

BAB III LANDASAN TEORI

A. Metode dengan Alat Bengkelman Beam

1. Menghitung repitisi beban lalu lintas rencana (CESA) dalam ESA

a. Jumlah Lajur dan Koefisien Distribusi Kendaraan (C)

Lajur rencana merupakan salah satu lajur lalu lintas dari suatu ruas jalan, yang menampung lalu-lintas terbesar. Jika jalan tidak memiliki tanda batas lajur, maka jumlah lajur ditentukan dari lebar perkerasan sesuai.

b. Faktor Ekuivalen

Faktor Ekuivalen (FE) merupakan faktor konversi beban sumbu kendaraan terhadap sumbu kendaraan berdasarkan pengelompokan jenis kendaraan masing-masing.

c. Faktor hubungan umur rencana dan perkembangan lalu lintas (N)

Adapun analisis hubungan umur rencana dan perkembangan lalu lintas dilakukan berdasarkan umur rencana yang akan kita gunakan atau dapat dianalisis sesuai Persamaan 3.6.

d. Akumulasi ekuivalen beban sumbu standar (CESA)

Akumulasi ekuivalen beban sumbu standar (CESA) dalam satuan ESA merupakan akumulasi beban seluruh jenis kendaraan sesuai dengan umur rencana yang kita tentukan. Adapun analisis CESA dapat ditentukan dengan Persamaan 3.1.

$$CESA = \sum_{\text{Traktor-Trailer}} m \times 365 \times E \times C \times N \dots\dots\dots (3.1)$$

Keterangan :

CESA = Akumulasi ekuivalen beban sumbu standar

m = Jumlah masing-masing jenis kendaraan

365 = Jumlah hari dalam satu tahun

E = Ekuivalen beban sumbu (Tabel 3.3)

C = Koefisien distribusi kendaraan (Tabel 3.2)

N = Faktor hubungan umur rencana yang sudah disesuaikan dengan perkembangan lalu lintas (Tabel 3.4)

Tabel 3.1 Koefisien Distribusi Kendaraan (C)

Jumlah Lajur	Kendaraan ringan*)		Kendaraan berat**)	
	1 arah	2 arah	1 arah	2 arah
1	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,60	0,50	0,70	0,50
3	0,40	0,40	0,50	0,475
4	-	0,30	-	0,45
5	-	0,25	-	0,425
6	-	0,20	-	0,40

Keterangan : *) Mobil Penumpang

***) Truk dan Bus

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

Angka ekivalen (E) masing-masing golongan beban sumbu tiap kendaraan ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

$$\text{Angka Ekivalen STRT} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{5,40} \right]^4$$

(3.2)

$$\text{Angka Ekivalen STRG} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{8,16} \right]^4$$

(3.3)

$$\text{Angka Ekivalen SDRG} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{13,76} \right]^4$$

(3.4)

$$\text{Angka Ekivalen STrRG} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{18,45} \right]^4$$

(3.5)

Tabel 3.2 Ekivalen Beban Sumbu Kendaraan (E)

Beban sumbu (ton)	Ekivalen beban sumbu kendaraan (E)			
	STRT	STRG	SDRG	STrRG
1	0,00118	0,00023	0,00003	0,00001
2	0,01882	0,00361	0,00045	0,00014
3	0,09526	0,01827	0,00226	0,00070
4	0,30107	0,05774	0,00714	0,00221

Tabel 3.2 Ekuivalen Beban Sumbu Kendaraan (E) (Lanjutan)

Beban sumbu (ton)	Ekuivalen beban sumbu kendaraan (E)			
	STRT	STRG	SDRG	STrRG
5	0,73503	0,14097	0,01743	0,00539
6	1,52416	0,29231	0,03615	0,01118
7	2,82369	0,54154	0,06698	0,02072
8	4,81709	0,92385	0,11426	0,03535
9	7,71605	1,47982	0,18302	0,05662
10	11,76048	2,25548	0,27895	0,08630

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

Dari data lalu lintas harian rata-rata, selanjutnya menghitung faktor hubungan umur rencana dan perkembangan lalu lintas menggunakan persamaan berikut :

$$N = 0,5 \frac{1 + (1+r)^n + 2(1+r) \frac{(1+r)^n - 1}{r}}{\dots} \dots \dots \dots (3. 6)$$

Tabel 3.3 Nilai N (hubungan antara umur rencana dengan perkembangan lalu lintas)

n Tahun	r (%)					
	2	4	5	6	8	10
1	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05
2	2,04	2,08	2,10	2,12	2,16	2,21
3	3,09	3,18	3,23	3,28	3,38	3,48
4	4,16	4,33	4,42	4,51	4,69	4,87
5	5,26	5,52	5,66	5,81	6,10	6,41
6	6,37	6,77	6,97	7,18	7,63	8,10
7	7,51	8,06	8,35	8,65	9,28	9,96
8	8,67	9,40	9,79	10,19	11,06	12,01
9	9,85	10,79	11,30	11,84	12,99	14,26
10	11,06	12,25	12,89	13,58	15,07	16,73
11	12,29	13,76	14,56	15,42	17,31	19,46
12	13,55	15,33	16,32	17,38	19,74	22,45
13	14,83	16,96	18,16	19,45	22,36	25,75
14	16,13	18,66	20,09	21,65	25,18	29,37
15	17,47	20,42	22,12	23,97	28,24	33,36
20	24,54	30,37	33,89	37,89	47,59	60,14
25	32,35	42,48	48,92	56,51	76,03	103,26
30	40,97	57,21	68,10	81,43	117,81	172,72

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

Tabel 3.4 Jumlah Lajur Berdasarkan Lebar Perkerasan

Lebar Perkerasan (L)	Jumlah Lajur
$L < 4,50 \text{ m}$	1
$4,50 \text{ m} \leq L < 8,00 \text{ m}$	2
$8,00 \text{ m} \leq L < 11,25 \text{ m}$	3
$11,25 \text{ m} \leq L < 15,00 \text{ m}$	4
$15,00 \text{ m} \leq L < 18,75 \text{ m}$	5
$18,75 \text{ m} \leq L < 22,50 \text{ m}$	6

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

2. Lendutan dengan *Benkelman Beam*

Lendutan yang digunakan untuk perencanaan adalah lendutan yang berdasarkan hasil pengujian lapangan dengan menggunakan alat *Benkelman Beam* (BB). Nilai lendutan tersebut harus dikoreksi dengan faktor muka air tanah (faktor musim) dan koreksi temperatur serta faktor koreksi beban uji (apabila beban tidak tepat sebesar 8,16 ton). Besarnya lendutan balik yaitu Persamaan 3.7 berikut :

$$d_B = 2 \times (d_3 - d_1) \times Ft \times Ca \times FK_{B-BB} \dots\dots\dots (3.7)$$

Keterangan :

d_B = Lendutan Balik (mm)

d_1 = Lendutan pada saat beban berada pada titik pengukuran (mm)

d_3 = Lendutan pada saat beban berada pada jarak 6 meter dari titik pengukuran

F_t = Faktor penyesuaian lendutan terhadap temperatur standar 35° C, yang nilainya ditentukan menggunakan Persamaan 3.8 dan 3.9 atau melalui pembacaan grafik pada gambar 3.1 serta dapat pula ditentukan melalui tabel 3.5 sebagai berikut :

$$F_t = 4,184 \times T_L^{-0,4025} \text{ untuk } H_L < 10 \text{ cm} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$F_t = 14,785 \times T_L^{-0,7573} \text{ untuk } H_L \geq 10 \text{ cm} \dots\dots\dots (3.9)$$

Keterangan:

T_L = Temperatur lapis beraspal, diperoleh dari hasil pengukuran langsung dilapangan atau dapat ditentukan melalui prediksi berdasarkan temperatur udara di lapangan dengan menggunakan Persamaan 3.8 berikut:

$$T_L = \frac{1}{3} (T_p + T_t + T_b) \dots\dots\dots(3.10)$$

Keterangan:

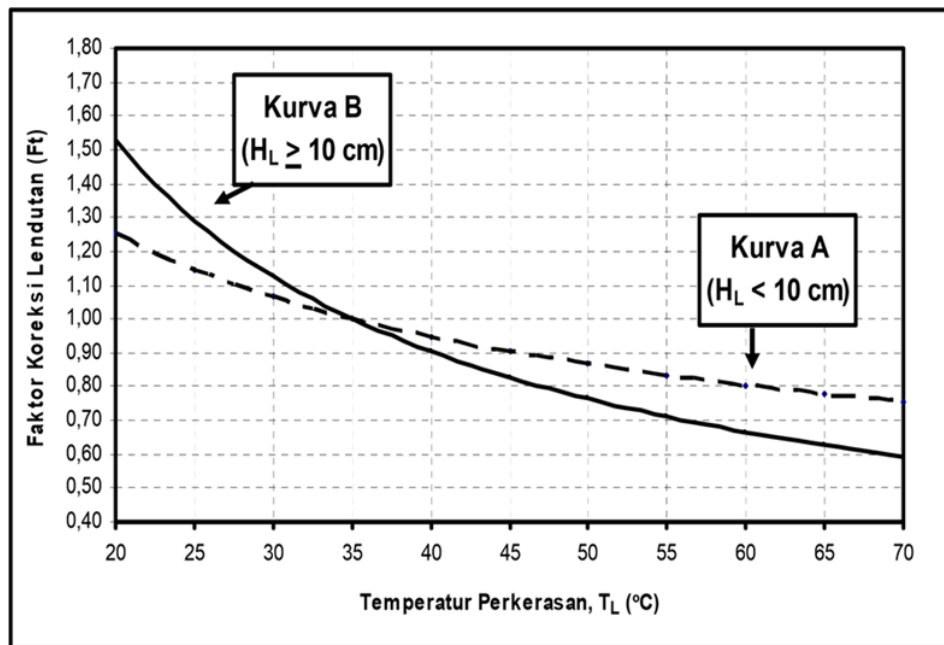
T_p = Temperatur permukaan lapis beraspal

T_t = Temperatur tengah lapis beraspal (Tabel 3.8.)

T_b = Temperatur bawah lapis beraspal (Tabel 3.8.)

Ca = Faktor pengaruh muka air tanah (faktor musim)
 = 1,20 ; musim kemarau atau muka air tanah rendah
 = 0,9 ; musim hujan atau muka air tinggi

FK_{B-BB} = Faktor koreksi beban uji *Benkelman Beam* (BB)
 = $77,343 \times (\text{beban uji dalam ton})^{(-2,0715)} \dots\dots\dots(3.9)$



Gambar 3.1 Faktor koreksi lendutan terhadap temperatur standar (Ft)

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

Tabel 3.5 Faktor Koreksi Lendutan Terhadap Temperatur Standar (Ft)

T _L (°C)	Faktor Koreksi (Ft)		T _L (°C)	Faktor Koreksi (Ft)	
	Kurva A (H _L < 10 cm)	Kurva B (H _L ≥ 10 cm)		Kurva A (H _L < 10 cm)	Kurva B (H _L ≥ 10 cm)
20	1,25	1,53	46	0,90	0,81
22	1,21	1,42	48	0,88	0,79
24	1,16	1,33	50	0,87	0,76
26	1,13	1,25	52	0,85	0,74

Tabel 3.5 Faktor Koreksi Lendutan Terhadap Temperatur Standar (Ft)
(Lanjutan)

T _L (°C)	Faktor Koreksi (Ft)		T _L (°C)	Faktor Koreksi (Ft)	
	Kurva A (H _L < 10 cm)	Kurva B (H _L ≥ 10 cm)		Kurva A (H _L < 10 cm)	Kurva B (H _L ≥ 10 cm)
28	1,09	1,19	54	0,84	0,72
30	1,06	1,13	56	0,83	0,70
32	1,04	1,07	58	0,82	0,68
34	1,01	1,02	60	0,81	0,67
36	0,99	0,98	62	0,79	0,65
38	0,97	0,94	64	0,78	0,63
40	0,95	0,90	66	0,77	0,62
42	0,93	0,87	68	0,77	0,61
44	0,91	0,84	70	0,76	0,59

Keterangan:

- Kurva A adalah faktor koreksi (Ft) untuk tebal lapis beraspal (HL) kurang dari 10 cm.
- Kurva B adalah faktor koreksi (Ft) untuk tebal lapis beraspal (HL) minimum 10 cm.

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

Tabel 3.6 Temperatur Tengah (Tt) dan Bawah (Tb) Lapis Beraspal Berdasarkan
Data Temperatur Udara (Tu) dan Temperatur Permukaan (Tp)

Tu + Tp (°C)	Temperatur lapis beraspal (°C) pada kedalaman					
	2,5 cm	5,0 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm
45	26,8	25,6	22,8	21,9	20,8	20,1
46	27,4	26,2	23,3	22,4	21,3	20,6
47	28,0	26,7	23,8	22,9	21,7	21,0
48	28,6	27,3	24,3	23,4	22,2	21,5
49	29,2	27,8	24,7	23,8	22,7	21,9
50	29,8	28,4	25,2	24,3	23,1	22,4
51	30,4	28,9	25,7	24,8	23,6	22,8
52	30,9	29,5	26,2	25,3	24,0	23,3
53	31,5	30,0	26,7	25,7	24,5	23,7
54	32,1	30,6	27,1	26,2	25,0	24,2
55	32,7	31,2	27,6	26,7	25,4	24,6
56	33,3	31,7	28,1	27,2	25,9	25,1
57	33,9	32,3	28,6	27,6	26,3	25,5
58	34,5	32,8	29,1	28,1	26,8	26,0
59	35,1	33,4	29,6	28,6	27,2	26,4

Tabel 3.6 Temperatur Tengah (Tt) dan Bawah (Tb) Lapis Beraspal Berdasarkan Data Temperatur Udara (Tu) dan Temperatur Permukaan (Tp) (Lanjutan)

Tu + Tp (°C)	Temperatur lapis beraspal (°C) pada kedalaman					
	2,5 cm	5,0 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm
60	35,7	33,9	30,0	29,1	27,7	26,9
61	36,3	34,5	30,5	29,5	28,2	27,3
62	36,9	35,1	31,0	30,0	28,6	27,8
63	37,5	35,6	31,5	30,5	29,1	28,2
64	38,1	36,2	32,0	31,0	29,5	28,7
65	38,7	36,7	32,5	31,4	30,0	29,1
66	39,3	37,3	32,9	31,9	30,5	29,6
67	39,9	37,8	33,4	32,4	30,9	30,0
68	40,5	38,4	33,9	32,9	31,4	30,5
69	41,1	39,0	34,4	33,3	31,8	30,9
70	41,7	39,5	34,9	33,8	32,3	31,4
71	42,2	40,1	35,4	34,3	32,8	31,8
72	42,8	40,6	35,8	34,8	33,2	32,3
73	43,4	41,2	36,3	35,2	33,7	32,8
74	44,0	41,7	36,8	35,7	34,1	33,2
75	44,6	42,3	37,3	36,2	34,6	33,7
76	45,2	42,9	37,8	36,7	35,0	34,1
77	45,8	43,4	38,3	37,1	35,5	34,6
78	46,4	44,0	38,7	37,6	36,0	35,0
79	47,0	44,5	39,2	38,1	36,4	35,5
80	47,6	45,1	39,7	38,6	36,9	35,9
81	48,2	45,6	40,2	39,0	37,3	36,4
82	48,8	46,2	40,7	39,5	37,8	36,8
83	49,4	46,8	41,2	40,0	38,3	37,3
84	50,0	47,3	41,6	40,5	38,7	37,7
85	50,6	47,9	42,1	40,9	39,2	38,2

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

3. Keseragaman Lendutan

Perhitungan tebal lapis tambah dapat dilakukan pada setiap titik pengujian atau berdasarkan panjang segmen (seksi). Apabila berdasarkan panjang seksi maka cara menentukan panjang perseksi jalan harus dipertimbangkan terhadap keseragaman lendutan. Keseragaman yang dipandang sangat baik mempunyai rentang faktor keseragaman antara 0 sampai dengan 10, antara 11 sampai

dengan 20 keseragaman baik dan antara 21 sampai dengan 30 keseragaman cukup baik. Untuk menentukan faktor keseragaman lendutan adalah dengan menggunakan Persamaan 3.11 sebagai berikut:

$$FK = s/d_R \times 100\% < FK \text{ ijin} \dots\dots\dots (3.11)$$

Keterangan :

FK = Faktor keseragaman.

FK ijin = Faktor keseragaman yang diijinkan.
 = 0 % - 10 %; keseragaman sangat baik.
 = 11% - 20%; keseragaman baik.
 = 21% - 30 %; keseragaman cukup baik.

d_R = Lendutan rata-rata pada suatu seksi jalan.
 $= \frac{\sum_1^{n_s} d}{n_s} \dots\dots\dots (3.12)$

s = Deviasi standar/simpang baku
 $= \sqrt{\frac{n_s(\sum_1^{n_s} d^2) - (\sum_1^{n_s} d)^2}{n_s(n_s - 1)}} \dots\dots\dots (3.13)$

d = Nilai lendutan balik (d_B) atau lendutan langsung (d_L) tiap titik pemeriksaan pada suatu seksi jalan.

n_s = Jumlah titik pemeriksaan pada suatu seksi jalan.

