

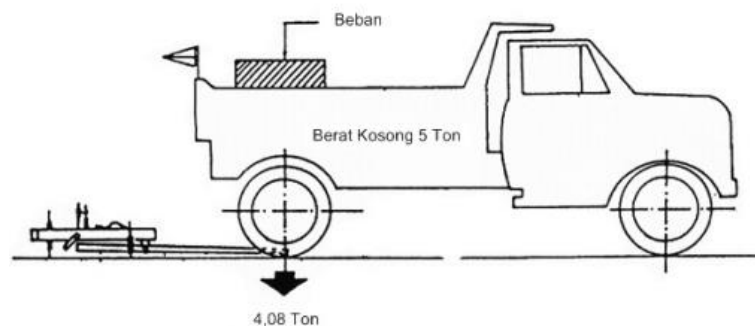
### BAB III

## LANDASAN TEORI

#### A. *Benkelman Beam (BB)*

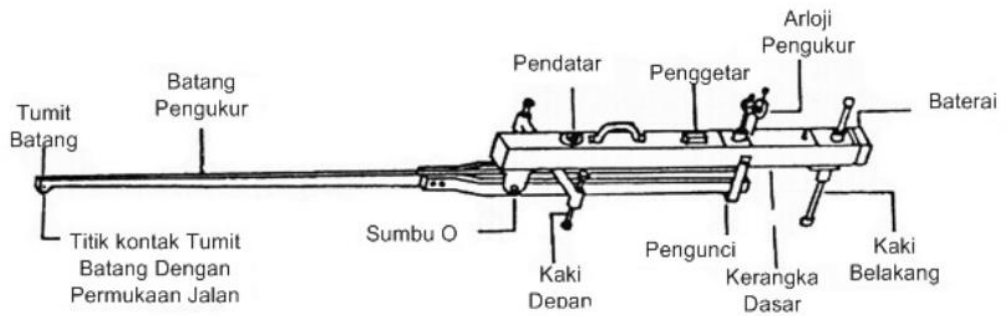
Menurut Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lentutan Pd. T-05-2005-B, tebal lapis tambah (*overlay*) merupakan lapis perkerasan tambahan yang dipasang di atas konstruksi perkerasan yang ada dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan struktur perkerasan yang ada agar dapat melayani lalu lintas yang direncanakan selama kurun waktu yang akan datang. *Benkelman Beam* merupakan alat untuk mengukur lendutan balik dan lendutan langsung perkerasan yang menggambarkan kekuatan struktur perkerasan jalan.

Berdasarkan Metode Pengujian Lentutan Perkerasan Lentur dengan Alat *Benkelman Beam* SNI 03-2416-1991, pegangan dalam pengujian perkerasan jalan dengan alat *Benkelman Beam* yaitu sebagai pengukur gerakan vertikal pada permukaan lapis perkerasan jalan dengan pemberian beban roda akibat pengujian tertentu. Terdapat data data lendutan akibat pemberian beban langsung di atas permukaan jalan tersebut dan terdapat lendutan balik ketika beban di atas permukaan jalan tersebut dipindahkan. Data data tersebut dapat digunakan dalam perencanaan pelapisan tambah perkerasan jalan (*overlay*).



Sumber : SNI 2416, 2011)

Gambar 3.1 Rangkaian Alat *Benkelman Beam*



Sumber : Bina Marga, 2005 (Pd. T-05-2005-B )

Gambar 3.2 Alat *Benkelman Beam*

Tabel 3.1 Letak Titik Pengujian Pada Jalan Tanpa median

TIPE JALAN	LETAK TITIK PENGUJIAN	b (m)	a (m)	Jumlah (alat)
1 lajur		< 3 3,5 4,0 4,5 5,0 ≥5,5	0,5 0,8 1,0 1,25 1,50 Tipe 2 lajur	1
2 lajur		< 5,5 5,5 7,0 8,0 ≥8,25	Tipe 1 lajur 0,80 0,80 0,80 Tipe 3 lajur	2
3 lajur		<8 8,25 10,0 11,0 ≥11,25	Tipe 2 lajur 0,80 0,80 0,80 Tipe 4 lajur	2
4 lajur		<11 11,25 15,0 16,0 ≥16,75	Tipe 3 lajur 0,80 0,80 0,80 Tipe 6 lajur	2x2
6 lajur		<18 ≥18,75	Tipe 4 lajur 0,80	2x2

