

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)**

Tanah saja biasanya tidak cukup kuat dan tahan, tanpa adanya deformasi yang berarti, terhadap beban roda berulang. Untuk itu perlu lapis tambahan yang terletak diantara tanah dan roda, atau lapis paling atas dari badan jalan. Lapis tambahan ini dapat dibuat dari bahan khusus yang terpilih, yang selanjutnya disebut lapis keras/perkerasan/*pavement*.

Perkerasan jalan adalah campuran agregat dan bahan ikat (*binder*) yang diletakkan di atas tanah dasar dengan pemadatan untuk melayani beban lalu lintas. Tujuan utama pembuatan struktur perkerasan jalan adalah untuk mengurangi tegangan atau tekanan akibat beban roda sehingga mencapai tingkat nilai yang dapat diterima oleh tanah yang menyokong beban tersebut.

Konstruksi perkerasan umumnya dibedakan menjadi 2 (dua) jenis yaitu perkerasan lentur (aspal) dan perkerasan kaku (beton semen). Dinamakan perkerasan kaku karena struktur perkerasan mengalami lendutan (*deflection*) akibat beban yang relatif kecil. Kondisi ini disebabkan lapis permukaan mempunyai modulus elastisitas ( $E$ ) yang sangat besar dibandingkan lapisan di bawahnya. Perkerasan kaku umumnya terdiri dari lapis beton semen (*Portland Cement Concrete/PCC*) yang dihamparkan diatas tanah dasar (*subgrade*) atau lapis pondasi (*base course*). Wiryanto (2010) mengatakan bahwa perkerasan jalan beton dilaksanakan dalam beberapa tahap, mulai dari pekerjaan tanah (urugan dan galian), pembuatan lapis pondasi, dan lapisan di atasnya (berupa beton). Susunan lapis perkerasan untuk jalan beton ditunjukkan dalam Gambar 3.1 di bawah ini.



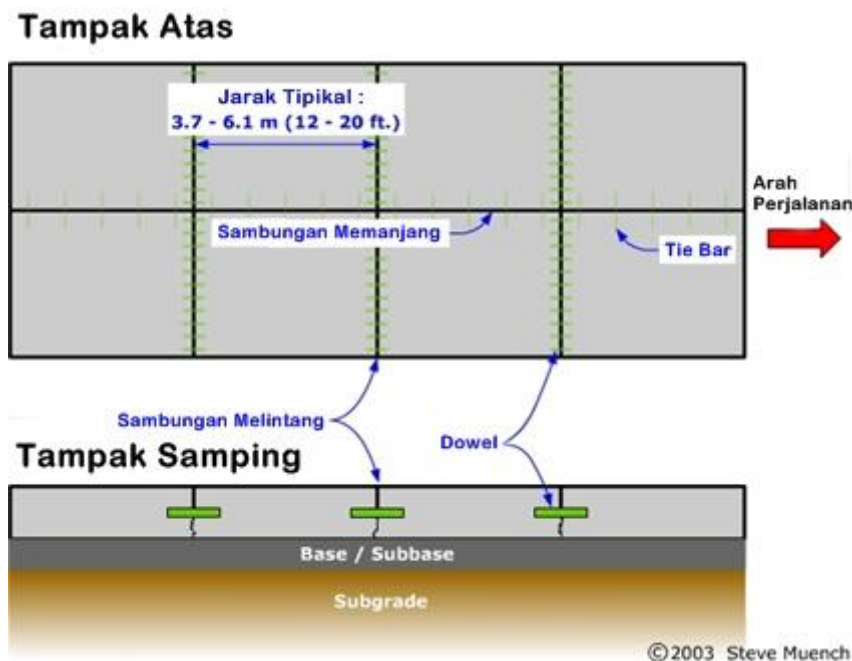
**Gambar 3.1 Susunan Lapisan Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)**

(Sumber: *Pavement Design Guide*, 1992)

Susunan lapisan perkerasan jalan beton tersebut terdiri dari dua lapis, yaitu lapisan beton dan lapisan pondasi di bawahnya. Lapisan perkerasan beton dikerjakan secara per segmen dan diberi sekat untuk mengantisipasi resiko kerusakan akibat faktor kembang susut (*shrinkage*). Lapis beton tersebut berada di atas lapisan pondasi yang bisa berupa material berbutir dengan tebal minimal 15 cm atau campuran beton kurus (*lean-mix concrete*) dengan tebal minimum 10 cm.

