

BAB III
LANDASAN TEORI

A. Beban Akibat Lalu Lintas

Beban lalu lintas dihitung berdasarkan ekivalensi terhadap muatan sumbu standar *Commulative Equavalent Standard Axle* (CESA). CESA merupakan akumulasi ekivalensi beban sumbu standar selama umur rencana, CESA ditentukan dengan rumus:

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

Dimana:

- CESA = akumulasi ekivalensi beban sumbu standar
- m = jumlah masing-masing jenis kendaraan
- 365 = jumlah hari dalam satu tahun
- E = ekivalen beban sumbu standar
- C = koefisien distribusi kendaraan
- N = faktor hubungan umur rencana dengan perkembangan lalu lintas

Dari perhitungan diatas, perhitungan CESA dipengaruhi 3 faktor utama yaitu:

1. 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 seperti Tabel 3.1 di bawah ini:

Tabel 3.1 Jumlah lajur berdasarkan lebar perkerasan

Lebar Perkerasan (L)	Jumlah Lajur
L < 4,50 m	1
4,50 m ≤ L < 8,00 m	2
8,00 m ≤ L < 11,25 m	3
11,25 m ≤ L < 15,00 m	4
15,00 m ≤ L < 18,75 m	5
18,75 m ≤ L < 22,50 m	6

Sumber : SKBI – 2.3.26.1987

Koefisien distribusi kendaraan (C) untuk kendaraan ringan dan berat yang lewat pada jalur rencana ditentukan menurut Tabel 3.2 di bawah ini:

Tabel 3.2 Koefisien distribusi kendaraan (C) untuk kendaraan ringan dan berat yang melewati lajur rencana

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

*) berat total < 5 ton, misalnya mobil penumpang, pick up, mobil hantaran

***) berat total > 5 ton, misalnya bus, truck, traktor, semi trailer, trailer

Sumber : SKBI – 2.3.26.1987

2. Ekivalen Beban Sumbu Kendaraan (E)

Angka ekivalen beban sumbu kendaraan adalah angka yang menyatakan perbandingan tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh suatu lintasan beban sumbu tunggal/ganda kendaraan terhadap tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh satu lintasan beban standar sumbu tunggal seberat 8,16 ton.

Angka Ekivalen (E) masing-masing golongan beban sumbu setiap kendaraan ditentukan menggunakan rumus dibawah ini :

$$\text{Angka Ekivalen STRT} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{5,40} \right]^4 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\text{Angka Ekivalen STRG} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{8,16} \right]^4 \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\text{Angka Ekivalen SDRG} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{13,76} \right]^4 \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\text{Angka Ekivalen STrRG} = \left[\frac{\text{Beban.sumbu (ton)}}{18,45} \right]^4 \dots\dots\dots (3.5)$$

Jenis kendaraan yang menggunakan jalan beraneka ragam maka volume lalu lintas umumnya dikelompokkan atas beberapa kelompok yang mewakili jenis kendaraan seperti Tabel 3.3 di bawah ini:

Tabel 3.3 Angka ekivalen (E) beban sumbu kendaraan

Beban Sumbu		Angka Ekivalen	
Kg	Lb	Sumbu Tunggal	Sumbu Ganda
1000	2205	0,0002	-
2000	4409	0,0036	0,0003
3000	6614	0,0183	0,0016
4000	8818	0,0577	0,0050
5000	11023	0,1410	0,0121
6000	13228	0,2923	0,0251
7000	15432	0,5415	0,0466
8000	17637	0,9238	0,0749
8160	18000	1,000	0,0860
9000	19841	1,4798	0,1273
10000	22046	2,2555	0,1940
11000	24251	3,3022	0,2840
12000	26455	4,6770	0,4022
13000	28660	6,4419	0,5540
14000	30864	8,6647	0,7452
15000	33069	11,4184	0,9820
16000	35276	14,7815	1,2712