Sumber : SNI 2416, 2011

**B. Pengujian BB menurut Pd. T-05-2005-B dan menurut SNI 2416, 2011****1. Angka ekivalen beban sumbu kendaraan (E)**

Merupakan angka yang menyatakan perbandingan tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh suatu lintasan beban sumbu kendaraan terhadap tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh satulintasan beban sumbu standar.

**2. CESA (*Cummulative Equivalent Standard Axle*)**

CESA merupakan akumulasi ekivalen beban sumbu standar selama umur rencana.

**3. Lendutan maksimum (*maximum deflection*)**

Merupakan besar gerakan turun vertikal maksimum suatu permukaan perkerasan akibat beban.

**4. Lendutan langsung**

Merupakan besar lendutan vertikal suatu permukaan perkerasan akibat beban langsung.

**5. Lendutan rencana/ijin**

Merupakan besar lendutan rencana atau yang diijinkan sesuai dengan akumulasi ekivalen beban sumbu standar selama umur rencana (*Cummulative Equivalent Standard Axle, CESA*).

**6. Lendutan balik maksimum.**

Merupakan besarnya lemdutan balik pada kedudukan di titik kontak batang *Benkelman Beam* setelah benda dipindahkan sejauh 6 m.

**7. Lendutan balik titik belok**

Merupakan besarnya lendutan balik pada kedudukan di titik kontak batang *Benkelman Beam* setelah benda dipindahkan sejauh 0.30 m untuk penetrasi, asbuton dan laburan atau sejauh 0.40 m untuk beton aspal.

**8. Puasat beban.**

Merupakan titik kontak batang yang berada di tengah tengah kedua bidang roda ganda pada garis sumbu gardar belakang truk penguji.

**C. Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan Pd T-05-2005-B**

**1. Lalu lintas**

**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

Tabel 3.2 Jumlah Lajur Jalan Berdasarkan Lebar Jalan

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 : Pd T-05-2005-B

Koefisien distribusi kendaraan (C) untuk kendaraan ringan dan berat yang lewat pada lajur rencana ditentukan sesuai Tabel 3.2

Tabel 3.3 Koefisien Distribusi Kendaraan

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 : Pd T-05-2005-B

**b. Ekuivalen Sumbu Kendaraan (E)**

Angka ekuivalen (E) masing-masing golongan beban sumbu (setiap kendaraan) ditentukan menurut Rumus 1, 2, 3 dan 4 atau pada Tabel 3.4

$$\text{Angka ekuivalen STRT} = \left[ \frac{\text{beban sumbu(ton)}}{5,4} \right]^4 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\text{Angka ekuivalen STRG} = \left[ \frac{\text{beban sumbu(ton)}}{8,16} \right]^4 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\text{Angka ekivalen SDRG} = \left[ \frac{\text{beban sumbu(ton)}}{13,76} \right]^4 \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\text{Angka ekivalen STrRG} = \left[ \frac{\text{beban sumbu(ton)}}{18,45} \right]^4 \dots\dots\dots (3.4)$$

Tabel 3.4 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
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
11	17,21852	3,30225	0,40841	0,12635
12	24,38653	4,67697	0,57843	0,17895
13	33,58910	6,44188	0,79671	0,24648
14	45,17905	8,66466	1,07161	0,33153
15	59,53742	11,41838	1,41218	0,43690
16	77,07347	14,78153	1,82813	0,56558
17	98,22469	18,83801	2,32982	0,72079
18	123,45679	23,67715	2,92830	0,90595
19	153,26372	29,39367	3,63530	1,12468
20	188,16764	36,08771	4,46320	1,38081

Sumber : Bina Marga, 2005 (Pd T-05-2005-B)

