

BAB III LANDASAN TEORI

A. Uji Lendutan Perkerasan Lentur

Dari sekian banyak model alat dalam pengujian lendutan pada perkerasan lentur salah satunya dapat menggunakan alat *Benkleman Beam* (BB) yang diletakan pada lapisan *surface* perkersan lentur untuk mengukur lendutan balik maksimum, lendutan balik titik belok dan cekung lendutan yang dihasilkan dari beban kendaraan yang disalurkan oleh roda, yang mana pengujian menggunakan *Benkleman Beam* (BB) tersebut tidak menyebabkan kerusakan pada konstruksi perkerasan jalan (*nondestruktif*).

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

1. 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.

2. Lendutan balik titik belok

Merupakan besarnya lendutan balik erkerasan 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.

3. 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). Dari hasil pengujian yang dilakukan menggunakan alat *Benkleman Beam* (BB) tersebut dapat dianalisa rencana tebal lapis tambahan (*overlay*) berdasarkan pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambahan Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan Pd. T-05-2005-B. Perancangan tebal lapis tambahan (*overlay*) berdasarkan lendutan maksimum yang didapatkan dari pengujian dengan

alat *Benkleman 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 direncanakan selama kurun waktu yang akan datang. Adapun perihal yang perlu diperhatikan dalam pengujian yang dilakukan menggunakan alat *Benkleman Beam* diantaranya adalah:

1. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam pengujian lendutan perkerasan jalan adalah:

- a. Adapun Truk yang digunakan dengan spesifikasi standar dengan uraian sebagai berikut:
 - 1) Berat kosong truk ($5 \pm 0,1$) ton.
 - 2) Jumlah as 2 buah, dengan roda belakang ganda.
 - 3) Beban masing-masing roda belakang ganda ($4,08 \pm 0,045$) ton atau beban gandar 8,16 ton.
 - 4) Ban dalam kondisi baik dan dari jenis kembang halus (*zig-zag*) dengan ukuran: 25,4 cm \times 50,8 cm atau 10 inci \times 20 inci, 12 *ply*.
 - 5) Tekanan angin ban ($5,5 \pm 0,07$) kg/cm² atau (80 ± 1) psi.
 - 6) Jarak sisi antara kedua bidang kontak ban pada permukaan jalan antara 10 cm sampai dengan 15 cm.
- b. Alat timbang muatan praktis yang mudah dibawa (*portable weigh bridge*), kapasitas 10 ton, dengan ketelitian 0,001 ton.
- c. Alat Benkelman Beam terdiri dari dua batang dengan panjang total ($366 \pm 0,16$) cm, yang terbagi menjadi dua bagian dengan perbandingan 1:2 oleh sumbu O (lihat Gambar A.3), dengan perlengkapan sebagai berikut:
 - 1) Arloji pengukur (*dial gauge*), berskala mm dengan ketelitian 0,025 mm atau dengan ketelitian yang lebih baik.
 - 2) Alat penggetar (*buzzer*).
 - 3) Alat pendatar (*waterpass*).
- d. Alat penyetel *Benkelman Beam* (IGambar 3.6) yang terdiri dari:
 - 1) pelat landasan (L) untuk landasan pelat penyetel dan tiang arloji pengukur.

- 2) pelat penyetel (T) yang dapat turun naik pada salah satu sisi (S).
 - 3) engsel (E) untuk menghubungkan pelat landasan (L) dan pelat penyetel (T).
 - 4) sekrup pengatur (SP1) untuk mengatur pelat landasan (L) dalam kedudukan yang stabil.
 - 5) sekrup pengatur (SP2), untuk menggerakkan pelat penyetel (T) turun naik padabagian sisi (S), yang dihubungkan oleh engsel (E).
 - 6) Tiang (TA), untuk kedudukan arloji pengukur alat penyetel.
 - 7) Arloji pengukur alat penyetel (AP1).
- 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 temperatur yang terdiri dari:
- 1) Termometer udara dan termometer permukaan: kapasitas 80°C , dengan ketelitian 1°C (lihat Gambar A.5).
 - 2) Alat-alat penggali sederhana, pahat dan palu.
 - 3) Payung atau alat pelindung lainnya terhadap sinar matahari.
- g. Rolmeter 3 m dan 30 m.
- h. Formulir-formulir lapangan dan *handboard*.
- i. Minyak arloji pengukur dan alkohol murni untuk membersihkan batang arloji pengukur.
- j. Perlengkapan keamanan bagi petugas dan tempat pengujian (lihat Gambar A.6) sebagai berikut :
- 1) Tanda batas kecepatan lalu lintas pada saat melewati tempat pengujian ditempatkan lebih kurang 50 m di depan dan di belakang truk.
 - 2) Lampu tanda peringatan.
 - 3) Bendera yang selalu dipasang pada truk selama pengujian.
 - 4) Tanda pengenalan pada kain yang dipasang pada truk di bagian depan dan bagian belakang.
 - 5) Tanda pengaman lalu lintas yang dipegang oleh petugas (tanda "STOP/JALAN").
 - 6) Pakaian khusus petugas yang warnanya dapat dengan mudah dilihat oleh pengemudi lalu lintas (misalnya pakaian berwarna kuning).

2. Personil

Personil yang diperlukan pada saat pengujian di lapangan adalah:

- a. Satu orang petugas pengamanan lalu lintas.
- b. Satu orang pengemudi truk.
- c. Dua orang operator alat *Benkelman Beam*.
- d. Satu orang pencatat temperatur dan tebal lapisan beraspal.

3. Cara Mengukur Ketelitian

Adapun cara dalam mengukur ketelitian adalah sebagai berikut:

- a. Dengan batang pengukur dalam keadaan terkunci, tempatkan *Benkelman Beam* pada bidang yang datar, kokoh dan rata, misalnya pada tanah.
- b. Atur kaki (K) sehingga *Benkelman Beam* dalam keadaan datar.
- c. Tempatkan alat penyetel dalam bidang yang sama dan atur sehingga alat penyetel berada di bawah tumit batang (TB) dari batang pengukur, kemudian atur landasan hingga datar dan mantap.
- d. Lepaskan pengunci (P) atau batang pengukur dan turunkan ujung batang perlahan-lahan hingga tumit batang terletak pada pelat penyetel (T).
- e. Atur arloji pengukur (AP2) *Benkelman Beam* padaudukannya hingga batang ujung arloji pengukur bersinggungan dengan bagian belakang batang pengukur, lalu dikunci dengan erat.
- 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 alat penyetel sehingga batang arloji bisa bergerak ± 5 mm.
- h. Dalam kedudukan seperti langkah 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 telah tersedia.
- 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 (tumpukan 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 dijelaskan di langkah 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 diperiksa dan diperbaiki.