Sumber : *SKBI* – 2.3.26.1987

3. Faktor Hubungan Umur Rencana dan Perkembangan Lalu Lintas (N)

Faktor umur rencana dan perkembangan lalu lintas ditentukan dengan persamaan 3.6 di bawah ini:

$$N = \frac{1}{2} \left[1 + (1+r)^n + 2(1+r) \frac{(1+r)^{n-1} - 1}{r} \right] \dots \dots \dots (3.6)$$

B. Jenis Lendutan Perkerasan Lentur

Pada umumnya perencanaan tebal lapis tambah (*overlay*) dilakukan berdasarkan pengukuran lendutan yang terjadi pada permukaan perkerasan. *Defleksi* atau lendutan adalah perubahan bentuk suatu benda akibat adanya pembebanan secara vertikal yang diberikan pada benda, alat yang biasa digunakan untuk mengukur lendutan pada perkerasan lentur adalah alat *Benkelman Beam*. Metode ini tanpa merusak konstruksi perkerasan jalan (*nondestruktif*), alat *Benkelman Beam* dapat mengukur lendutan balik maksimum, lendutan balik titik belok dan cekung lendutan yang diakibatkan dari beban kendaraan yang disalurkan oleh roda.

Berdasarkan SNI 2416:2011 mengenai Pedoman Cara Uji Lendutan Perkerasan Lentur dengan Alat *Benkelman Beam* terdapat tiga jenis pengukuran yang dilakukan menggunakan alat *Benkelman Beam* tersebut, yaitu

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

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

b. Lendutan balik titik belok

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

c. Cekung lendutan (*Bowl Deflection*)

Merupakan kurva yang menggambarkan bentuk lendutan dari suatu segmen perkerasan jalan akibat beban yang disalurkan oleh ban kendaraan.

Apabila pada waktu pengujian lendutan ditemukan data yang meragukan maka lokasi atau titik tersebut dianjurkan untuk dilakukan pengujian ulang atau titik pengujian dipindah pada lokasi atau titik disekitarnya (Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B).

C. Perencanaan Tebal Lapis Tambah (*overlay*)

Dalam perencanaan tebal lapis tambah ada beberapa data yang dibutuhkan untuk mendesain lapis tambah yang dibutuhkan yaitu :

1. Lendutan Menggunakan *Benkelman Beam*

Dalam mengukur lendutan yang terjadi pada perkerasan lentur yaitu menggunakan alat *Benkelman Beam*. Nilai lendutan nantinya akan digunakan untuk perhitungan tebal lapis tambah. Lendutan balik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$d_B = 2 \times (d_3 - d_1) \times F_t \times C_a \times FK_{B-BB} \dots \dots \dots (3.8)$$

dimana:

d_B = lendutan balik (mm)

d_1 = lendutan pada saat beban tepat 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, Didapat dari Tabel 3.4 atau pada Gambar 3.4 (Kurva A untuk $H_L < 10$ cm dan Kurva B untuk $H_L > 10$ cm) ataupun dengan menggunakan rumus :

$$= 4,184 \times T_L^{-0,4025} \text{ untuk } H_L < 10 \text{ cm} \dots \dots \dots (3.9)$$

$$= 14,785 \times T_L^{-0,7573} \text{ untuk } H_L > 10 \text{ cm} \dots \dots \dots (3.10)$$

T_L = temperatur lapis beraspal, diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan atau dapat diprediksi dari temperatur permukaan, yaitu :