**c. Faktor umur rencana dan perkembangan lalu lintas**

Faktor hubungan umur rencana dan perkembangan lalu lintas ditentukan menurut persamaan 3.5 atau Tabel 3.4

$$N = \frac{1}{2} \left[ 1 + (1+r)^4 + 2(1+r) \frac{(1+r)^{n-1} - 1}{r} \right] \dots\dots\dots (3.5)$$

Tabel 3.5 Faktor Hubungan Antara Umur Rencana Dengan Faktor Perkembangan Lalu Lintas (N)

r (%) \ n (tahun)	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 : Pd T-05-2005-B

Dalam menentukan akumulasi beban sumbu lalu lintas (CESA) selama umur rencana ditentukan dengan persamaan.

$$CESA = \sum_{Tractor-Trailer}^{MP} m \times 365 \times E \times C \times N \dots\dots\dots (3.6)$$

dengan pengertian:

CESA = akumulasi ekivalen beban sumbu standar

m = jumlah masing-masing jenis kendaraan

365 = jumlah hari dalam satu tahun

E = ekivalen 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)

## 2. Lendutan

### a. Lendutan dengan Benkelman Beam

Lendutan yang digunakan untuk perencanaan adalah lendutan balik. Nilai lendutan tersebut harus dikoreksi dengan, faktor muka air tanah (faktor musim) dan koreksi temperatur serta faktor koreksi beban uji (bila beban uji tidak tepat sebesar 8,16 ton). Besarnya lendutan balik adalah sesuai Rumus persamaan berikut

$$d_B = 2 \times (d_3 - d_1) \times F_t \times C_a \times \text{FKB-BB} \dots\dots\dots (3.7)$$

dengan pengertian:

$d_B$  = lendutan balik (mm)

$d_1$  = lendutan pada saat beban tepat pada titik pengukuran

$d_3$  = lendutan pada saat beban berada pada jarak 6 meter dari pengukuran

$F_t$  = faktor penyesuaian lendutan terhadap temperatur standar 35°C,

persamaan 3.2 untuk tebal lapis beraspal ( $H_L$ ) lebih kecil 10 cm dan persamaan 3.3 untuk tebal lapis beraspal ( $H_L$ ) lebih besar atau sama dengan 10 cm atau dapat juga menggunakan Gambar 3.2.

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

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

$T_L$  = temperatur lapis beraspal, diperoleh dari hasil pengukuran

Langsung dilapangan atau dapat diprediksi dari temperatur udara yaitu:

$$T_L = 1/3 (T_p + T_t + T_b) \dots\dots\dots (3.10)$$

$T_p$  = 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

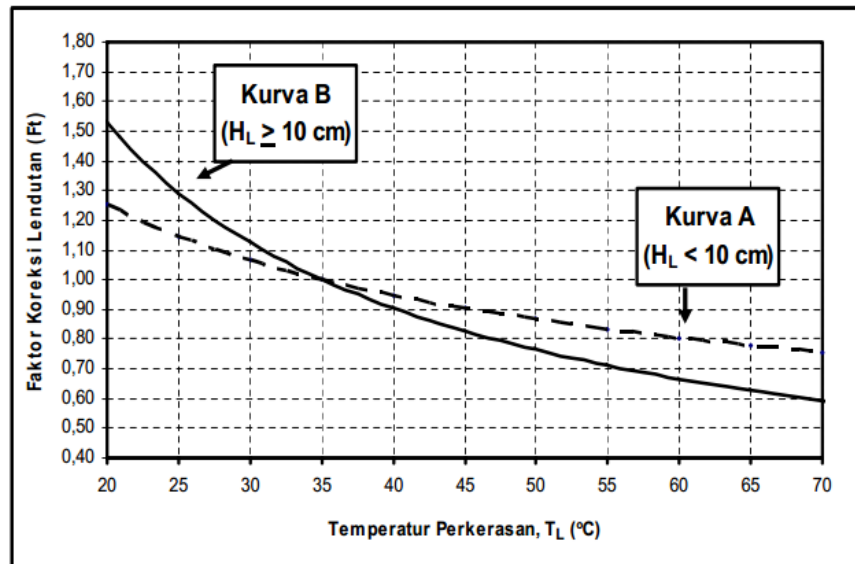
= 1,2 ; bila pemeriksaan dilakukan pada musim kemarau 16 atau muka air tanah rendah