4. Pengukuran Lendutan

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

a. Pengukuran lendutan balik maksimum

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

- 4) Tumit batang (*beam toe*) *Benkelman Beam* diselipkan di tengah-tengah ban ganda tersebut, sehingga tepat di bawah 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 turun naik.
- 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 ini sebagai pembacaan awal.
- 10) Jalankan truk perlahan-lahan maju ke depan dengan kecepatan maksimum 5 km/jam sejauh 6 m. Setelah truk berhenti, arloji pengukur dibaca setiap menit, sampai kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pembacaan ini sebagai pembacaan akhir.
- 11) Catat temperatur permukaan jalan (t_p) dan temperatur udara (t_u) pada tiap titik pengujian, temperatur tengah (t_t) dan temperatur bawah (t_b) bila perlu dicatat setiap dua jam.
- 12) Tekanan angin pada ban selalu diperiksa bila dianggap perlu setiap 4 (empat) jam dandibuat selalu $(5,5 \pm 0,07) \text{ kg/cm}^2$ atau $(80 \pm 1) \text{ psi}$.
- 13) Apabila diragukan 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, sama dengan cara mengukur lendutan balik maksimum atau disesuaikan dengan kebutuhan.

- 2) Tentukan titik pada permukaan jalan yang akan diuji dan diberi tanda plus (+) dengan kapurtulis.
- 3) Pusatkan salah satu ban ganda pada titik yang telah ditentukan, apabila yang diuji sebelah kiri sebuah jalan maka yang dipusatkan ialah ban ganda kiri, apabila yang diuji adalah kiri dan kanan pada suatu jalur maka yang dipusatkan pada titik yang telah ditetapkan tersebut ialah ban ganda kiri dan ban ganda kanan.
- 4) Tumit batang (*beam toe*) *Benkelman Beam* diselipkan di tengah-tengah ban ganda tersebut, sehingga tepat dibawah pusat muatan sumbu ganda dan batang *Benkelman Beam* sejajar dengan arah truk, dengan *Benkelman Beam* masih dalam keadaan terkunci.
- 5) Atur ketiga kaki sehingga *Benkelman Beam* dalam keadaan datar dengan *waterpass*.
- 6) Lepaskan kunci *Benkelman Beam*, sehingga batang *Benkelman Beam* dapat digerakkan turun naik.
- 7) Atur batang arloji pengukur sehingga bersinggungan dengan bagian atas dari batangbelakang.
- 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 ini sebagai pembacaan awal.
- 10) Jalankan truk perlahan-lahan maju ke depan dengan kecepatan maksimum 5 km/jam sejauh 0,30 m untuk penetrasi asbuton dan laburan, sejauh 0,40 m untuk beton aspal. Setelah truk berhenti, arloji pengukur dibaca setiap menit, sampai kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pembacaan ini sebagai pembacaan antara.
- 11) Jalankan truk perlahan-lahan maju ke depan dengan kecepatan maksimum 5 km/jam sejauh 6 m dari titik awal pengujian. Setelah truk berhenti, arloji pengukur dibaca setiap menit, sampai kecepatan perubahan jarum lebih

kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 (tiga) menit, catat pembacaan ini sebagai pembacaan akhir.

- 12) Catat temperatur permukaan jalan (t_p) dan temperatur udara (t_u) tiap titik pengujian, temperatur 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 $(5,5 \pm 0,07)$ kg/cm² atau (80 ± 1) psi.
- 14) Apabila diragukan 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, pengujian pada umumnya dilakukan pada titik-titik lendutan balik yang memerlukan data tambahan, atau disesuaikan dengan kebutuhan.
- 2) Tentukan titik pada permukaan jalan yang akan diuji dan diberi tanda (+) dengan kapurtulis.
- 3) Tempatkan truk arah kemuka sejauh 6 m 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 landas yang stabil/mantap.
 - b) atur jarum arloji pengukur pada angka nol.
- 5) Beri tanda 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 arah ke muka.
- 6) Truk dijalankan mundur perlahan-lahan sehingga tumit batang terselip di antara salah satu ban ganda belakang dan truk berhenti pada saat pusat muatan ban ganda belakang berada di atas titik kontak belakang.
- 7) Pada waktu truk berjalan mundur dan ban ganda belakang sudah berada 2 m di depan titik kontak batang, dan diperkirakan batang tidak akan tepat

masuk diantara ban ganda yang bersangkutan maka truk harus maju lagi untuk memperbaiki arah.

- 8) Pada kedudukan ban ganda belakang tersebut pada langkah ke 6 dilakukan pembacaan. Pembacaan arloji pengukur dilakukan setiap menit, sampai kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 menit, catat pembacaan ini sebagai pembacaan lendutan maksimum.
- 9) Kemudian jalankan truk maju perlahan-lahan sejauh 10 cm dari titik kontak batang, pembacaan dilakukan lagi setiap menit sampai kecepatan perubahan jarum lebih kecil atau sama dengan 0,025 mm/menit atau setelah 3 menit;
- 10) Truk dijalankan lagi maju perlahan-lahan 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-tiap 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

Maksud pengukuran temperatur adalah untuk mencari faktor koreksi penyesuaian temperatur terhadap temperatur standar 35°C. Pengukuran dapat dilakukan terhadap:

- a. Temperatur udara (t_u) dan temperatur permukaan (t_p), dengan menggunakan Tabel Temperatur Tengah (T_t) dan Bawah (T_b) Lapis Beraspal Berdasarkan Data Temperatur Udara (T_u) dan Temperatur Permukaan pada SNI 2416:2011 akan diperoleh 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 dipergunakan 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 bersama-sama dengan pengukuran temperatur. Temperatur lapis permukaan (T_L) dihitung dengan persamaan:

$$T_L = 1/3 (t_p + t_t + t_b) \dots\dots\dots (3.1)$$

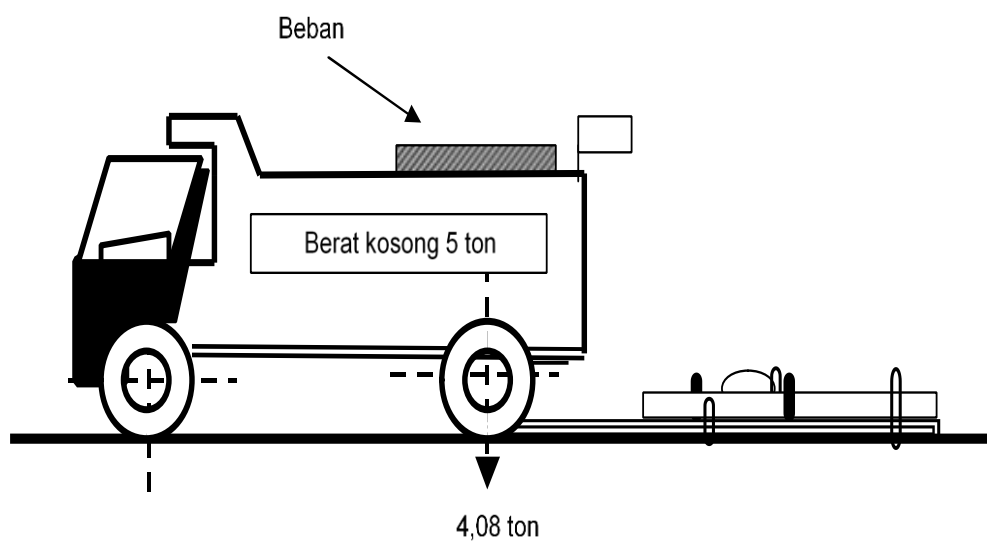
Keterangan:

T_L = Temperatur lapis permukaan ($^{\circ}\text{C}$)

t_p = Temperatur permukaan ($^{\circ}\text{C}$)

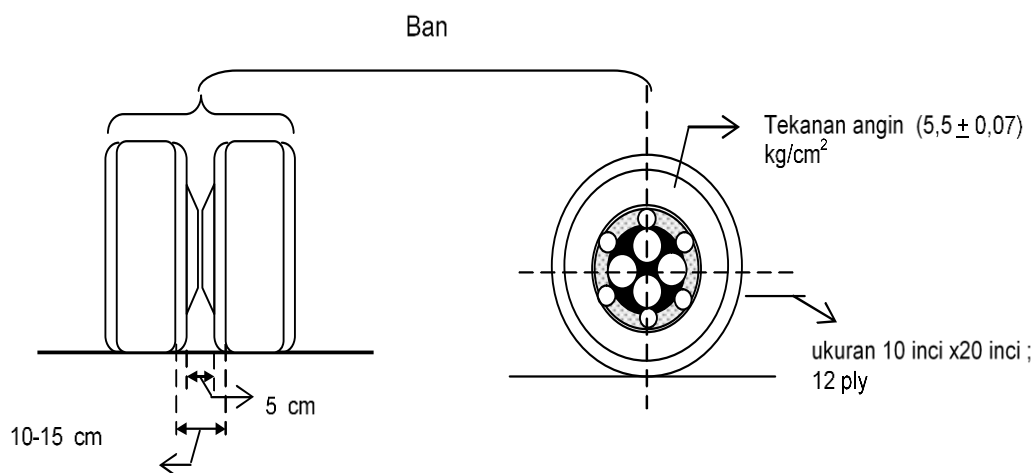
t_t = Temperatur tengah ($^{\circ}\text{C}$)

t_b = Temperatur bawah ($^{\circ}\text{C}$)