$$T_L = 1/3 (T_P + T_t + T_b) \dots \dots \dots (3.11)$$

T_P = temperatur permukaan lapis beraspal

T_t = temperatur tengah lapis beraspal atau dari Tabel 3.5

T_b = temperatur bawah lapis beraspal atau dari Tabel 3.5

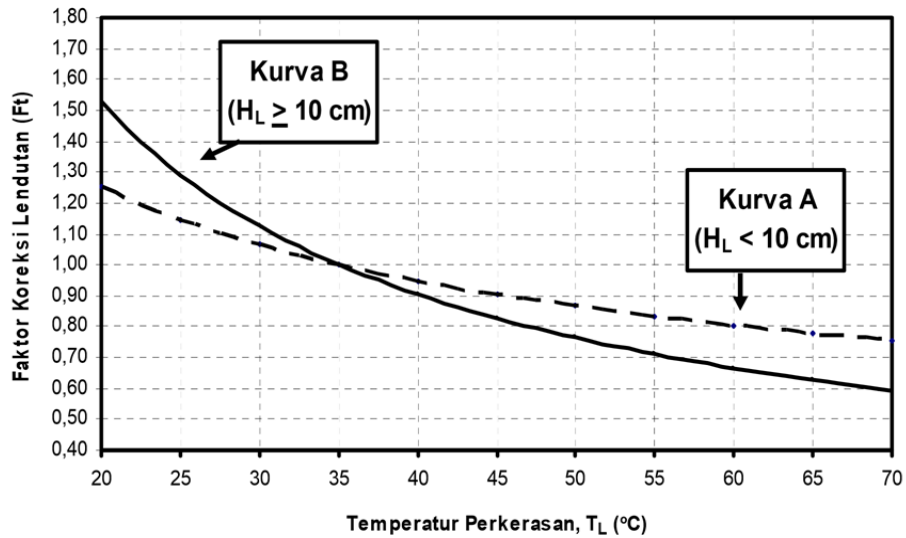
C_a = faktor pengaruh muka air tanah (faktor musim)

= 1,2 ; untuk pemeriksaan pada musim kemarau atau muka air tanah rendah

= 0,9 ; untuk pemeriksaan pada musim hujan atau muka air tanah tinggi

FK_{B-BB} = faktor koreksi beban uji *Benkelman Beam*

$$= 77,343 \times (\text{Beban Uji dalam ton})^{(-2,0715)} \dots\dots\dots(3.12)$$



Gambar 3.1 Faktor koreksi lendutan terhadap temperatur standar (Ft)

Tabel 3.4 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
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

Sumber : Dinas Pekerjaan Umum Pd T-05-2005-B

Catatan:

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

Tabel 3.5 Temperatur tengah (Tt) dan bawah (Tb) lapis beraspal berdasarkan data temperatur udara (Tu) dan temperatur permukaan (Tp)

T _U + T _P (°C)	Temperatur lapis beraspal (°C) pada kedalaman					
	2,5 cm	5,0 cm	10cm	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	21,1
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	25,1
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
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	31,0	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	32,2
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	42,2	40,9	39,2	38,2

Sumber : Dinas Pekerjaan Umum Pd T-05-2005-B

2. 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 seksi jalan harus dipertimbangkan terhadap keseragaman lendutan. Pada metode Pd T-5-2005-B tingkat keseragaman lendutan pada satu ruas dinyatakan dalam Faktor Keseragaman (FK) dimana nilainya merupakan hasil bagi antara deviasi standar dan nilai rata-rata.

$$FK = \frac{s}{d_R} \times 100\% < FK_{ijin} \dots\dots\dots(3.13)$$

dimana:

FK = faktor keseragaman

FK_{ijin} = faktor keseragaman yang di ijin

= 0% - 10% ; keseragaman sangat baik

= 11% - 20% ; keseragaman baik

= 21% - 30% ; keseragaman cukup baik

d_R = lendutan rata-rata pada suatu seksi jalan

$$= \sum \frac{1}{n_s} d \dots\dots\dots(3.14)$$

s = deviasi standar/simpangan baku

$$= \sqrt{\frac{n_s[\sum_1^{n_s} d^2] - [\sum_1^{n_s} d]^2}{n_s(n_s-1)}} \dots\dots\dots(3.15)$$

d = lendutan balik (d_B) atau lendutan langsung (d_L) dari setiap titik seksi jalan