4. Lendutan rencana/ijin ($D_{rencana}$)

Hitung lendutan rencana/ijin ($D_{rencana}$) dengan menggunakan Persamaan 3.14 untuk lendutan dengan alat FWD dan Persamaan 3.15 untuk lendutan dengan alat *Benkleman Beam* (BB):

$$D_{rencana} = 17,004 \times CESA^{(-0,2307)} \dots\dots\dots (3.14)$$

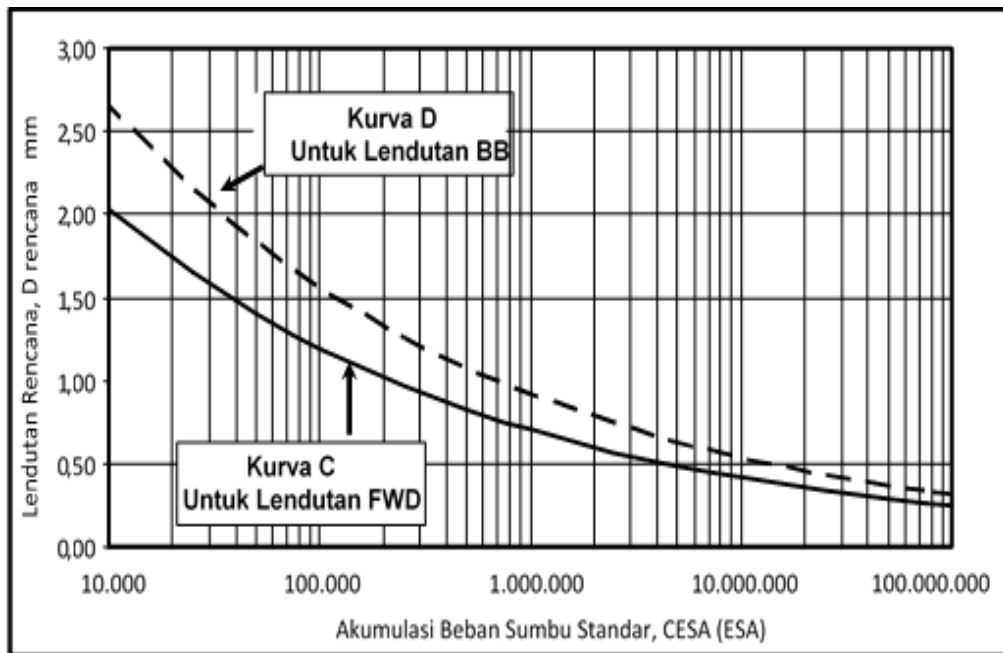
$$D_{rencana} = 22,208 \times CESA^{(-0,2307)} \dots\dots\dots (3.15)$$

Keterangan :

$D_{rencana}$ = Lendutan rencana, dalam satuan milimeter.

CESA = Akumulasi ekivalen beban sumbu standar, dalam satuan ESA atau dengan memplot data lalu-lintas rencana (CESA) pada Gambar 3.4 Kurva

C untuk lendutan dengan alat FWD dan Gambar 3.4 Kurva D untuk lendutan balik dengan alat *Benkleman Beam* (BB).



Gambar 3.2 Hubungan Antara Lendutan Rencana dan Lalu lintas

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

5. Lendutan wakil (D_{wakil})

Untuk menentukan besarnya lendutan yang mewakili suatu sub ruas/seksi jalan, digunakan Persamaan 3.16, 3.17 dan 3.18 yang disesuaikan fungsi/kelas jalan, yaitu:

- a. Untuk jalan arteri atau jalan tol (tingkat kepercayaan 98%);

$$D_{\text{wakil}} = d_R + 2s \dots\dots\dots (3.16)$$

- b. Untuk jalan kolektor (tingkat kepercayaan 95%);

$$D_{\text{wakil}} = d_R + 1,64s \dots\dots\dots (3.17)$$

- c. Untuk jalan lokal (tingkat kepercayaan 90%);

$$D_{\text{wakil}} = d_R + 1,28s \dots\dots\dots (3.18)$$

Keterangan:

D_{wakil} = Lendutan yang mewakili suatu seksi jalan

d_R = Lendutan rata-rata pada suatu seksi jalan

s = Standar deviasi (simpangan baku)

6. Hitung tebal lapis tambahan/overlay (Ho) sebelum dikoreksi

Menghitung tebal lapis tambahan atau *overlay* (Ho) dengan menggunakan Persamaan 3.19 atau dapat diplotkan berdasarkan grafik hubungan antara lendutan sebelum overlay dengan lendutan setelah overlay pada Gambar 3.15.

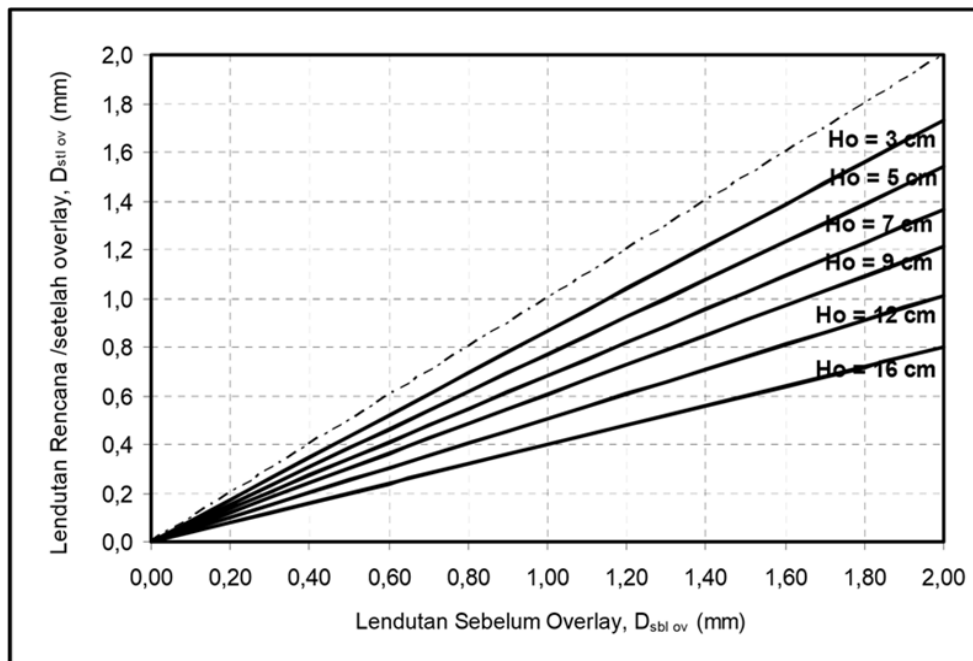
$$H_o = \frac{[\ln(1,0364) + \ln(D_{sbl\ ov}) - \ln(D_{stl\ ov})]}{0,0597} \dots\dots\dots (3.19)$$

Keterangan:

H_o = Tebal lapis tambah, sebelum dikoreksi dengan temperatur perkerasan rata-rata tahunan daerah tertentu (cm)

D_{sbl ov} = Lendutan sebelum lapis tambah atau D_{wakil} (mm)

D_{stl ov} = Lendutan setelah lapis tambah atau D_{rencana} (mm)



Gambar 3.3 Tebal Lapis Tambahan/Overlay (Ho)

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B

7. Jenis Lapis Tambah

Pedoman Pd. T-05-2005-B ini berlaku untuk lapis tambah dengan Laston, yaitu modulus resilien (MR) sebesar 2000 MPa dan Stabilitas Marshall minimum 800 kg. Nilai modulus resilien (MR) diperoleh berdasarkan pengujian UMATTA atau alat lain dengan temperatur pengujian 25°C. Apabila jenis campuran beraspal untuk lapis tambah menggunakan Laston Modifikasi dan