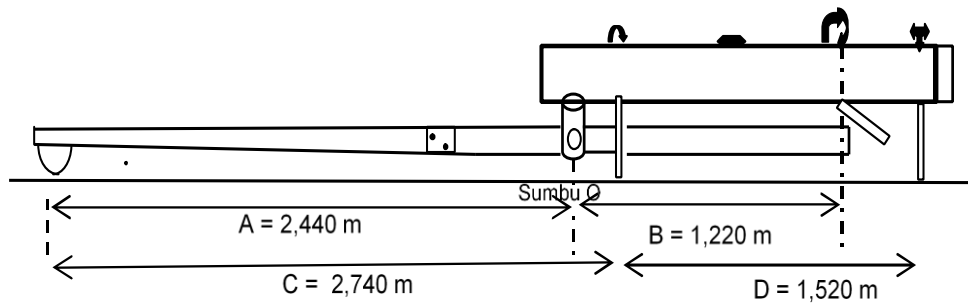
Gambar 3.4 Spesifikasi Truk Standar

Sumber: SNI 2416:2011

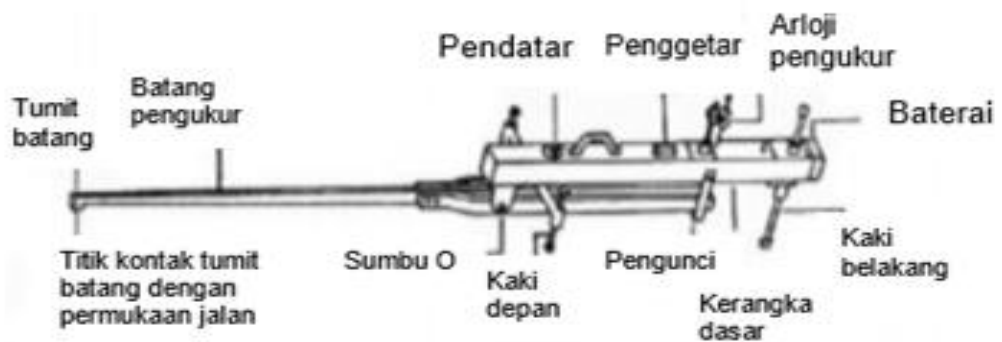


Gambar 3.5 Ilustrasi Spesifikasi Truk Standar

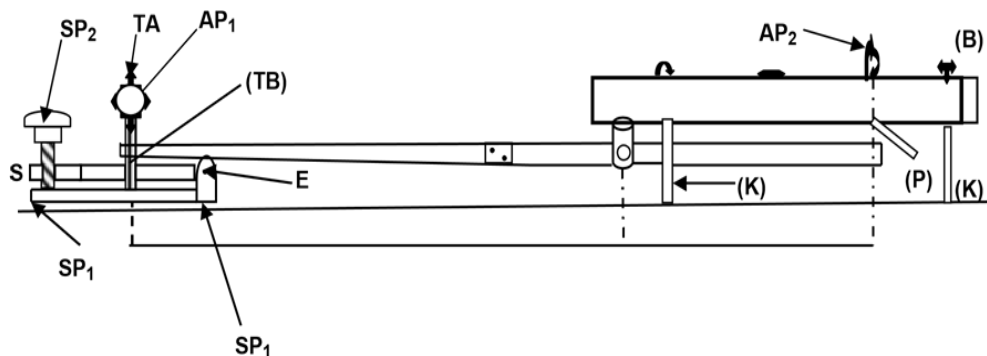
Sumber: SNI 2416:2011



(a)



(b)



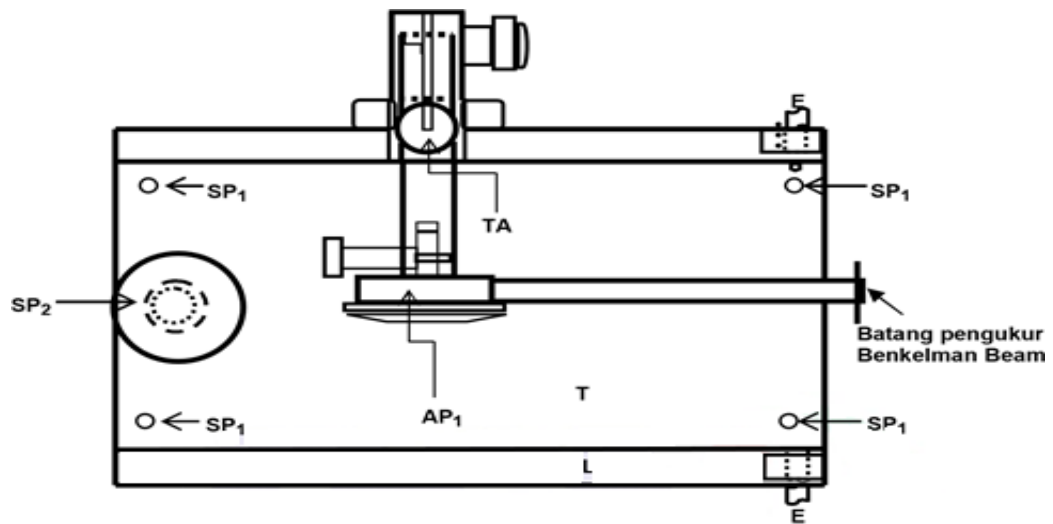
Keterangan:

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

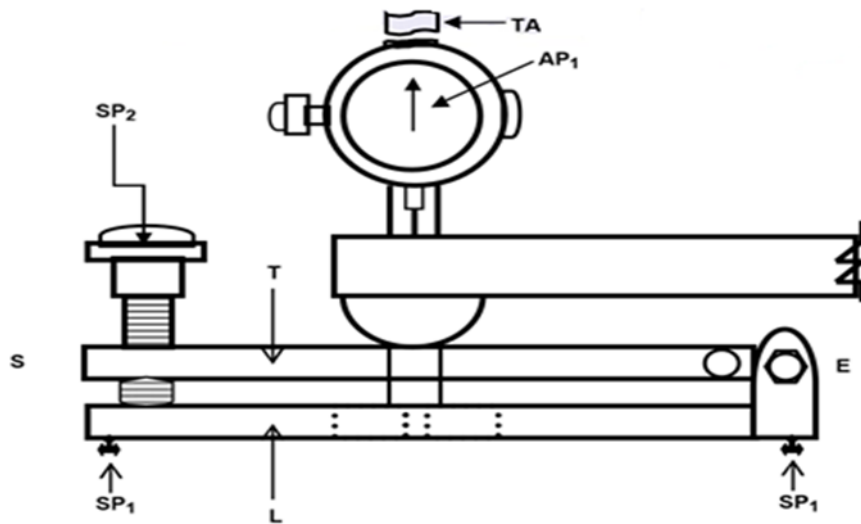
(c)