n_s = jumlah titik pemeriksaan pada suatu seksi jalan

3. Lendutan Wakil (D_{wakil})

Untuk mengetahui besarnya lendutan yang mewakili suatu sub ruas/seksi jalan, digunakan rumus yang disesuaikan dengan fungsi/kelas jalan, yaitu :

$$D_{wakil} = d_R + 2 s ; \text{ untuk jalan arteri/tol (tingkat kepercayaan 98\%).....(3.16)}$$

$$D_{wakil} = d_R + 1,64 s ; \text{ untuk jalan kolektor (tingkat kepercayaan 95\%).....(3.17)}$$

$$D_{wakil} = d_R + 1,28 s ; \text{ untuk jalan lokal (tingkat kepercayaan 90\%).....(3.18)}$$

Dimana:

D_{wakil} = lendutan yang mewakili suatu seksi jalan

d_R = lendutan rata-rata pada suatu seksi jalan

s = deviasi standar

4. Lendutan Rencana (D_{rencana})

Hitung lendutan rencana/ijin (D_{rencana}) untuk lendutan dengan alat *FWD* menggunakan persamaan 3.19 sedangkan untuk lendutan dengan alat *Benkelman Beam* menggunakan persamaan 3.20.

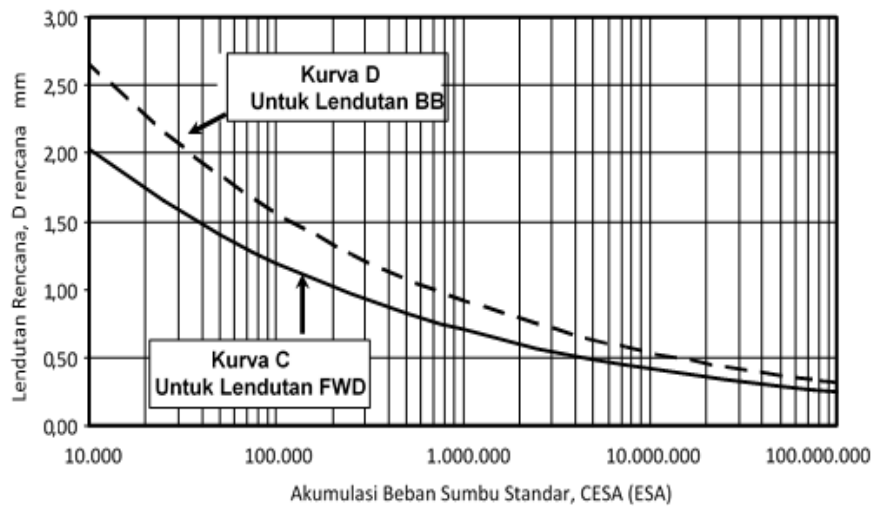
$$D_{\text{rencana}} = 17,004 \times \text{CESA}^{(-0,2307)} \dots\dots\dots(3.19)$$

$$D_{\text{rencana}} = 22,208 \times \text{CESA}^{(-0,2307)} \dots\dots\dots(3.20)$$

dimana:

D_{rencana} = lendutan rencana (mm)

CESA = akumulasi ekivalensi beban sumbu standar (ESA) atau Dengan data lalu lintas rencana (CESA) pada Gambar 3.5 kurva C untuk *FWD* dan Kurva D untuk lendutan *BB*



Gambar 3.2 Hubungan antara lendutan rencana dan lalu lintas

5. Tebal Lapis Tambah

Menghitung tebal lapis tambah/*overlay* (H_o) dengan memplot pada Gambar 3.6 atau menggunakan rumus:

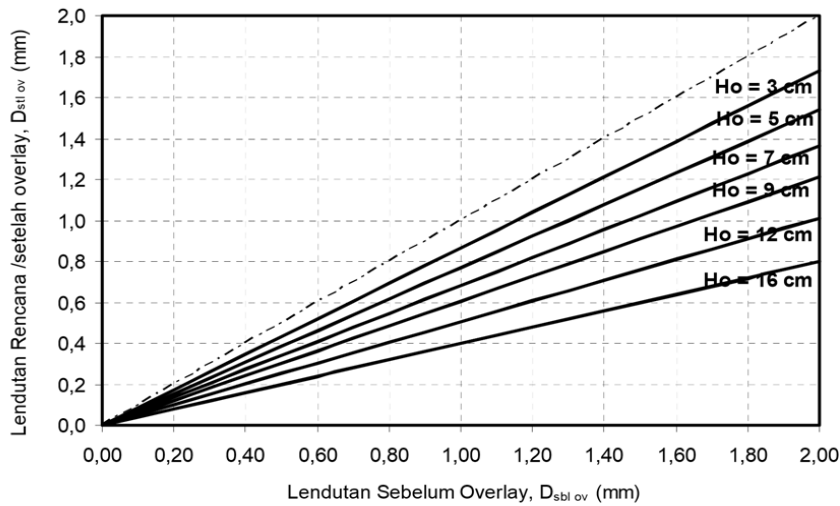
$$H_o = \frac{[\text{Ln}(1,0364) + \text{Ln}(D_{sbl\,ov}) - \text{Ln}(D_{stl\,ov})]}{0,0597} \dots\dots\dots(3.21)$$

Dimana:

H_o = tebal lapis tambah sebelum dikoreksi temperatur rata-rata tahunan daerah tertentu (cm)

$D_{sbl\,ov}$ = lendutan sebelum lapis tambah/ D_{wakil} (mm)

$D_{stl\,ov}$ = lendutan setelah lapis tambah/ $D_{rencana}$ (mm)



Gambar 3.3 Tebal lapis tambah/*overlay* (H_o)

6. Faktor Koreksi Tebal Lapis Tambah

Tebal lapis tambah yang diperoleh adalah berdasarkan temperatur standar 35°C, maka untuk masing-masing daerah perlu dikoreksi karena memiliki temperatur perkerasan rata-rata tahunan (TPRT) yang berbeda. Faktor koreksi tebal lapis tambah/*overlay* (F_o) dapat diperoleh menggunakan Gambar 3.7 atau menggunakan persamaan:

$$F_o = 0,5032 \times \text{EXP}^{(0,0194 \times \text{TPRT})} \dots\dots\dots(3.22)$$

Dimana:

F_o = faktor koreksi tebal lapis tambah

TPRT = temperatur perkerasan rata-rata tahunan untuk daerah/kota tertentu

Tebal lapis tambah/*overlay* terkoreksi (Ht) dengan mengalikan Ho dengan faktor koreksi (Fo), dengan persamaan:

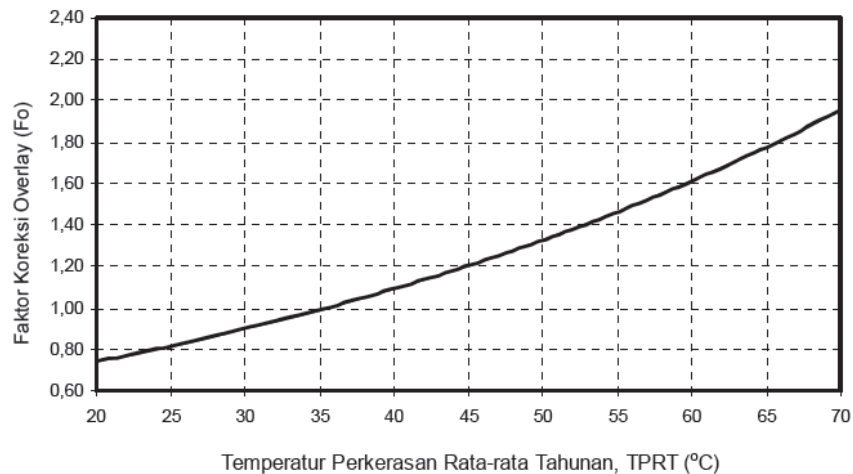
$$H_t = H_o \times F_o \dots\dots\dots(3.23)$$

