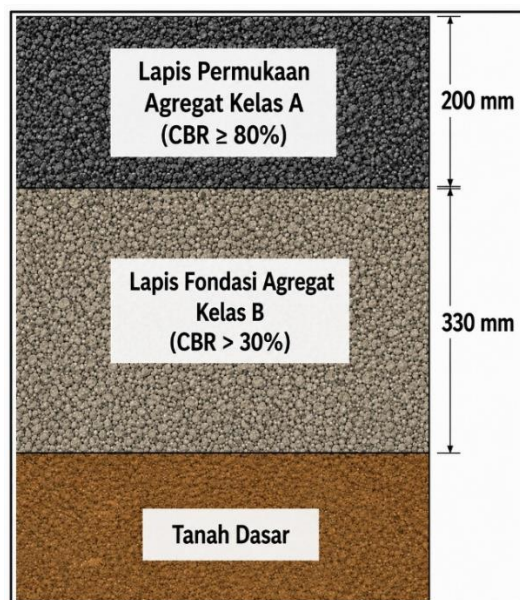
Perkerasan	CBR	Tebal Perkerasan Desain
LFA	$\geq 80\%$	197,79 mm
LFB	$\geq 30\%$	327,27 mm
Tanah Dasar CBR > 6 %		

(Sumber : Olahan Penulis, 2026)

Tabel 4. 7 Struktur Perkerasan Desain

Perkerasan	CBR	Tebal Perkerasan Desain
LFA	$\geq 80\%$	200 mm
LFB	$\geq 30\%$	330 mm
Tanah Dasar CBR > 6 %		

(Sumber : Olahan Penulis, 2026)



Gambar 4. 6 Struktur Perkerasan Desain

(Sumber : Olahan Penulis, 2026)

Perkerasan jalan dengan lapis pondasi agregat berbutir setebal 530 mm digunakan karena dianggap mampu menyebarkan beban lalu lintas secara merata ke tanah dasar. Namun, muncul perdebatan mengenai seberapa besar peran geometri drainase melintang, seperti kemiringan permukaan (crown) dan saluran samping, dalam menentukan daya tahan lapisan tersebut. Secara teoritis bahwa ketebalan 530 mm sudah cukup memberikan kekuatan struktural, sebab agregat berbutir memiliki daya dukung dan kapasitas penyebaran beban. Selain itu, kualitas material agregat, tingkat pemadatan, dan nilai CBR tanah dasar dianggap sebagai faktor yang lebih dominan dibandingkan geometri drainase semata. Di sisi lain, ketebalan lapisan berbutir tidak akan bertahan lama apabila air hujan tidak segera dialirkan dari permukaan jalan. Kemiringan melintang yang tidak memadai, biasanya minimal 2–4%, dapat menyebabkan genangan air yang meresap ke dalam lapisan agregat, memicu penurunan daya dukung akibat pelunakan (stripping), pemompaan halus (pumping), hingga kerusakan struktural seperti alur dan amblas meskipun tebal lapisan sudah mencukupi secara teoritis.