Gambar 3.6 Alat *Benkleman 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

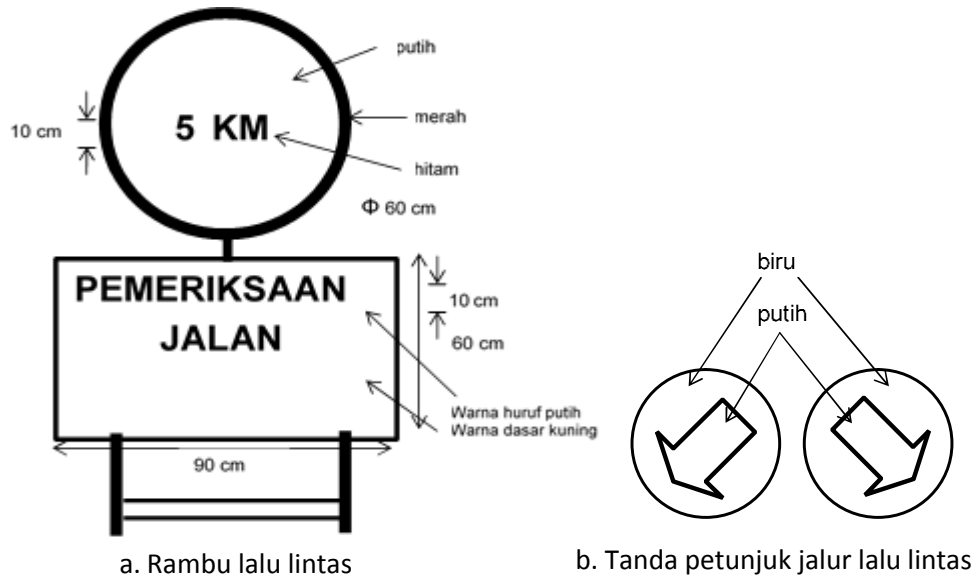
AP1 = Arloji pengukur

E = Engsel

S = Bagian sisi pelat penyetel yang dapat turun naik

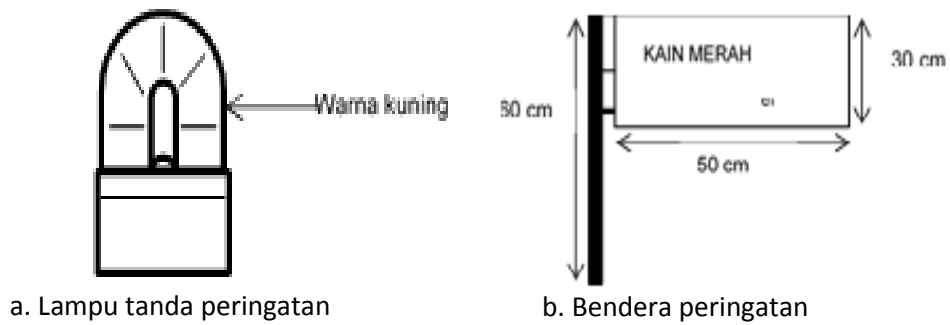
Gambar 3.7 Alat Penyetel *Benkelman Beam*

Sumber: SNI 2416:2011



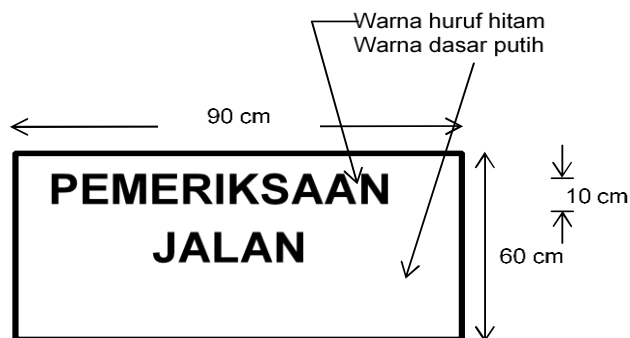
Gambar 3.8 Perlengkapan Keamanan

Sumber: SNI 2416:2011



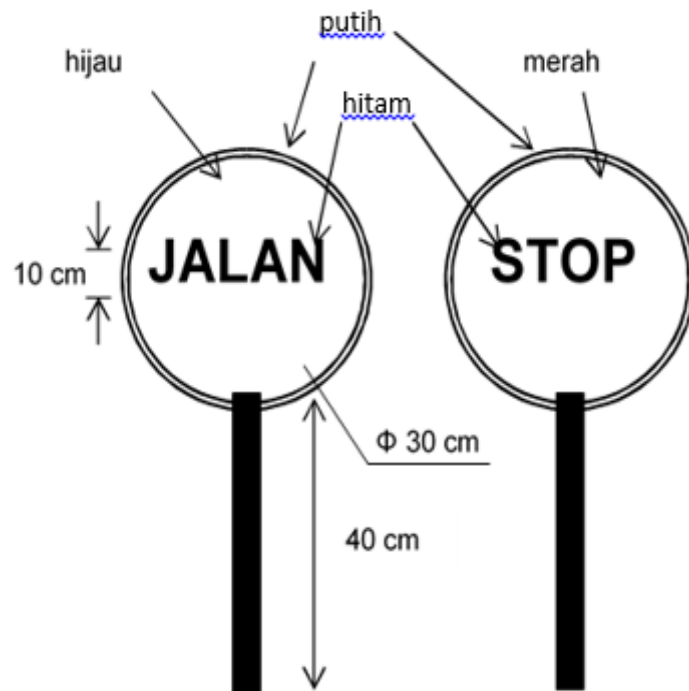
Gambar 3.9 Perlengkapan Keamanan

Sumber: SNI 2416:2011



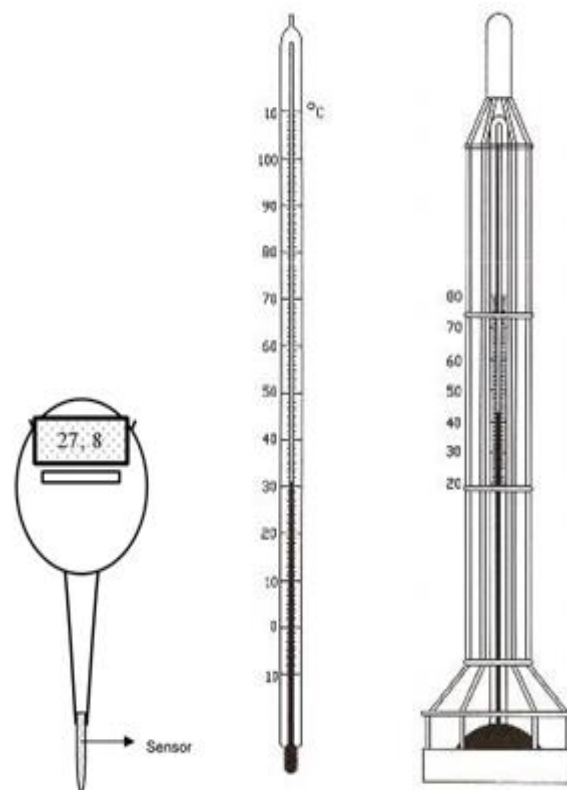
Gambar 3.10 Rambu Lalu Lintas Perlengkapan Keamanan