Dimana:

Ht = Tebal lapis tambah/*overlay* Laston setelah dikoreksi dengan temperatur rata-rata tahunan daerah tertentu (cm)

Ho = Tebal lapis tambah/*overlay* Laston sebelum dikoreksi dengan temperatur rata-rata tahunan daerah tertentu (cm)

Fo = Faktor koreksi tebal lapis tambah/*overlay*



Gambar 3.4 Faktor koreksi tebal lapis tambah berdasarkan temperatur tahunan rata-rata (Fo)

7. Jenis Lapis Tambah

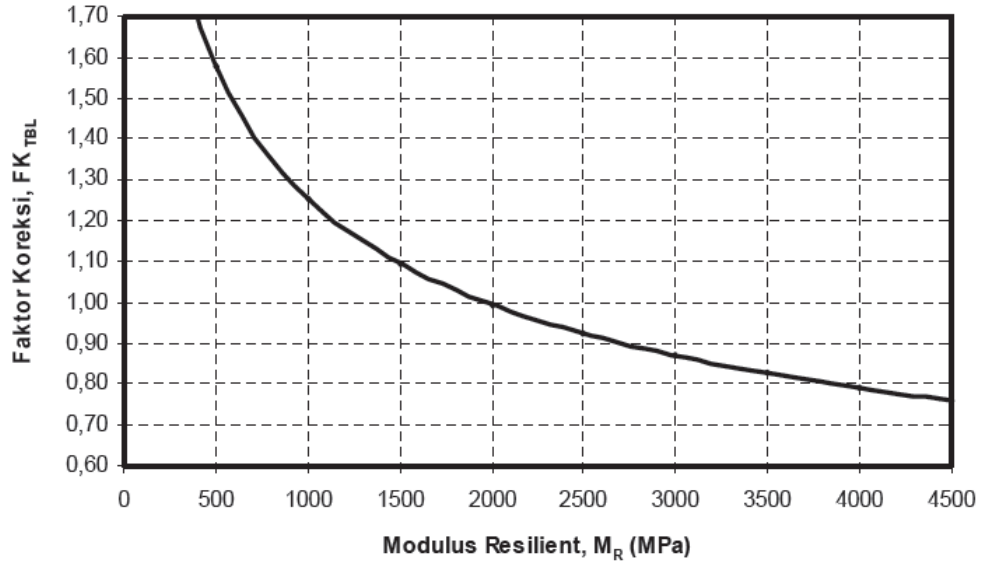
Jika jenis atau sifat campuran beraspal yang akan digunakan tidak sesuai dengan pedoman Pd T-05-2005-B maka tebal lapis tambah harus dikoreksi karena pedoman Pd T-05-2005-B berlaku untuk tebal lapis tambah jenis Laston, yaitu Modulus Resilien (MR) sebesar 2000 MPa dan Stabilitas Marshall minimum 800 kg. Untuk koreksi tebal lapis tambah dengan faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian (FK_{TBL}) sesuai dengan Gambar 3.8 atau Tabel 3.6 dan persamaan di bawah ini:

$$FK_{TBL} = 12,51 \times MR^{-0,333} \dots\dots\dots(3.24)$$

Dimana:

FK_{TBL} = faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian

MR = Modulus Resilient (MPa)



Gambar 3.5 Faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian (FK_{TBL})

Tabel 3.6 Faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian (FK_{TBL})

Jenis Lapisan	Modulus Resilient M_R (MPa)	Stabilitas Marshall (Kg)	FK_{TBL}
Laston Modifikasi	3000	Min. 1000	0,85
Laston	2000	Min. 800	1,00
Lataston	1000	Min. 800	1,23

Sumber : Dinas Pekerjaan Umum Pd T-05-2005-B