= 0,9 ; bila pemeriksaan dilakukan pada musim kemarau atau muka air tanah tinggi

FKB-BB = faktor koreksi beban uji *Benkelman Beam* (BB)

$$= 77,343 \times (\text{Beban Uji dalam ton})^{(-2,0715)} \dots\dots\dots (3.11)$$

Cara pengukuran lendutan balik mengacu pada SNI 03-2416-1991 (Metoda Pengujian Lendutan Perkerasan Lentur dengan Alat *Benkelman Beam*).



Gambar 3.3 Faktor Koreksi Lendutan Terhadap Temperatur Standart (Ft)

Catatan:

- 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.



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

T <sub>u</sub> + T <sub>p</sub> (°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
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 : Pd T-05-2005-B

#### b. Keseragaman Lendutan

Perhitungan tebal lapis tambah dapat dilakukan pada setiap titik pengujian atau berdasarkan panjang segmen (seksi). Untuk menentukan faktor keseragaman lendutan adalah dengan menggunakan persamaan 3.12 sebagai berikut:

$$FK = \frac{s}{aR} \times 100\% < FK \text{ ijin} \dots\dots\dots (3.12)$$

dengan pengertian:

FK = faktor keseragaman

FK ijin = faktor keseragaman yang diijinkan

= 0% - 10% ; keseragaman sangat baik

= 11% - 20% ; keseragaman baik

= 21% - 30% ; keseragaman cukup baik

dR = lendutan rata-rata pada suatu seksi jalan

$$= \frac{\sum_1^{ns} d^2}{ns} \dots\dots\dots(3.13)$$

s = deviasi standar = simpangan baku

$$= \sqrt{\frac{ns(\sum_1^{ns} d^2) - (\sum_1^{ns} d)^2}{ns(ns-1)}} \dots\dots\dots(3.14)$$

d = nilai lendutan balik (dB) tiap titik pemeriksaan pada suatu seksi jalan

ns = jumlah titik pemeriksaan pada suatu seksi jalan

### c. Lendutan Wakil ( $D_{\text{wakil}}$ )

Pada perencanaan tebal lapis tambahan perkerasan lentur ini memiliki tiga jenis jalan berdasarkan fungsinya menurut Sukirman(1999), yaitu:

1. Jalan Arteri/tol adalah jalan yang melayani angkutan umum dengan ciri-ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rata-rata tinggi, dan jumlah jalan masuk dibatasi secara efisien.
2. Jalan Kolektor adalah jalan yang melayani angkutan pengumpulan/pembagian dengan ciri-ciri perjalanan jarak 19 sedang, kecepatan rata-rata sedang, dan jumlah jalan masuk dibatasi.
3. Jalan Lokal adalah jalan yang melayani angkutan setempat dengan ciri-ciri perjalanan jarak dekat, kecepatan rata-rata rendah, dan jumlah jalan masuk tidak dibatasi. Untuk menentukan besarnya lendutan yang mewakili suatu subruas jalan harus disesuaikan dengan fungsi/kelas jalan yaitu:

$$D_{\text{wakil}} = d_R + 2s ; \text{ untuk jalan arteri/tol ..... (3.15)}$$

$$D_{\text{wakil}} = d_R + 1,64s ; \text{ untuk jalan kolektor ..... (3.16)}$$

$$D_{\text{wakil}} = d_R + 1,28s ; \text{ untuk jalan local ..... (3.17)}$$

dengan pengertian:

$D_{\text{wakil}}$  = lendutan yang mewakili suatu seksi jalan

$d_R$  = lendutan rata-rata pada suatu seksi jalan sesuai persamaan

3.13

$s$  = deviasi standar sesuai persamaan 3.14

#### d. Lendutan Rencana/Ijin (Drencana)

Untuk lendutan BB menggunakan rumus sebagai berikut:

$$D_{\text{rencana}} = 22,208 \times \text{CESA}^{(-0,2307)} \text{ ..... (3.18)}$$

dengan pengertian:

$D_{\text{rencana}}$  = lendutan rencana, dalam satuan millimeter

$\text{CESA}$  = akumulasi ekivalen beban sumbu standar dalam satuan ESA

### 3. Tebal Lapis Tambah (*Overlay*), ( $H_o$ )

Untuk menentukan tebal lapis tambah ( $H_o$ ) dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$H_o = \frac{[\text{Ln}(1,0364) + \text{Ln}(D_{\text{wakil}}) - \text{Ln}(D_{\text{rencana}})]}{0,0597} \text{ ..... (3.19)}$$

dengan pengertian:

$H_o$  = tebal lapis tambah sebelum dikoreksi temperatur rata-rata tahunan daerah tertentu dalam satuan centimeter (cm).

$D_{\text{wakil}}$  = lendutan sebelum lapis tambah/ $D_{\text{wakil}}$  dalam satuan 20 millimeter (mm).

$D_{\text{rencana}}$  = lendutan setelah lapis tambah atau lendutan rencana dalam satuan millimeter (mm)

#### a. Tebal Lapis Tambah (*Overlay*) terkoreksi, ( $H_t$ )

Untuk menentukan  $H_t$  dengan cara mengkalikan  $H_o$  dengan factor koreksi overlay ( $F_o$ ):

$$H_t = H_o \times F_o \text{ ..... (3.20)}$$

dengan pengertian:

$H_t$  = tebal lapis tambah/*overlay* Laston setelah dikoreksi Dengan temperatur rata-rata tahunan daerah tertentu, dalam satuan centimeter

$H_o$  = tebal lapis Laston sebelum dikoreksi temperature rata-rata tahunan daerah tertentu, dalam satuan centimeter

$F_o$  = faktor koreksi tebal lapis tambah (*overlay*), (sesuai persamaan 3.15 atau Gambar 3.2)

**b. Faktor Koreksi Tebal Lapis Tambah (*Overlay*) / ( $F_o$ )**

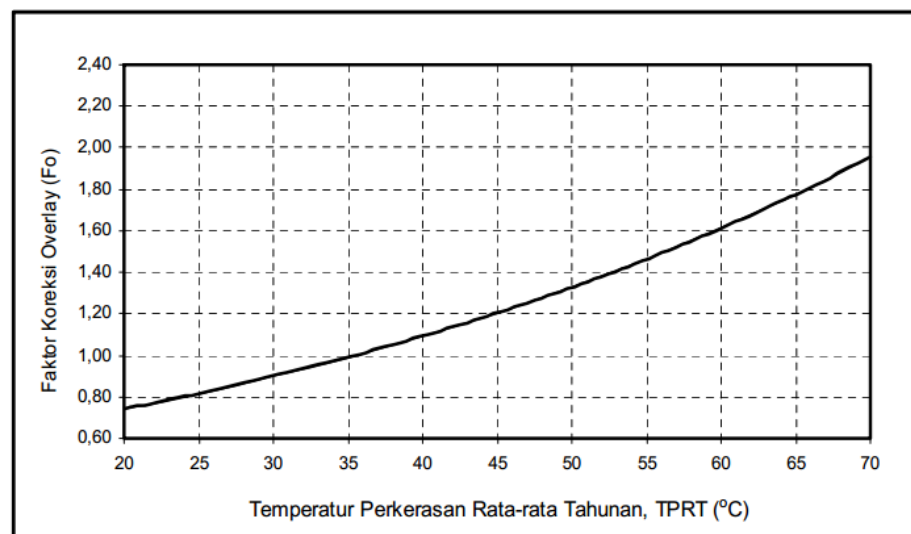
Tebal lapis tambah/*overlay* yang diperoleh berdasarkan temperature standar  $35^{\circ}\text{C}$ , maka untuk masing-masing daerah perlu dikoreksi karena memiliki temperatur perkerasan rata-rata tahunan (TPRT) yang berbeda.