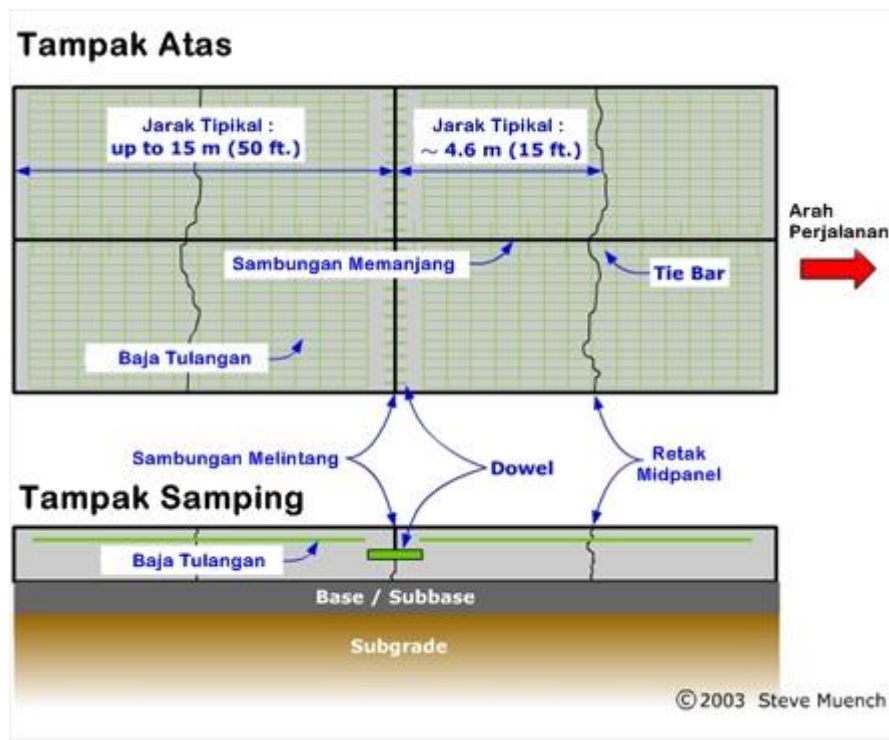
Tipe perkerasan kaku (beton semen) antara lain dapat dibedakan menjadi:

1. Perkerasan beton semen bersambung tanpa tulangan (*jointed plain concrete pavement/JPCP*). Perkerasan tipe ini hanya menggunakan sambungan susut (*contraction joint*) untuk mengontrol retak pada beton. Tipe perkerasan ini menghasilkan jarak antar sambungan tidak lebih dari 6,1 meter. Ruji (*dowel*) digunakan pada sambungan transversal sebagai sistem transfer beban. Batang pengikat (*tie bar*) pada sambungan memanjang digunakan untuk mengikat pelat agar tidak bergerak secara horisontal. Perkerasan beton semen bersambung tanpa tulangan (*JPCP*) ditunjukkan dalam Gambar 3.2 di bawah ini.



**Gambar 3.2 Perkerasan Beton Semen Bersambung Tanpa Tulangan (JCP)**  
(Sumber: [www.pavementinteractive.org](http://www.pavementinteractive.org))