Sumber: SNI 2416:2011



Gambar 3.11 Rambu Lalu Lintas Perlengkapan Keamanan

Sumber: SNI 2416:2011



Gambar 3.12 Termometer Digital, Termometer Udara, Termometer Permukaan

Sumber: SNI 2416:2011

B. Perencanaan Tebal Lapisan Tambahan Perkerasan Lentur dengan Metode Lentutan

Tebal lapis tambahan (*overlay*) merupakan konstruksi tambahan untuk meningkatkan kekuatan pada struktur perkerasan yang sudah tidak mampu melayani beban lalu lintas, dimana perencanaan tebal lapisan tambahan (*overlay*) ini dapat direncanakan menggunakan Metode Lentutan Pd. T-05-2005-B yang didasarkan pada data survei menggunakan alat Benkleman Beam yang berupa data lendutan balik dan lendutan langsung perkerasan. Adapun ketentuan tahapan perhitungan dalam perencanaan tebal lapisan tambahan (*overlay*) perkerasan lentur menggunakan Metode Lentutan Pd. T-05-2005-B adalah sebagai berikut :

1. Mengitung repetisi 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 Tabel 3.1

Tabel 3.1 Jumlah Lajur Berdasarkan Lebar Perkerasan

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

Sumber: Badan Litbang DPU, 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 3.2 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.

b. Ekuivalen beban sumbu kendaraan (E)

Angka ekuivalen (E) masing-masing golongan beban sumbu (setiap kendaraan) ditentukan menurut Persamaan 3.2, 3.3, 3.4 dan 3.5 atau pada Tabel 3.3.

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

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

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

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

Tabel 3.3 Ekuivalen Beban Sumbu Kendaraan (E)

Beban sumbu (ton)	Ekuivalen 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

Tabel 3.3 Lanjutan

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

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

Faktor hubungan umur rencana dan perkembangan lalu lintas ditentukan menurut Persamaan 3.6 atau tabel 3.4.

$$N = 0,5 \left[1 + (1+r)^n + 2(1+r) \frac{(1+r)^{n-1} - 1}{r} \right] \dots\dots\dots (3.6)$$

Tabel 3.4 Faktor Hubungan Antara Umur Rencana dengan Perkembangan Lalu Lintas (N)

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.

d. Akumulasi ekivalen beban sumbu standar (CESA)

Dalam menentukan akumulasi beban sumbu lalu lintas (CESA) selama umur rencana ditentukan dengan Persamaan 3.7.

$$\text{CESA} = \sum_{\text{Traktor-Trailer}}^{\text{MP}} m \times 365 \times E \times C \times N \dots\dots\dots (3.7)$$

Keterangan :

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 dengan *Benkelman Beam* (BB)

Lendutan yang digunakan untuk perencanaan adalah lendutan berdasarkan hasil pengujian lapangan 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 (bila beban uji tidak tepat sebesar 8,16 ton). Besarnya lendutan balik adalah sesuai Persamaan 3.8 berikut:

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

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 (mm)

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 3.13 serta dapat pula ditentukan melalui tabel 3.5 sebagai berikut:

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

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

Keterangan:

T_L = Temperatur lapis beraspal, diperoleh dari hasil pengukuran langsung dilapangan atau dapat ditentukan melalui prediksi berdasarkan temperatur udara dilapangan dengan menggunakan Persamaan 3.11 berikut:

$$T_L = \frac{1}{3} (T_p + T_t + T_b) \dots\dots\dots(3.11)$$

Keterangan:

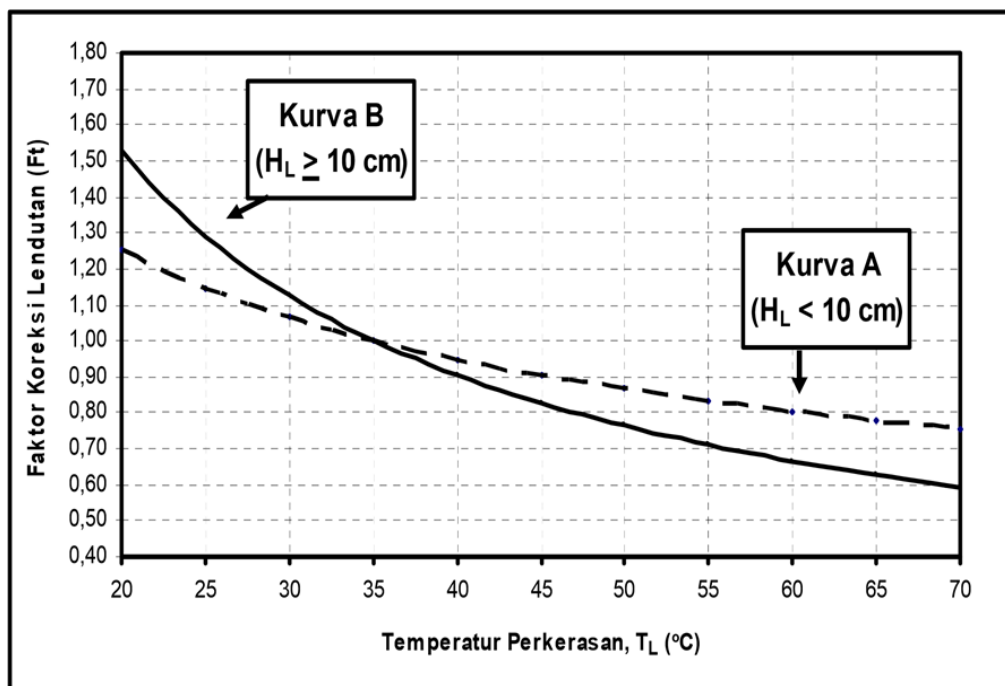
T_p = Temperatur permukaan lapis beraspal

T_t = Temperatur tengah lapis beraspal (Tabel 3.8.)

T_b = Temperatur bawah lapis beraspal (Tabel 3.8.)

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



Gambar 3.13 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
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

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.