$$F_o = 0,5032 \times EXP^{(0,0194 \times TPRT)} \dots\dots\dots (3.21)$$

dengan pengertian :

$F_o$  = faktor koreksi tebal lapis tambah (*overlay*)

TPRT = temperatur perkerasan rata-rata tahunan untuk daerah/ kota tertentu (Tabel A1 pada Lampiran A) pada pedoman Pd T-05-2005-B



Gambar 3.4 Faktor Koreksi Tebal Lapis Tambah ( $F_o$ ) Terhadap TPRT

c. Jenis Lapis Tambah

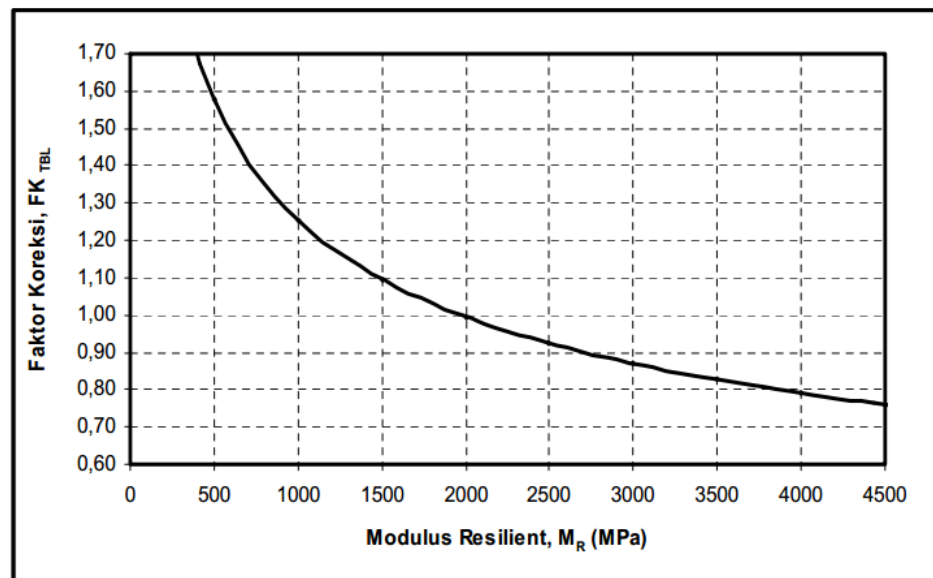
Pedoman yang digunakan untuk lapis tambahan dengan laston yaitu modulus resilien (MR) sebesar 2000 Mpa, dan stabilitas Marshal minimal 800 kg. nilai modulus resilien yang di peroleh berdasarkan pengujian UMATA atau berdasarkan alat lain dengan tempertaur pengujian 25 °C. apabila jenis campuran aspal untuk lapis tambah yang digunakan jenis laston modifikasi dan lataston atau campuran aspal yang memiliki sifat berbeda ( termasuk untuk laston ) dapat menggunakan faktor koreksi tebal lapis penyesuaian (FK<sub>TBL</sub>) sesuai rumus 22 atau gambar 3.5 dan Tabel 3.6

$$FK_{TBL} = 12,51 \times M R^{-0.333} \dots\dots\dots(3.22)$$

dengan pengertian

FK<sub>TBL</sub> = faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian

MR = Modulus Resilien (MPa)



Gmabar 3.5 Faktor Koreksi Tebal Lapis Tambah Penyesuaian

Tabel 3.7 Faktor Koreksi Tebal Lapis Tambah Penyesuaian (FK<sub>TBL</sub> )

Jenis Lapisan	Modulus Resilien, M <sub>R</sub> (MPa)	Stabilitas Marshall (kg)	FK <sub>TBL</sub>
Laston Modifikasi	3000	min. 1000	0,85
Laston	2000	min. 800	1,00
Laston	1000	min. 800	1,23