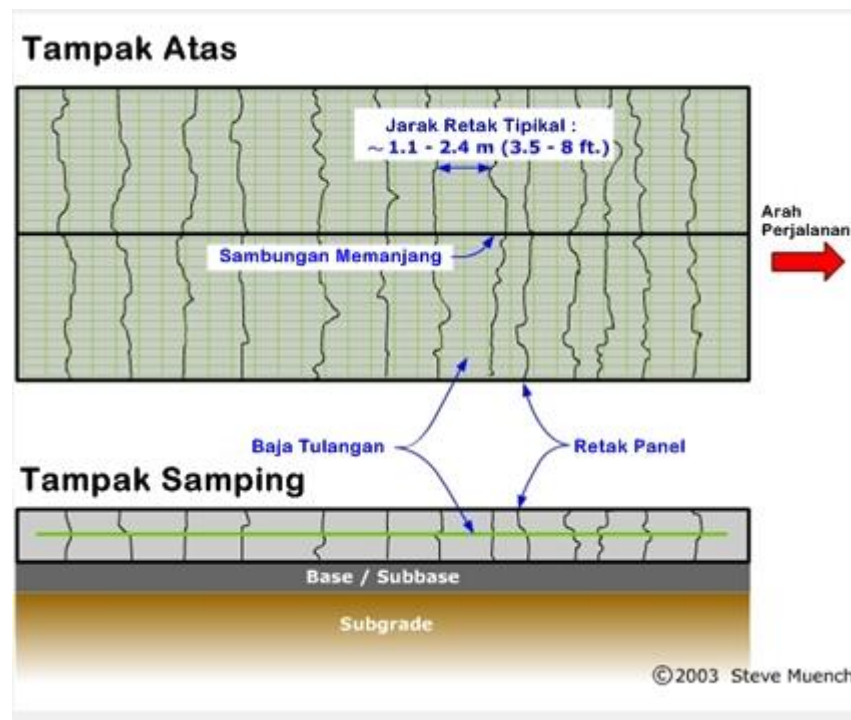
2. Perkerasan beton semen bersambung dengan tulangan (*jointed reinforced concrete pavement/JRCP*). Perkerasan tipe ini menggunakan sambungan susut memanjang maupun melintang dan baja tulangan untuk mengontrol retak pada beton. Sambungan transversal tipe perkerasan ini dapat dibuat lebih panjang dibandingkan perkerasan beton semen bersambung tanpa tulangan. Jarak sambungan tipikal antara 7,6 meter sampai 15,2 meter. *Dowel* yang digunakan pada sambungan transversal bermaksud sebagai sistem penyalur beban, sehingga pelat yang saling berdampungan dapat bekerja bersama-sama tanpa terjadi perbedaan penurunan yang berarti. Perkerasan beton semen bersambung dengan tulangan (*JRCP*) ditunjukkan dalam Gambar 3.3 di bawah ini.



**Gambar 3.3 Perkerasan Beton Semen Bersambung Dengan Tulangan (JRCP)**

(Sumber: [www.pavementinteractive.org](http://www.pavementinteractive.org))

3. Perkerasan beton semen menerus dengan tulangan (*continuously reinforced concrete pavement/CRCP*). Perkerasan tipe ini tidak memerlukan adanya sambungan muai. Retak melintang diperbolehkan untuk terjadi akan tetapi diikat kuat oleh baja tulangan menerus. Perkerasan beton semen menerus dengan tulangan (*CRCP*) ditunjukkan dalam Gambar 3.4 di bawah ini.



**Gambar 3.4 Perkerasan Beton Semen Menerus Dengan Tulangan (CRCP)**

(Sumber: [www.pavementinteractive.org](http://www.pavementinteractive.org))

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi respon struktural dari perkerasan beton, seperti jarak antara sambungan, ketebalan slab beton, sifat beton, perangkat transfer pembebanan, lebar sambungan, ketebalan dan sifat *subbase*, karakteristik *subgrade*, besarnya dan lokasi beban kendaraan di atas perkerasan.

### 3.1.1 *Subgrade*

*Subgrade* adalah tanah dasar yang dipadatkan untuk mencapai kekuatan yang tepat. Kekuatan *subgrade* biasanya dinyatakan sebagai modulus reaksi tanah dasar,  $k$ . Nilai  $k$  ditentukan dari uji coba pada pembebanan plat baja bundar, dengan diameter 30 inci (762 mm) (Huang, 2004). Nilai modulus reaksi tanah dasar seperti Persamaan 3.1.