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

Tabel 3.6 Lanjutan

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

3. Keseragaman Lendutan (FK)

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. 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 3.13 sebagai berikut:

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

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.

$$= \frac{\sum_1^{n_s} d}{n_s} \dots\dots\dots (3.14)$$

s = Deviasi standar/simpang baku

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

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 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 dengan 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 yang mewakili suatu seksi jalan

s = Standar deviasi (simpangan baku)

5. Lendutan rencana/ijin (D_{rencana})

Hitung lendutan rencana/ijin (D_{rencana}) dengan menggunakan Persamaan 3.19 untuk lendutan dengan alat FWD dan Persamaan 3.20 untuk lendutan dengan alat *Benkleman Beam* (BB):

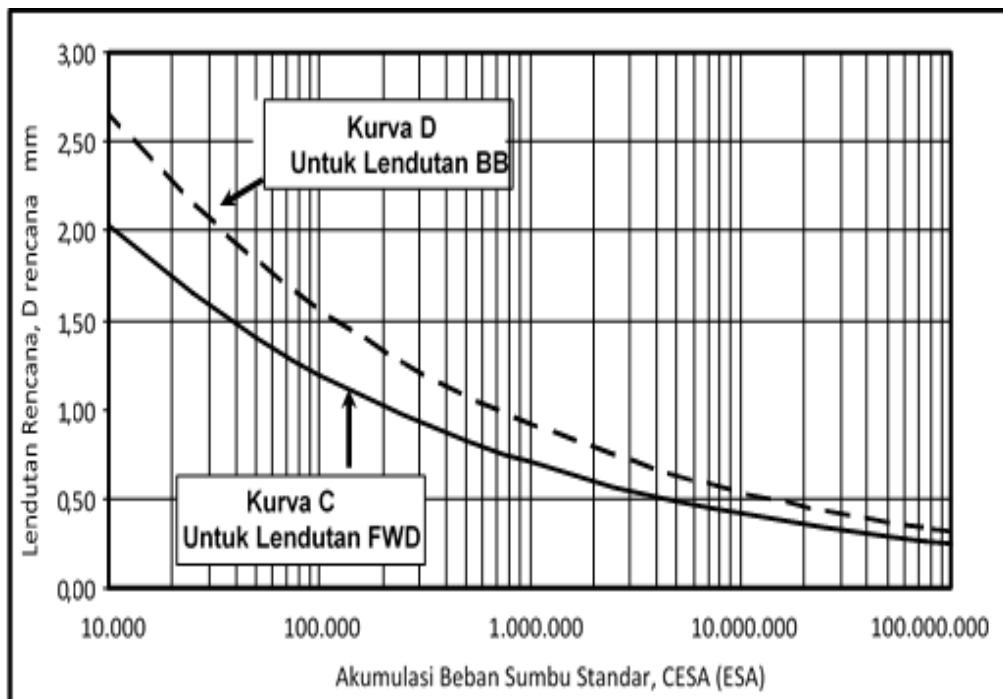
$$D_{\text{rencana}} = 17,004 \times \text{CESA}^{(-0,2307)} \dots\dots\dots (3.19)$$

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

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 3.14 Kurva C untuk lendutan dengan alat FWD dan Gambar 3.14 Kurva D untuk lendutan balik dengan alat *Benkleman Beam* (BB).



Gambar 3.14 Hubungan Antara Lendutan Rencana dan Lalu lintas

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

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

Menghitung tebal lapis tambahan atau *overlay* (H_o) dengan menggunakan Persamaan 3.21 atau dapat diplotkan berdasarkan grafik hubungan antara lendutan sebelum *overlay* dengan lendutan setelah *overlay* pada gambar 3.15.

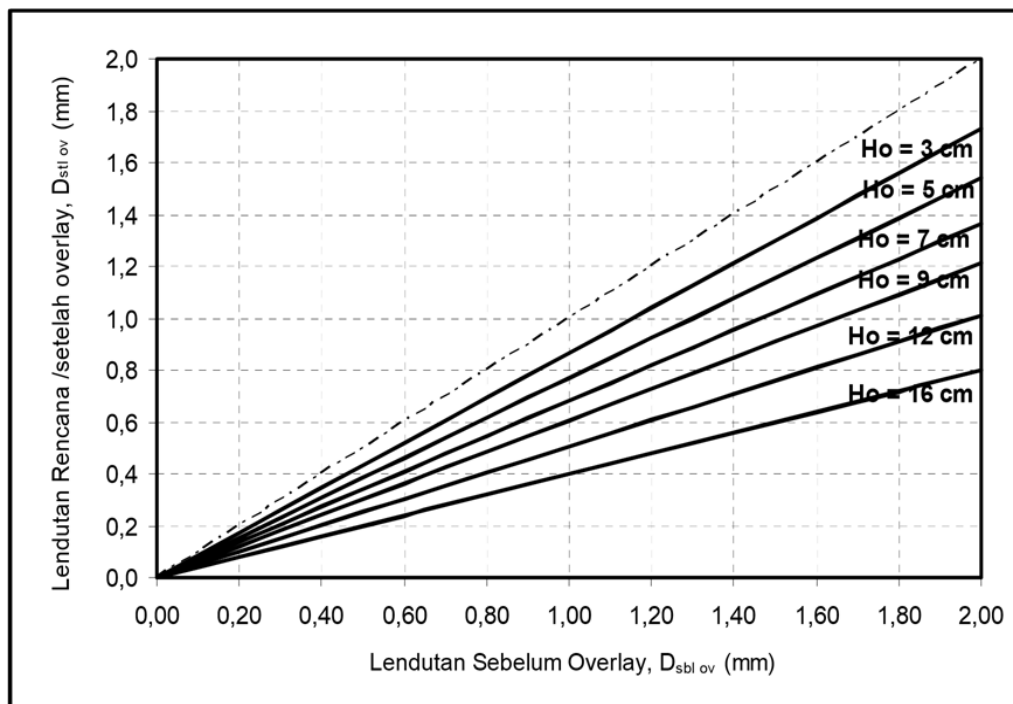
$$H_o = \frac{[\ln(1,0364) + \ln(D_{sbl\ ov}) - \ln(D_{stl\ ov})]}{0,0597} \dots\dots\dots (3.21)$$

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 3.15 Tebal Lapis Tambahan/*Overlay* (H_o)

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

7. Hitung tebal lapis tambahan/*overlay* terkoreksi (H_t)

Untuk mencari tebal lapis tambahan/*overlay* terkoreksi (H_t) adalah dengan mengalikan nilai H_o dengan faktor koreksi *overlay* (F_o). Dalam perencanaan tebal lapis tambah/*overlay* didasarkan pada temperatur standar dalam satuan $^{\circ}\text{C}$ yaitu sebesar 35°C , mengingat temperatur di daerah-daerah di Indonesia

memiliki temperatur perkerasan rata-rata tahunan (TPRT) yang tentunya berbeda-beda setiap daerahnya, maka perlu dilakukan koreksi berdasarkan temperatur perkerasan rata-rata tahunan untuk daerah atau kota sesuai nilai temperatur perkerasan rata-rata tahunan yang terlampir pada Pedoman Pd T-05-2005-B. Adapun untuk menghitung tebal lapis tambahan/*overlay* terkoreksi (Ht) dapat dianalisis sesuai Persamaan 3.22 dan 3.23.