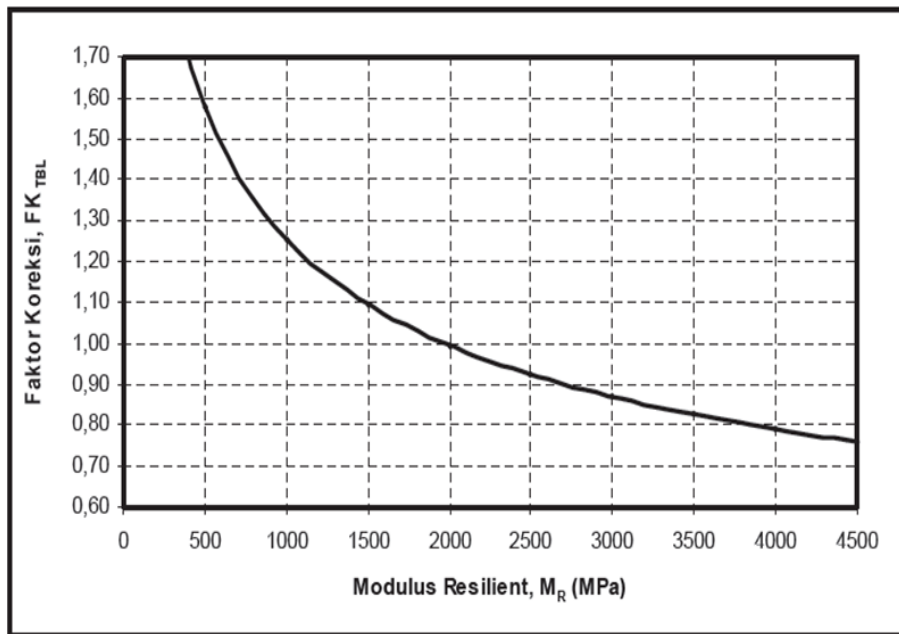
Lataston atau campuran beraspal yang mempunyai sifat berbeda (termasuk untuk Laston) dapat menggunakan faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian (FK_{TBL}) sesuai Persamaan 3.20 atau Gambar 3.17 dan Tabel 3.9

$$FK_{TBL} = 12,51 \times M_R^{(-0,333)} \dots\dots\dots(3.20)$$

Keterangan:

FK_{TBL} = Faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian

M_R = Modulus resilien (MPa)



Gambar 3.4 Faktor Korelasi Tebal Lapis Tambah/Overlay (Fo)

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

Tabel 3.7 Faktor Koreksi Tebal Lapis Tambah Penyesuaian (FK_{TBL})

Keterangan	Laston Modifikasi	Laston	Lataston
Modulus Resilien (MPa)	3000	2000	1000
Stabilitas Marshall (Kg)	Min. 1000	Min. 800	Min. 800
FK _{TBL}	0,85	1,00	1,23

Sumber: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.

B. Uji Lendutan Pada Perkerasan Lentur

Pada dasarnya alat yang digunakan untuk pengujian lendutan pada perkerasan jalan adalah dengan alat yaitu *Benkelman Beam* (BB) yang diletakkan pada lapisan *surface* perkerasan lentur untuk mengukur lendutan balik maksimum, lendutan balik titik belok dan cekung lendutan yang dihasilkan dari beban kendaraan yang disalurkan melalui roda, yang mana pengujiannya dilakukan dengan alat *Benkelman Beam* (BB) tersebut yang tidak menyebabkan kerusakan pada konstruksi perkerasan jalan (*nondestruktif*).

Berdasarkan pada SNI 2416:2011 mengenai Pedoman Cara Uji Lendutan Perkerasan Lentur dengan alat *Benkelman Beam* yang mempunyai tiga jenis pengukuran yang dilakukan yaitu :

1. Lendutan maksimum balik (*Maximum Rebound Deflection*)

Merupakan besarnya lendutan balik perkerasan pada kedudukan di titik kontak batang *Benkelman Beam* setelah beban berpindah sejauh 6 meter.

2. Cekung lendutan (*Bowl Deflection*)

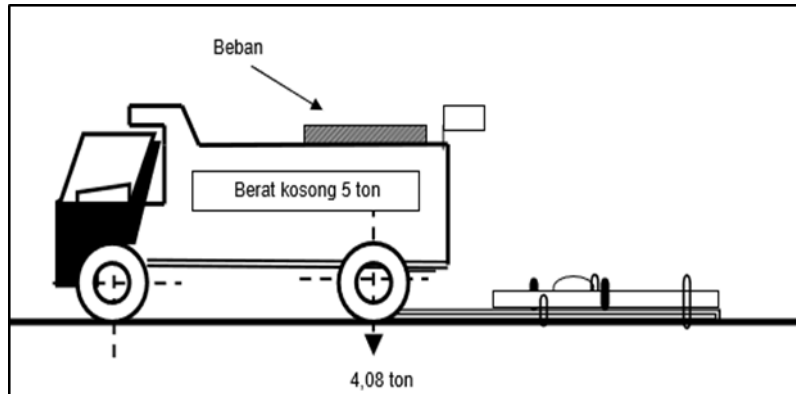
Merupakan jurva yang menggambarkan bentuk lendutan dari suatu segmen perkerasan pada jalan yang disebabkan oleh penyaluran dari ban kendaraan.

3. Lendutan balik titik belok

Merupakan besarnya lendutan balik perkerasan pada kedudukan di titik kontak batang pada alat uji setelah beban berpindah sejauh 0,30 meter untuk penetrasi asbuton dan laburan sejauh 0,40 meter untuk aspal beton.

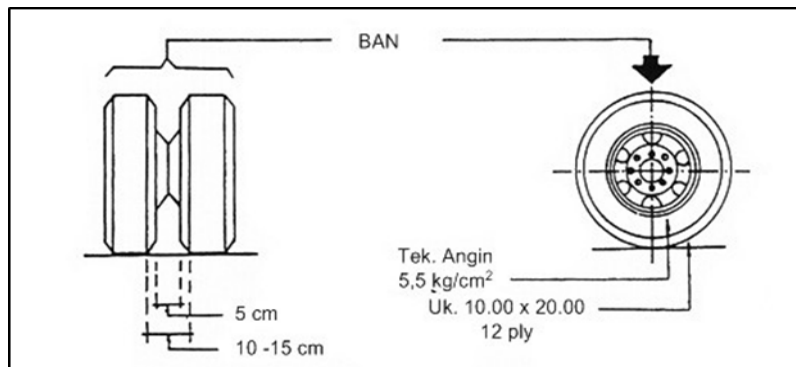
Apabila pada waktu pengujian lendutan ditemukan data yang kurang akurat maka lokasi atau titik tersebut dipindahkan agar pada saat pengujian ulang atau titik pengujian dipindah pada lokasi atau titik sekitarnya (Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B). Dari hasil pengujian yang dilakukan menggunakan alat *Benkelman Beam* (BB) tersebut dapat dianalisa rencana tebal lapis tambahan (*overlay*) berdasarkan Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan Pd. T-05-2005-B. Perencanaan tebal lapis tambah (*overlay*) berdasarkan lendutan maksimum yang diperoleh dari pengujian dengan alat uji *Benkelman Beam* (BB) di lapangan, sedangkan data lendutan balik titik belok dan cekung lendutan digunakan sebagai data pembanding. Tebal lapis tambah (*overlay*) bertujuan untuk meningkatkan kekuatan struktur perkerasan

yang sudah masuk tahap rehabilitasi agar dapat melayani lalu lintas saat ini atau yang sudah direncanakan untuk dimasa yang akan datang.



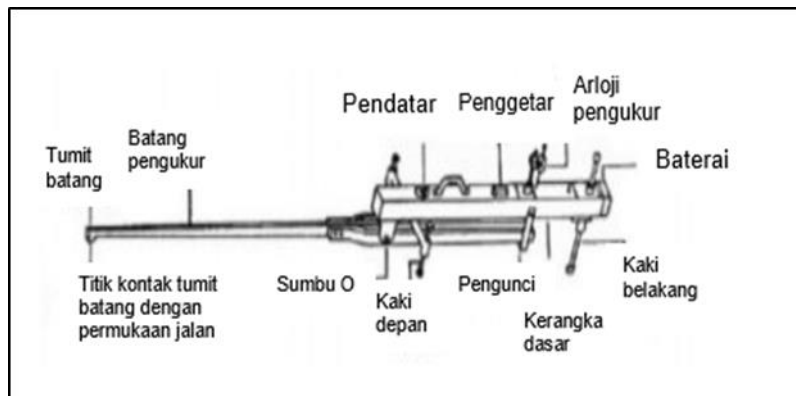
Gambar 3.5 Spesifikasi Truk Pengujian

Sumber: SNI 2416:2011



Gambar 3.6 Spesifikasi Truk Pengujian

Sumber: SNI 2416:2011



Gambar 3.7 Spesifikasi Truk Pengujian

Sumber: SNI 2416:2011

1. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam pengujian lendutan perkerasan jalan ialah :