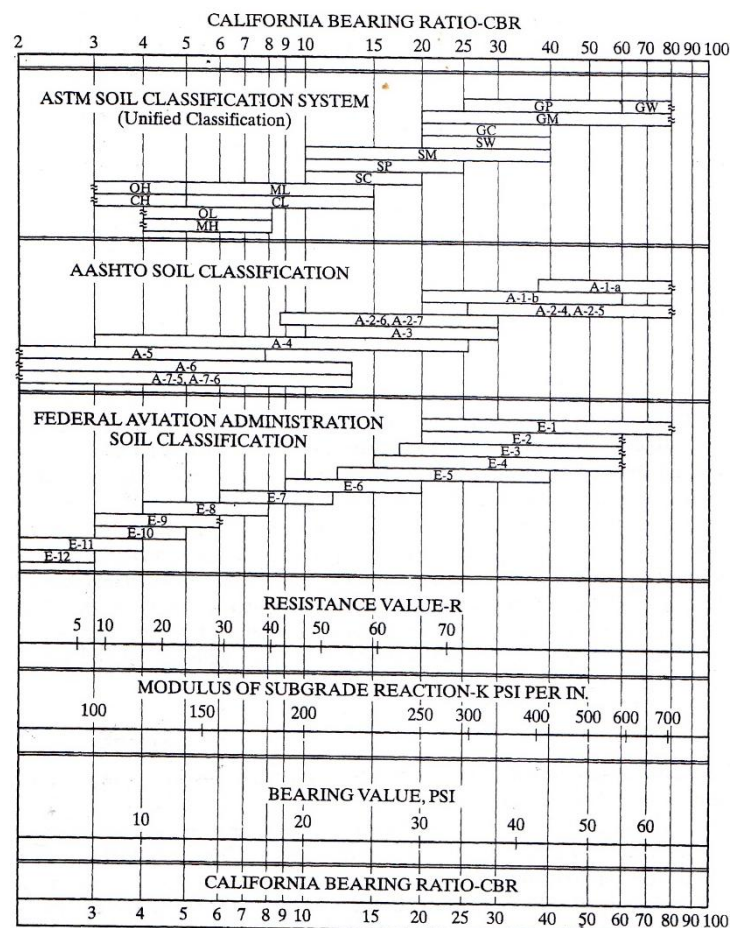
$$k = \frac{p}{\Delta} \quad (3.1)$$

dengan:

$p$  = tekanan pada pelat baja, yang telah ditetapkan pada tingkat 10 psi, dan

$\Delta$  = defleksi dari pelat baja yang diberikan dalam inci.

Pengujian pembebanan pada plat baja merupakan pengamatan di lapangan dengan biaya yang tinggi dan juga memakan waktu yang lama. Karena alasan tersebut, banyak dari lembaga atau para peneliti jalan berusaha untuk mendapatkan nilai korelasi  $k$  melalui pendekatan yang lebih sederhana dengan menggunakan pengujian, seperti pengujian *CBR* (*California Bearing Ratio*). Pengujian ini yang paling populer adalah salah satu yang dirancang oleh *PCA*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 di bawah ini.



**Gambar 3.5 Perkiraan Hubungan Antara Nilai  $k$  dan Sifat Tanah Lain**

(Sumber: Huang, 2004)

### 3.1.2 Subbase

Menurut pedoman Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, yang diterbitkan oleh Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah (2003), *subbase*

adalah lapisan yang diletakkan di bawah perkerasan beton. Lapisan ini dapat dibangun menggunakan tiga macam bahan:

1. Stabilisasi material berbutir dengan kadar bahan pengikat yang sesuai dengan hasil perencanaan, untuk menjamin kekuatan campuran dan ketahanan terhadap erosi. Jenis bahan pengikat dapat meliputi semen, kapur, serta abu terbang dan/atau slag yang dihaluskan.
2. Campuran beraspal bergradasi rapat (*dense-graded asphalt*).
3. Campuran beton kurus (*Lean-Mix Concrete*).

Dalam rangka upaya meningkatkan kinerja perkerasan beton, terutama lapisan subgrade, stabilisasi campuran berbutir atau tanah dengan semen, yang biasa dikenal sebagai *Cement Treated Base* (CTB) sering digunakan dalam banyak pembangunan jalan di Indonesia. Ketebalan minimum *subbase* adalah 10 cm. *Subbase* dibangun di bawah slab beton dengan tujuan:

1. Agar memberikan lantai kerja yang stabil untuk peralatan konstruksi.
2. Untuk memberikan dukungan yang seragam di bawah slab beton.
3. Untuk mengurangi defleksi sambungan, dan meningkatkan ikatan antar agregat yang mempengaruhi transfer beban di sendi dan retak.
4. Untuk mengendalikan penyusutan dan pengembangan pada tanah dasar.
5. Untuk mencegah *pumping* dari material tanah dasar pada sambungan, retak, dan tepi slab.