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

Keterangan:

F_o = Faktor koreksi tebal perkerasan (*overlay*)

TPRT = Temperatur perkerasan rata-rata tahunan untuk daerah atau kota

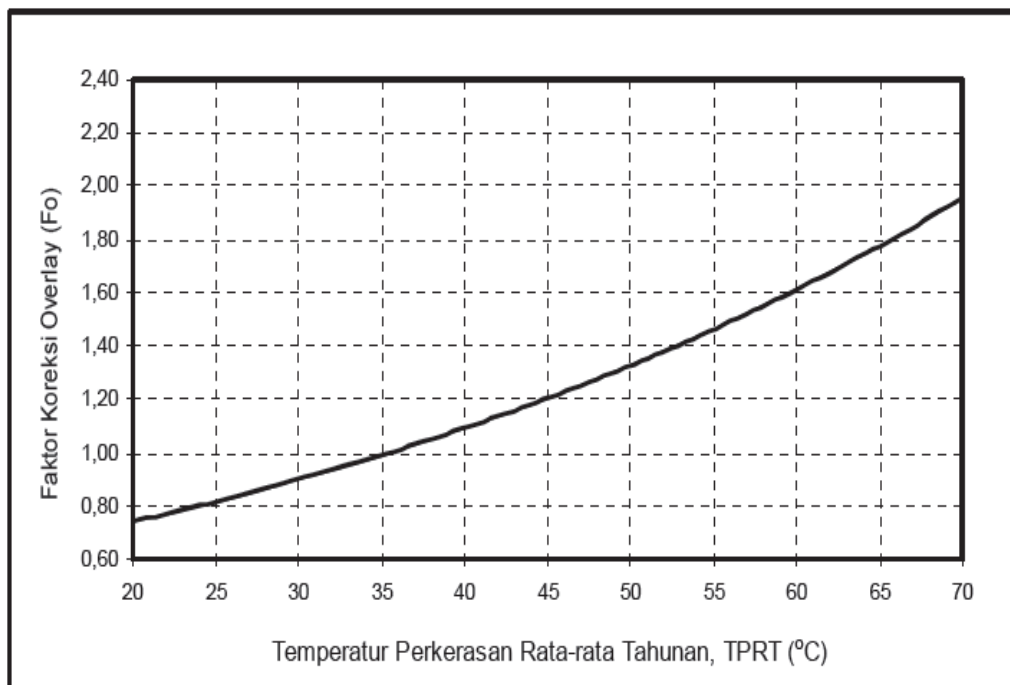
$$H_t = H_o \times F_o \dots\dots\dots (3.23)$$

Keterangan:

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

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

F_o = Faktor koreksi tebal lapis tambah



Gambar 3.16 Faktor Korelasi Tebal Lapis Tambah/*Overlay* (F_o)

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

8. Jenis Lapis Tambah

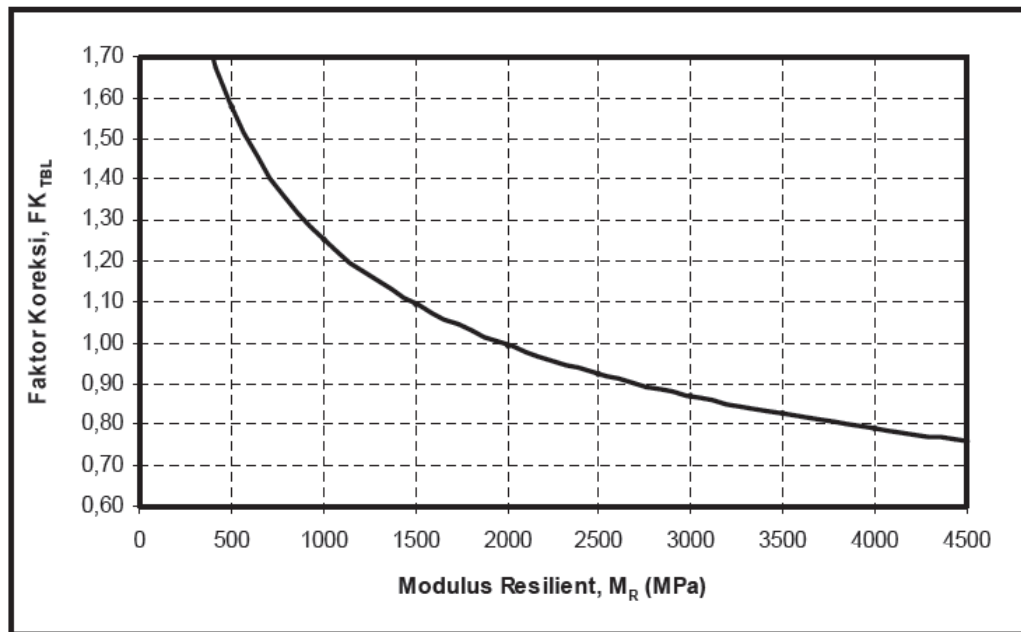
Pedoman Pd. T-05-2005-B ini berlaku untuk lapis tambah dengan Laston, yaitu modulus resilien (MR) sebesar 2000 MPa dan Stabilitas Marshall minimum 800 kg. Nilai modulus resilien (MR) diperoleh berdasarkan pengujian UMATTA atau alat lain dengan temperatur pengujian 25°C. Apabila jenis campuran beraspal 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 3.24 atau Gambar 3.17 dan Tabel 3.9

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

Keterangan:

FK_{TBL} = Faktor koreksi tebal lapis tambah penyesuaian

M_R = Modulus resilien (MPa)



Gambar 3.17 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})

Jenis Lapisan	Modulus Resilien, 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: Badan Litbang DPU, Pd. T-05-2005-B.