- a. Truk dengan spesifikasi standar (Gambar 3.1 dan Gambar 3.2) dengan penjelasan sebagai berikut :
 - 1) Jumlah as 2 buah, dengan roda belakang ganda.
 - 2) Berat kosong truk $5 \pm 0,1$ ton.
 - 3) Ban dalam kondisi baik dari jenis kembang halus dengan ukuran 25,4 cm x 50,8 cm atau 10 inch, 12ply.
 - 4) Ban masing-masing roda belakang ganda $4,08 \pm 0,045$ ton atau beban gandar 8,16 ton.
 - 5) Tekanan angin ban $5,5 \pm 0,07$ kg/cm² atau 80 ± 1 psi.
 - 6) Jarak antara sisi kedua bidang kontak ban pada permukaan jalan antara 10 cm sampai dengan 15 cm.
- b. Alat *Benkelman Beam* terdiri dari dua batang dengan panjang total $336 \pm 0,16$ cm, yang terbagi dua bagian dengan perbandingan 1:2 oleh sumbu O (lihat Gambar 3.3), dengan perlengkapan sebagai berikut :
 - 1) Arloji pengukur (*dial gauge*), berskala mm dengan ketelitian 0,025 mm atau dengan ketelitian lebih baik.
 - 2) Alat pendatar (*waterpass*).
 - 3) Alat penggetar (*buzzer*).
- c. Alat timbang muatan praktis yang dapat dibawa-bawa (*portable weigh bridge*). Kapasitas 10 ton dengan ketinggian 15 cm.
- d. Alat penyetel *Benkelman Beam* (lihat Gambar 3.3) yang terdiri dari :
 - 1) Pelat penyetel (T) yang dapat turun naik pada salah satu sisi (S).
 - 2) Pelat landasan (L) untuk landasan pelat penyetel dan tiang pengukur.
 - 3) Sekrup pengatur (SP1), untuk pengatur pelat landasan (L) dalam kondisi kedudukan yang stabil.
 - 4) Engsel (E) untuk menghubungkan pelat landasan (L) dan alat penyetel (T).
 - 5) Sekrup pengatur (SP2), untuk mengatur pergerakan pelat penyetel (T) turun naik pada bagian sisi (S), yang dihubungkan oleh engsel E.
 - 6) Tiang (TA), untuk kedudukan arloji pengukur alat penyetel.

- 7) Arloji pengukur alat penyatel (API).
- e. Pengukur tekanan angin yang dapat mengukur tekanan $5,5 \text{ kg/cm}^2$ dengan ketelitian $0,01 \text{ kg/cm}^2$ atau 80 psi dengan ketelitian 1 psi.
- f. Peralatan pengukur yang terdiri dari :
- 1) Termometer udara dan thermometer permukaan : kapasitas 80°C , dengan ketelitian 1°C .
 - 2) Alat-alat penggali sederhana, pahat dan palu.
 - 3) Payung atau alat pelindung lainnya untuk terhindar dari terik matahari.
- g. Rolmeter 3 m dan 30 m.
- h. Formulir-formulir lapangan dan *handboard*.
- i. Minyak arloji pengukur dan alkohol untuk membersihkan batang arloji pengukur setelah digunakan
- j. Perlengkapan keamanan bagi petugas dan tempat pengujian sebagai berikut :
- 1) Tanda batas kecepatan lalu lintas pada saat melewati tempat pengujian ditempatkan dengan jarak 50 m di depan dan di belakang truk.
 - 2) Lampu peringatan,
 - 3) Tanda pengamanan lalu lintas yang dipegang oleh petugas (tanda "STOP/JALAN").
 - 4) Bendera yang selalu dipasang pada truk selama pengujian.
 - 5) Tanda pengenalan pada kain yang dipasang pada truk di bagian depan dan di bagian belakang.
 - 6) Pakaian khusus petugas yang warnanya dapat dilihat oleh pengendara lalu lintas (misalnya pakaian berwarna kuning).
- k. Kamera untuk dokumentasi.

2. Personil

Personil yang diperlukan pada saat pengujian di lapangan adalah sebagai berikut :

- a. Satu orang yang diperlukan untuk pengamanan lalu lintas.
- b. Dua orang operator untuk mengatur alat *Bankelman Beam*.
- c. Satu orang pencatat temperature dan tebal lapisan aspal.
- d. Satu orang pengemudi truk.

3. Cara mengukur ketelitian

Cara mengukur ketelitian, sebagai berikut :

- a. Dengan batang pengukur dalam keadaan terkunci, tempatkan *Benkelman Beam* pada bidang yang datar, kokoh dan rata, misalnya pada tanah.
- b. Tempatkan alat penyetel dalam bidang yang sama dan diatur sehingga alat penyetel berada di bawah tumit batang (TB) dari batang pengukur, kemudian atur landasan hingga datar dan pas.
- c. Atur arloji pengukur (AP2) *Benkelman Beam* padaudukannya hingga batang ujung arloji pengukur bersinggungan dengan bagian belakang batang pengukur, lalu kunci dengan erat.
- d. Atur kaki (K) sehingga *Benkelman Beam* sehingga dalam keadaan datar.
- e. Lepaskan pengunci (P) atau batang pengukur dan turunkan ujung batang perlahan-lahan sampai tumit batang terletak pada pelat penyetel (T).
- f. Atur arloji pengukur alat penyetel (AP1) padaudukannya hingga ujung batang arloji pengukur bersinggungan dengan batang pengukur tepat di atas tumit batang (TB), kemudian dikunci dengan erat.
- g. Atur kedudukan batang arloji pengukur *Benkelman Beam* dan batang arloji.
- h. Dalam kedudukan seperti langkah pada g, atur kedua jarum arloji pengukur pada angka nol.
- i. Hidupkan alat penggetar (B), kemudian turunkan pelat penyetel dengan memutar sekrup pengatur (SP2), sehingga jarum arloji pengukur alat penyetel menunjukkan penurunan batang arloji pengukur 0,25 mm, catat pembacaan kedua arloji pengukur pada formulir yang telah tersedia.
- j. Lakukan seperti langkah I, berturut-turut pada setiap penurunan batang arloji pengukur 0,25 mm sampai mencapai penurunan 2,50 mm, catat pembacaan kedua arloji pengukur pada formulir yang sudah disediakan sebelumnya.
- k. Dalam keadaan kedudukan terakhir seperti langkah j, naikkan pelat penyetel berturut-turut pada setiap kenaikan batang arloji pengukur 0,25 mm, sampai mencapai kenaikan 2,50 mm (tumit batang kembali pada kedudukan semula).

- l. Jika hasil pembacaan arloji pengukur *Benkelman Beam*, berbeda dengan hasil pembacaan pada arloji pengukur alat penyetel, berarti ada kemungkinan kesalahan pada alat, seperti gesekan pada sumbu yang terlalu besar atau peluru-peluru sumbu yang terlalu longgar.
- m. Jika ada selisih pada seperti yang dijelaskan dilangkah l, sama atau lebih kecil, 0,05 mm maka alat masih dianggap baik, tetapi jika lebih besar dari 0,05 mm maka alat tersebut perlu diperbaiki.

4. Pengukuran lendutan

Pengukuran lendutan mempunyai tiga jenis yaitu pengukuran lendutan balik maksimum, lendutan balik titik belok dan cekung lendutan. Dalam penempatan tumit dan kaki-kaki *Benkelman Beam*, hindari titik yang telah mengalami kerusakan permukaan jalan seperti pelelehan aspal (*bleeding*) atau retak (*cracking*) dan dalam melaksanakan pengujian pengukuran lendutan, temperatur permukaan jalan harus lebih rendah atau sama dengan 40°C. Adapun cara pengukuran tiga jenis lendutan tersebut yaitu :

a. Pengukuran lendutan balik maksimum

- 1) Tentukan titik pengujian jalan tanpa median atau dengan median ataupun disesuaikan dengan kebutuhan.
- 2) Tentukan titik pada permukaan jalan yang akan di uji dan diberi tanda plus (+) dengan kapur tulis atau pilox.
- 3) Pusatkan salah satu ban ganda pada titik yang telah ditentukan tersebut, apabila yang diuji ada disebelah kiri sebuah jalur maka yang di pusatkan adalah ban ganda kiri, apabila yang akan diuji kiri dan kanan pada suatu jalur maka yang akan di pusatkan pada titik yang telah diberi tanda tersebut ialah ban ganda kiri dan ban ganda kanan.
- 4) Tumit batang (*beam toe*) *Benkelman Beam* diselipkan ditengah-tengah pada ban ganda sebelah kanan, sehingga tumit batang tepat dibawah pusat muatan sumbu gandar dan batang *Benkelman Beam* masih dalam keadaan terkunci.
- 5) Atur ketiga kaki sehingga *Benkelman Beam* dalam keadaan datar (*waterpass*).