### 3.1.3 Slab Beton

Slab beton adalah lapisan paling atas dalam bagian lapisan perkerasan. Beton semen portland, baja tulangan, perangkat transfer beban, dan bahan penutup sambungan merupakan material dasar untuk membuat slab beton (AASHTO, 1993). Ketebalan dari slab beton tergantung oleh kelelahan *flexural* dari kekuatan beton, tipe sambungan, nilai transfer beban efisiensi, penggunaan bahu jalan, kekuatan tanah dasar dan *subbase*, erosi dari *subbase* dan material tanah dasar, pengaruh lingkungan dan beban lalu lintas rencana. Menurut Huang (2004) menyajikan gambaran mengenai sifat khas dari nilai material beton untuk

digunakan dalam perkerasan beton, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 di bawah ini.

**Tabel 3.1 Nilai Modulus Elastis dan *Poisson Ratio* untuk Berbagai Bahan Semen, 1 psi = 6,9 kPa**

Material	Modulus Elastisitas		<i>Poisson Ratio</i>
	<i>Range</i> (psi)	<i>Typical</i> (psi)	
<i>Portland cement concrete</i>	3x10 <sup>6</sup> to 6x10 <sup>6</sup>	4x10 <sup>6</sup>	4x10 <sup>6</sup>
<i>Cement Treated Base</i>	1x10 <sup>6</sup> to 3x10 <sup>6</sup>	2x10 <sup>6</sup>	2x10 <sup>6</sup>

(Sumber: Huang, 2004)

#### 1. Modulus Keruntuhan

Kekuatan lentur, juga dikenal sebagai modulus keruntuhan yang ditetapkan sebagai parameter desain untuk perkerasan beton. Ada dua hal yang berbeda yang dapat digunakan untuk menentukan kekuatan lentur, yaitu uji pembebanan center-point menurut AASHTO T-177 and ASTM C-293; dan uji pembebanan third-point menurut AASHTO T-97 and ASTM C-78 (Mallick, 2009).

Menurut pedoman Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen, yang diterbitkan oleh Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2003), kekuatan beton harus diambil dari lapisan slab yang dinyatakan dalam kekuatan lentur yang dapat ditentukan oleh pengujian pembebanan third-point menurut ASTM C-78. Nilai ini harus berkisar antara 3 sampai 5 Mpa.

Huang (2004) memberikan sebuah hubungan antara modulus keruntuhan dan kuat tekan beton, seperti yang dijelaskan oleh persamaan 3.2a di bawah ini.

$$S_c = 8 \sqrt{f'_c} \text{ to } 10 \sqrt{f'_c} \quad (3.2a)$$

dengan:

$S_c$  = modulus keruntuhan dalam psi, dan

$f'_c$  = kuat tekan dalam psi.

Untuk berat beton normal, Institusi Beton Amerika menyarankan:



$$E_c = 57000\sqrt{f'_c} \quad (3.2b)$$

dimana:

$E_c$  = modulus elastisitas dalam psi.

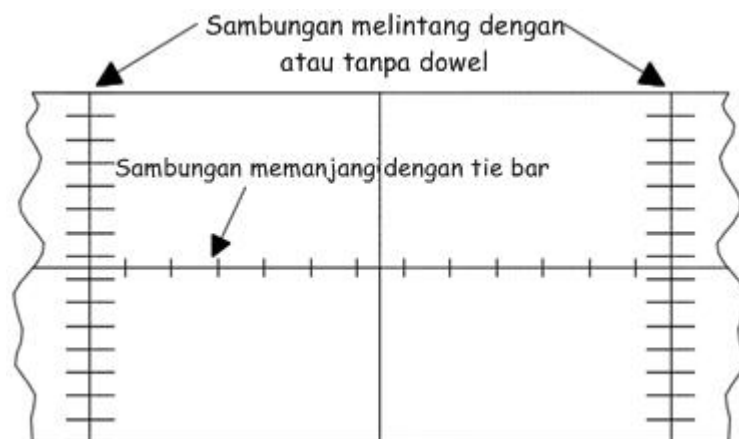
### 3.1.4 *Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)*

Perkerasan beton dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis: perkerasan beton semen bersambung tanpa tulangan (*Jointed Plain Concrete Pavement/JPCP*), perkerasan beton semen bersambung dengan tulangan (*Jointed Reinforced Concrete Pavement/JRCP*), perkerasan beton semen menerus dengan tulangan (*Continuously Reinforced Concrete Pavement/CRCP*) dan perkerasan beton semen pra-tegang (*Prestressed Concrete Pavement/PCP*) (Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah, 2003). Penelitian yang akan dilakukan hanya fokus pada perilaku dan kinerja dari *JPCP*, maka hanya perkerasan beton jenis ini yang akan dibahas.

Menurut Huang (2004), semua perencanaan perkerasan beton harus dibangun dengan kontraksi sambungan yang berdekatan. Tergantung pada jenis agregat, iklim dan pengalaman sebelumnya, jarak sambungan adalah antara 4,6 m dan 9,1 m yang sudah bisa digunakan secara luas. Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah (2003) merekomendasikan jarak antar sambungan adalah 4 m hingga 5 m untuk slab beton tipe *JPCP*.

#### 1. Perangkat Transfer Pembebanan

Ikatan antar agregat dan perangkat mekanis dapat digunakan untuk mentransfer kuat geser pada sambungan. Alat transfer beban mekanik ini ditempatkan dalam sambungan untuk transfer fisik yang diterapkan antara kuat geser dan slab di sisi berlawanan pada sambungan. *Dowel* dan *tie bar* adalah contoh perangkat mekanik yang banyak digunakan dalam konstruksi perkerasan. Posisi *dowel* dan *tie bar* ditunjukkan pada Gambar 3.6 di bawah ini.



**Gambar 3.6 Perangkat Transfer Pembebanan**

(Sumber: Huang, 2004)

## 2. Dowel

*Dowel* memiliki peran penting dalam sambungan melintang terutama ketika perkerasan beton tidak menggunakan baja tulangan. Benda ini biasanya berbentuk batang bulat dengan diameter sekitar  $1/8$  dari ketebalan beton yang berukuran 350 sampai 460 mm. *Dowel* yang direncanakan diletakkan di tengah tebal pelat dengan jarak antar dowel 300 mm dan ditempatkan di posisi tegak lurus pada potongan sambungan (US Departement of Transport, 1995).

Banyak jenis *dowel* yang digunakan di seluruh dunia, seperti: baja ringan standar *epoxy-coated dowel bar*, diperkuat baja dengan serat polimer (*fibre reinforced polymer/FRP*), dowel dengan baja padat tahan karat, *grouted dowels stainless steel*, *stainless steel clad dowels*, dan *stainless steel pipa dowel* (Darestani, 2007).

## 3. Tie Bars

*Tie Bar* memiliki sistem kerja yang hampir sama dengan *dowel* yang dipasang pada sambungan melintang, bedanya tie bar digunakan pada sambungan memanjang. Kinerjanya juga tidak sekuat seperti *dowel*. *US Departement of Transport* (1995) menspesifikasikan diameter *tie bar* harus  $5/8$  inci (16 mm) dan panjang 30 inci (760 mm) dan jarak antar *tie bar* dari pusat 30 inci (760 mm).

### **3.1.5 Bahu**

Hal ini telah diterima di seluruh dunia bahwa bahu jalan dalam respon struktural dan performa dari perkerasan beton membawa efek positif. Bahu aspal ketika ditempatkan di dekat perkerasan beton akan mengalami pemadatan berlanjut hasil dari beban lalu lintas setelah pembukaan jalan. Akibatnya, celah vertikal di antara permukaan atas beton dan bahu yang dihasilkan mengakibatkan hilangnya permukaan yang menahan pada bagian memanjang di tepi slab beton. Pada akhirnya mengakibatkan hasil yang buruk dari slab beton. Oleh karena itu, bahu beton telah secara luas digunakan dalam perkerasan beton untuk memperpanjang umur perkerasan. Berbeda dengan praktek di masa lalu, bahu beton sekarang sering digunakan sebagai slab beton yang kuat karena kontribusi strukturalnya, yang mana termasuk penurunan dari penyebab tekanan di slab beton, kontrol kelembaban, dan kebijakan konstruksi (Darestani, 2007).

Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2003) merekomendasikan beberapa pertimbangan pedoman penggunaan bahu beton dalam perkerasan beton:

1. Bahu yang dikunci dan diikat dengan lajur lalu lintas dengan lebar minimum 1.5 m, atau
2. Peningkatan lebar jalan dari jalur lalu lintas sebesar 0,6 m.

### **3.2 Beban Lalu Lintas**

Penurunan perkerasan tidak dipengaruhi oleh kendaraan ringan. Oleh karena itu, hanya kendaraan berat yang dianggap dalam proses perencanaan perkerasan atau dalam analisis struktural. Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah (2003) menyatakan bahwa kendaraan berat dengan berat minimum 5 ton menjadi jenis kendaraan yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan perkerasan beton.

Beban lalu lintas adalah berupa beban repetisi atau pengulangan. Struktur perkerasan jalan dalam menjalankan fungsinya berkurang sebanding dengan bertambahnya umur perkerasan dan bertambahnya beban lalu lintas yang dipikul dari kondisi awal desain perkerasan tersebut. Dari beban kendaraan, respon

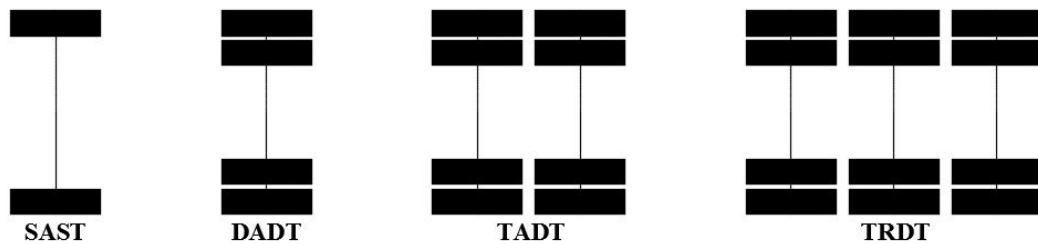
struktural perkerasan beton dipengaruhi oleh pemilihan konfigurasi gandar dan luasan beban roda yang diterapkan. Rincian dan informasi menyeluruh tentang konfigurasi beban kendaraan dan besaran konfigurasi diperlukan untuk mengembangkan sebuah pemodelan beban yang akurat untuk analisis perkerasan sehingga diperoleh respon yang lebih akurat.

### **3.2.1 Konfigurasi Sumbu**

Produsen kendaraan menggunakan berbagai jenis kelompok sumbu pada kendaraan berat, yang paling banyak diproduksi adalah single, tandem, dan tridem sumbu dengan dua kombinasi ban: ban tunggal dan ban ganda. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2003) mengklasifikasikan aplikasi dari sumbu pembebanan pada jalan atau konstruksi jalan tol dalam 4 konfigurasi sumbu yang berbeda:

1. Sumbu tunggal roda tunggal (STRT).
2. Sumbu tunggal roda ganda (STRG).
3. Sumbu tandem roda ganda (STdRG).
4. Sumbu tridem roda ganda (STrRG).

Saat ini, kebanyakan truk atau niaga lainnya dan kendaraan berat menggunakan ban konfigurasi ganda. Jarak antara sumbu, lebar sumbu, dan jarak antara ban ganda dengan sumbu yang bervariasi diantaranya banyak produsen yang memproduksi. Para peneliti dan banyak pihak berwenang juga menggunakan nilai yang berbeda dari konfigurasi sumbu. Darestani (2007) mengumpulkan banyak konfigurasi sumbu yang digunakan oleh para peneliti atau lembaga dan menyimpulkan bahwa jarak antara as roda berkisar dari 1200 mm sampai 1600 mm; lebar sumbu berkisar antara 305 mm sampai 350 mm; dan ban ganda berkisar antara 1800 mm sampai 2134 mm. Jenis kelompok sumbu yang dipertimbangkan dalam perencanaan perkerasan beton ditunjukkan pada Gambar 3.7 di bawah ini.