- 6) Lepaskan kunci *Benkelman Beam*, sehingga batang *Benkelman Beam* dapat digerakkan naik turun.
- 7) Atur batang arloji pengukur sehingga menyinggung dengan bagian atas dari batang belakang.
- 8) Hidupkan penggetar (*buzzer*) untuk memeriksa kestabilan jarum arloji pengukur.
- 9) Setelah jarum arloji pengukur stabil, atur jarum pada angka nol, sehingga kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pembacaan pada pemcaan awal.
- 10) Jalankan truk perlahan-lahan maju dengan kecepatan maksimum 5 km/jam sejauh 6 meter. Setelah itu truk berhenti dan dibaca pada arloji pengukur disetiap menit, sampai kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pemcaan ini sebagai pembacaan terkahir.
- 11) Catat temperatur permukaan jalan (t_p) dan temperatur udara (t_u) pada tiap titik pengujian, tempatur tengah (t_t) dan temperatur bawah (t_b) bila perlu dicatat setiap 2 (dua) jam.
- 12) Tekanan angina pada ban selalu diperiksa bila dianggap perlu setiap 4 (empat) jam dan dibuat selalu $5,5 \pm 0,07 \text{ kg/cm}^2$ aatau $80 \pm 1 \text{ psi}$.
- 13) Apabila ada keraguan adanya perubahan letak muatan, maka beban gandar belakang truk selalu diperiksa dengan timbangan muatan.
- 14) Periksa dan catat tebal lapis permukaan, serta data lain yang diperlukan.

b. Pengukuran lendutan balik titik belok

- 1) Tentukan titik pengujian jalan tanpa median atau dengan median ataupun disesuaikan dengan kebutuhan.
- 2) Tentukan titik pada permukaan jalan yang akan di uji dan diberi tanda plus (+) dengan kapur tulis atau pilox.
- 3) Pusatkan salah satu ban ganda pada titik yang telah ditentukan tersebut, apabila yang diuji ada disebelah kiri sebuah jalur maka yang di pusatkan adalah ban ganda kiri, apabila yang akan diuji kiri dan kanan pada suatu

jalur maka yang akan di pusatkan pada titik yang telah diberi tanda tersebut ialah ban ganda kiri dan ban ganda kanan.

- 4) Tumit batang (*beam toe*) *Benkelman Beam* diselipkan ditengah-tengah pada ban ganda sebelah kanan, sehingga tumit batang tepat dibawah pusat muatan sumbu gandar dan batang *Benkelman Beam* masih dalam keadaan terkunci.
- 5) Atur ketiga kaki sehingga *Benkelman Beam* dalam keadaan datar (*waterpass*).
- 6) Lepaskan kunci *Benkelman Beam*, sehingga batang *Benkelman Beam* dapat digerakkan naik turun.
- 7) Atur batang arloji pengukur sehingga menyinggung dengan bagian atas dari batang belakang.
- 8) Hidupkan penggetar (*buzzer*) untuk memeriksa kestabilan jarum arloji pengukur.
- 9) Setelah jarum arloji pengukur stabil, atur jarum pada angka nol, sehingga kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pembacaan pada pemcaan awal.
- 10) Jalankan truk perlahan-lahan maju dengan kecepatan maksimum 5 km/jam sejauh 0,30 meter untuk penetrasi asbuton dan laburan, sejauh 0,40 meter untuk beton beraspal. Setelah itu truk berhenti dan dibaca pada arloji pengukur disetiap menit, sampai kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pembacaan ini sebagai pembacaan sementara.
- 11) Jalankan truk perlahan-lahan maju dengan kecepatan maksimum 5 km/jam sejauh 6 meter. Setelah itu truk berhenti dan dibaca pada arloji pengukur disetiap menit, sampai kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pemcaan ini sebagai pembacaan terkahir.
- 12) Catat temperatur permukaan jalan (t_p) dan temperatur udara (t_u) pada tiap titik pengujian, tempatur tengah (t_t) dan temperatur bawah (t_b) bila perlu dicatat setiap 2 (dua) jam.

- 13) Tekanan angin pada ban selalu diperiksa bila dianggap perlu setiap 4 (empat) jam dan dibuat selalu $5,5 \pm 0,07 \text{ kg/cm}^2$ atau $80 \pm 1 \text{ psi}$.
- 14) Apabila ada keraguan adanya perubahan letak muatan, maka beban gandar belakang truk selalu diperiksa dengan timbangan muatan.
- 15) Periksa dan catat tebal lapis permukaan, serta data lain yang diperlukan.

c. Pengukuran cekung lendutan

- 1) Tentukan titik pengujian jalan tanpa median atau dengan median ataupun disesuaikan dengan kebutuhan.
- 2) Tentukan titik pada permukaan jalan yang akan di uji dan diberi tanda plus (+) dengan kapur tulis atau pilox.
- 3) Tempatkan truk arah ke depan sejauh 6 meter dari titik yang akan diuji.
- 4) Letakkan tumit batang (*beam toe*) *Benkelman Beam* pada titik yang akan diuji kemudian :
 - a. periksa kedudukan batang sehingga as jalan dan kaki batang terletak pada landasan yang stabil dan sejajar.
 - b. atur jarum arloji pengukur pada angka normal atau nol.
- 5) Tandai pada permukaan jalan mulai dari titik kontak batang, dengan jarak 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 70 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm, dan 600 cm arahkan ke muka.
- 6) Truk dijalankan mundur dengan perlahan sehingga tumit batang terselip ditengah ban ganda belakang yang terdapat pada titik pusat beban.
- 7) Pada waktu truk berjalan mundur dan ban ganda belakang sudah berada 2 meter di depan titik kontak batang dan perkiraan batang tidak akan tepat masuk diantara ban ganda belakang yang bersangkutan maka truk harus maju lagi untuk memperbaiki arah.
- 8) Pada kedudukan ban ganda belakang tersebut pada langkah yang ke 6 dapat dilakukan pembacaan. Pembacaan arloji pengukur dilakukan setiap menit sampai kecepatan berubah jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 menit, maka catat pembacaan dari titik tersebut sebagai pembacaan lendutan maksimum.
- 9) Lalu jalankan truk maju perlahan sejauh sekitar 10 cm dari titik kontak batang. Kemudian pembacaan dilakukan disetiap menitnya sampai

kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit ataupun setelah 3 menit.

10) Truk dijalankan lagi maju perlahan pada jarak 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 70 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm, dan 600 cm dari titik kontak batang dan pembacaan dilakukan pada tiap titik jarak tersebut di atas sesuai langkah 8, catat pembacaan tersebut sebagai pembacaan cekung lendutan.

11) Periksa dan catat tebal lapis permukaan serta data lain yang diperlukan.

5. Pengukuran temperatur

Merupakan pengukuran temperatur yang mencari faktor koreksi penyesuaian temperatur terhadap temperatur standar yaitu 35°. Pengukuran biasanya dilakukan terhadap :

- a. Temperatur permukaan (t_p), temperatur udara (t_u), dengan menggunakan Tabel Temperatur Tengah (t_t) dan Temperatur Bawah (t_b) Lapis Beraspal Berdasarkan Data Temperatur Udara (T_u) dan Temperatur Permukaan pada SNI 2416:2011 akan didapatkan temperatur tengah (t_t) dan temperatur bawah (t_b).
- b. Temperatur udara (t_u) temperatur permukaan (t_p), temperatur tengah (t_t) dan temperatur bawah (t_b).

Cara yang umum biasa digunakan adalah cara pada poin a, sedangkan cara pada poin b dapat digunakan untuk tujuan penelitian, dalam mencari faktor penyesuaian temperatur, diperlukan juga tebal dan jenis konstruksi lapis permukaan yang sekaligus dilakukan bersamaan dengan pengukuran temperatur.

Temperatur lapis permukaan (T_L) dihitung dengan persamaan :

$$T_L = 1/3 (t_p + t_t + t_b) \dots\dots\dots (3.21)$$

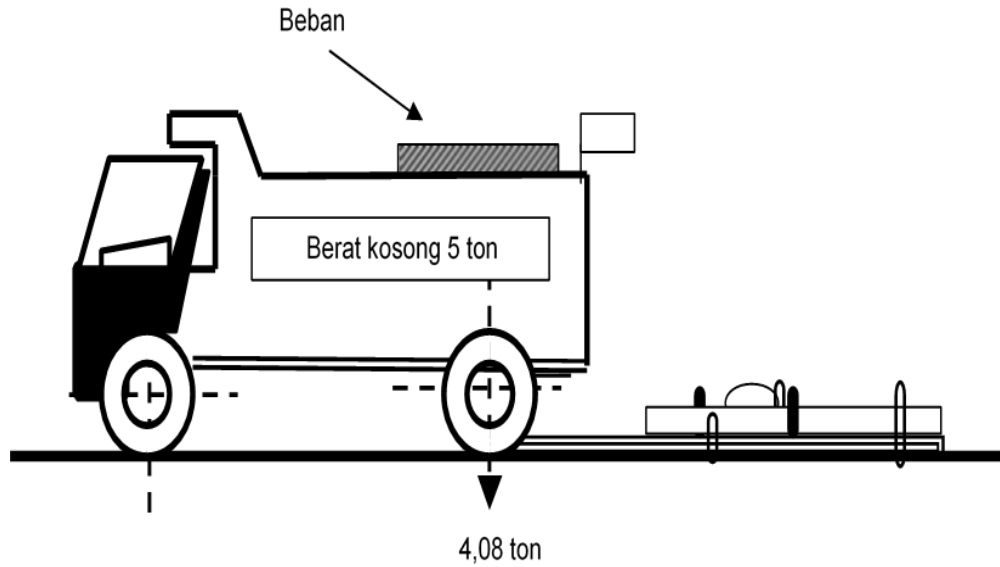
Keterangan :

T_L = Temperatur lapis permukaan (°C)

t_p = Temperatur permukaan (°C)

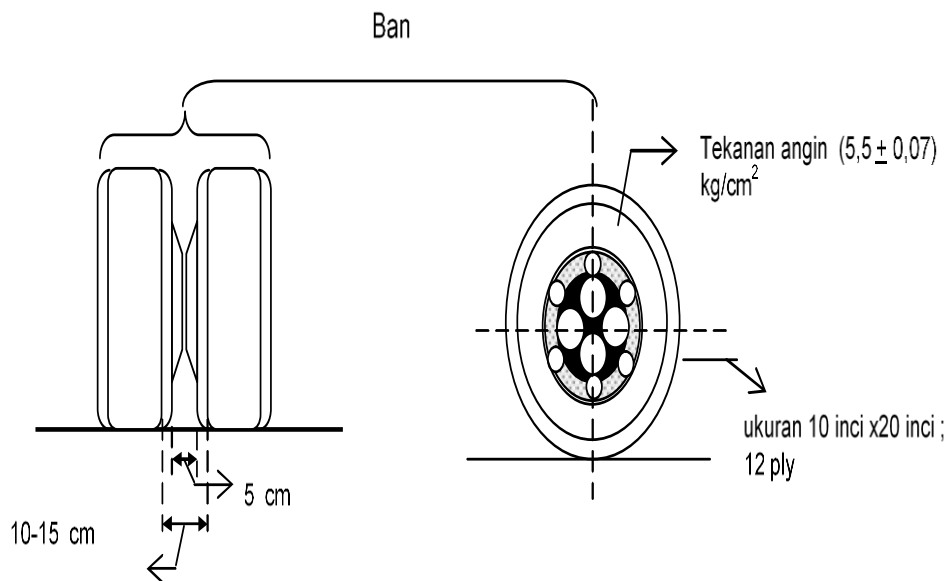
t_t = Temperatur tengah (°C)

t_b = Temperatur bawah (°C)



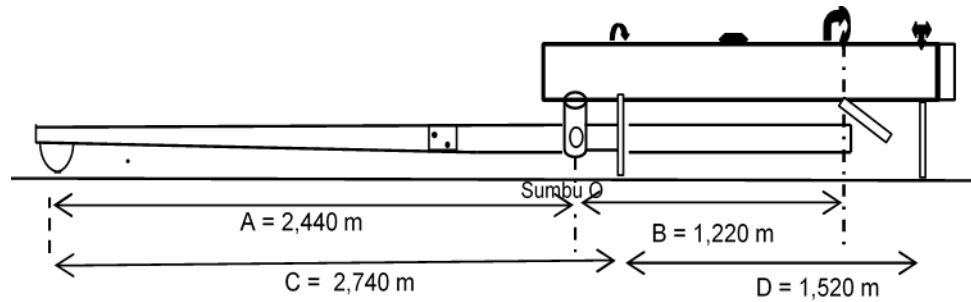
Gambar 3.8 Spesifikasi Truk Standar

Sumber: SNI 2416:2011

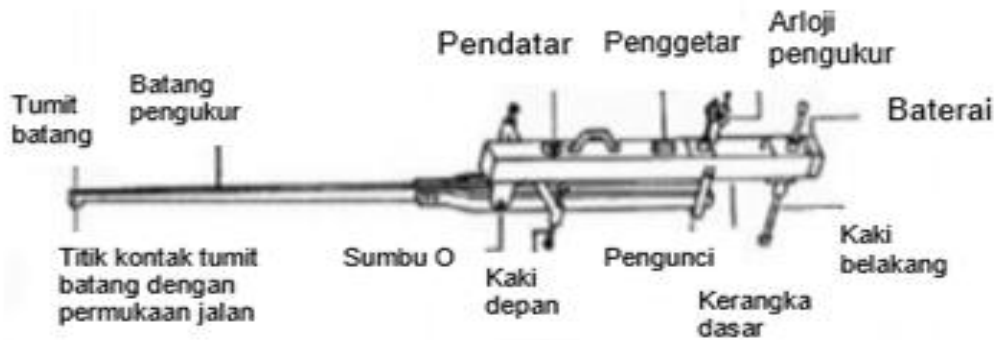


Gambar 3.9 Ilustrasi Spesifikasi Truk Standar

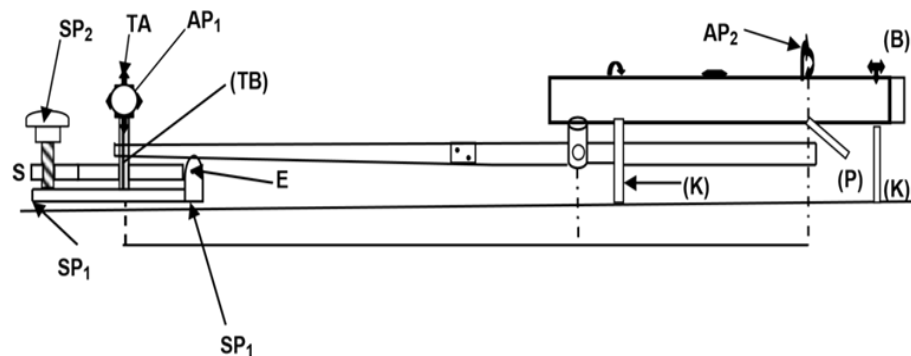
Sumber: SNI 2416:2011



(a)



(b)

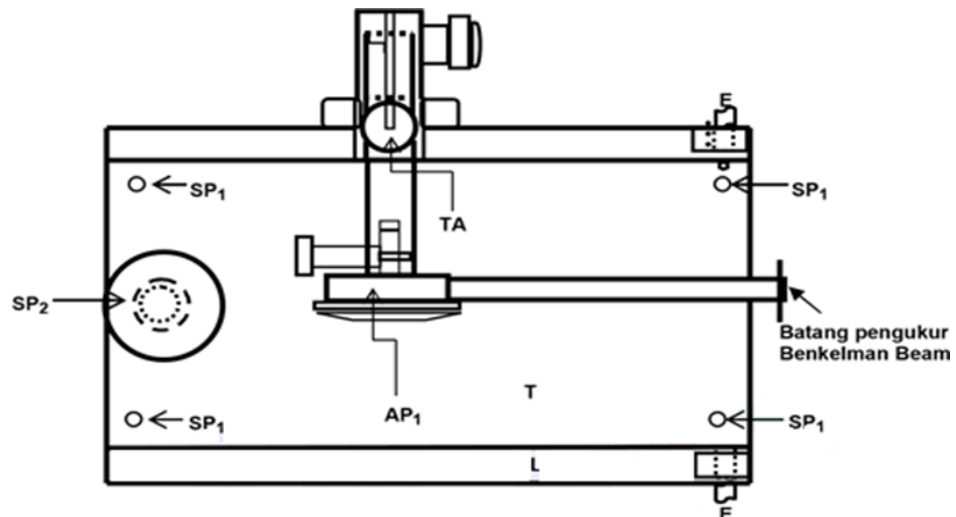


Keterangan:

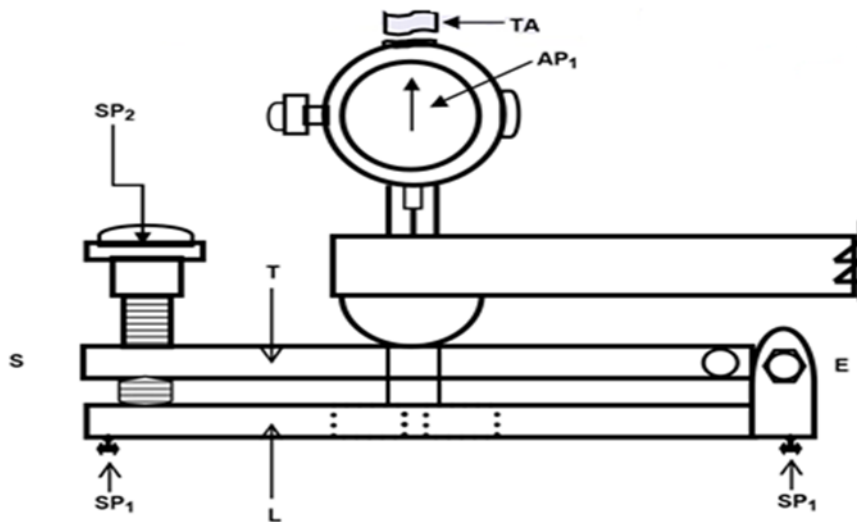
- K = Kaki Benkelaman Beam
- P = Pengunci
- TB = Tumit batang pengukur
- SP₂ = Arloji pengukur Benkelaman Beam
- B = Stop kontak penggetar

Gambar 3.10 Alat Benkelaman Beam

Sumber: SNI 2416:2011



(Tampak Atas)



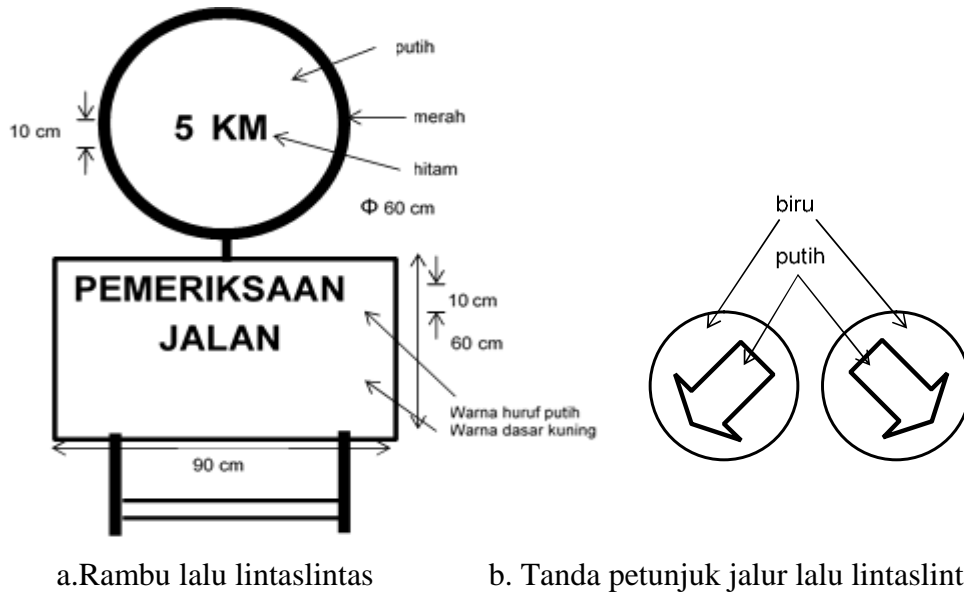
(Tampak Samping)

Keterangan:

- L = Pelat Landasan
- T = Pelat Penyetel
- SP1 = Sekrup pengatur pelat landasan (L)
- SP2 = Sekrup pengatur pelat penyetel (T)
- TA = Tiang dudukan arloji pengukur alat penyetel
- AP1 = Arloji pengukur
- E = Engsel
- S = Bagian sisi pelat penyetel yang dapat turun naik

Gambar 3.11 Alat Penyetel *Benkelman Beam*

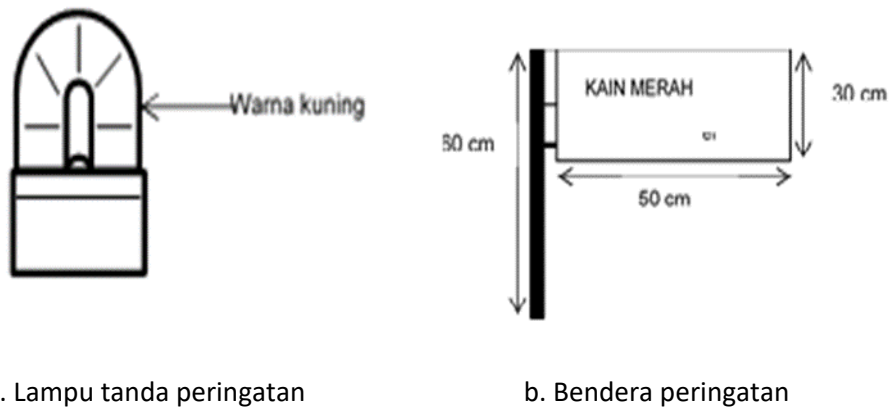
Sumber: SNI 2416:2011



a. Rambu lalu lintas b. Tanda petunjuk jalur lalu lintas

Gambar 3.12 Perlengkapan Keamanan

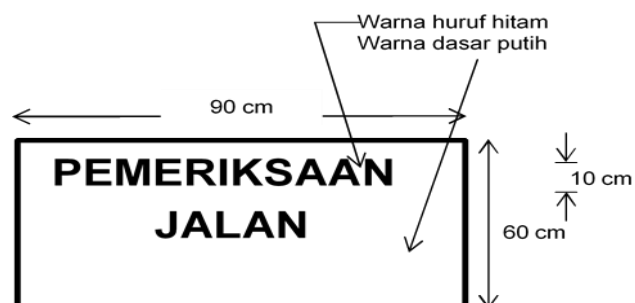
Sumber: SNI 2416:2011



a. Lampu tanda peringatan b. Bendera peringatan

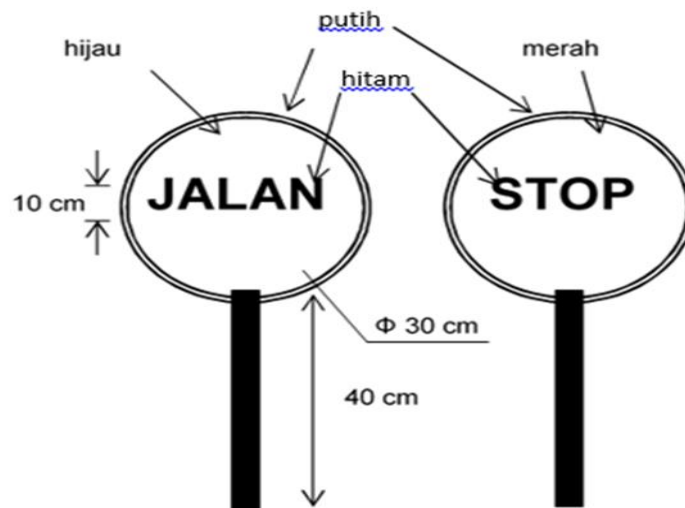
Gambar 3.13 Perlengkapan Keamanan

Sumber: SNI 2416:2011



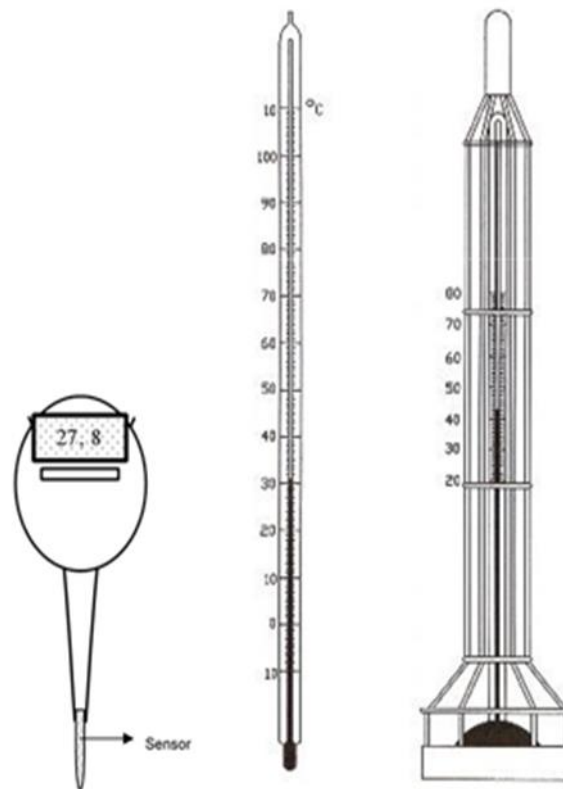
Gambar 3.14 Rambu Lalu Lintas Perlengkapan Keamanan

Sumber: SNI 2416:201



Gambar 3.15 Rambu Lalu Lintas Perlengkapan Keamanan

Sumber: SNI 2416:2011



Gambar 3.16 Termometer Digital, Termometer Udara, Termometer Permukaan

Sumber: SNI 2416:2011