**Gambar 3.7 Jenis Kelompok Sumbu Yang Dipertimbangkan Dalam Perencanaan Perkerasan Beton**

(Sumber: Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah, 2003)

### 3.2.2 Jenis Daerah Kontak Perkerasan

Transfer dari berat kotor kendaraan pada perkerasan dilakukan melalui ban. Hal ini terjadi karena ada berbagai area dari ban yang mana kapasitas muatannya tergantung pada ukuran, penilaian lapisan, dan tekanan inflasi. Ukuran ban biasanya didefinisikan oleh lebar ban, panjang dan luas kontak area (Huang, 2004).

Kontak tekanan menentukan ukuran daerah kontak. Beban sumbu yang lebih berat akan menyebabkan tekanan ban yang lebih tinggi dan lebih menghasilkan efek yang merusak pada perkerasan, jadi penggunaan tekanan ban sebagai kontak tekanan sudah pada sisi yang aman. Tekanan kontak ban mempengaruhi daerah kontak ban pada perkerasan dan tekanan pada perkerasan. Austroads (2004) melaporkan bahwa tekanan ban itu bervariasi antara 500 kPa sampai 1000 kPa pada kendaraan berat yang melintasi pada suatu ruas jalan (Darestani, 2007).

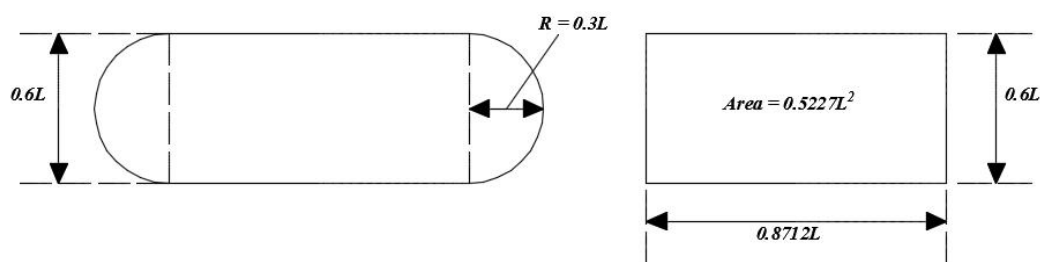
Area kontak ditunjukkan pada Gambar 3.8 yang sebelumnya digunakan oleh PCA (1996) untuk merancang perkerasan beton. Daerah kontak masing-masing ban terdiri dari persegi panjang dan dua daerah setengah lingkaran. PCA mengasumsikan bahwa ban memiliki panjang  $L$  dan lebar  $0,6 L$ , dengan demikian area kontak:

$$A = \pi(0,3L)^2 + (0,4L)(0,6L) = 0,5227L^2 \quad (3.3a)$$

atau

$$L = \sqrt{\frac{A}{0,5227}} \quad (3.3b)$$

Pada tahun 1984, PCA mengeluarkan metode yang lebih maju berdasarkan prosedur elemen terbatas dan mengkonversi asumsi sebelumnya daerah kontak persegi panjang dan dua setengah lingkaran menjadi satu wilayah persegi panjang. Dengan lebar ban  $0,6L$ , kemudian dihasilkan sebuah konversi area persegi panjang dengan panjang  $0,8712L$  dan sebanding dengan luas area  $0,5227L^2$ . Dimensi daerah kontak ban ditunjukkan pada Gambar 3.8 di bawah ini.



**Gambar 3.8 Dimensi Daerah Kontak Ban**

(Sumber: Huang, 2004)

### 3.3 Persyaratan Teknis Perkerasan Kaku

Pada perkerasan jalan beton terdapat pedoman sesuai dengan Pd-T-14-2003 tentang perencanaan perkerasan jalan beton semen untuk perkerasan kaku serta perhitungan tebal perkerasan kaku yang mencakup persyaratan teknis, prosedur perencanaan, serta cara perhitungan tebal perkerasan kaku. Perencanaan tebal perkerasan kaku dengan metode Bina Marga, dimana dalam perencanaannya dipakai prinsip kelelahan (*fatigue*) pada kuat tarik lentur beton dan faktor erosi pada pondasi bawah atau subgrade, dimana menurut Bina Marga total *fatigue* dan faktor erosi harus kurang dari atau sama dengan 100%.

Dalam perencanaan perkerasan kaku terdapat beberapa faktor yang harus diperhatikan, antara lain:

1. Peranan perkerasan kaku dan intensitas lalu lintas yang akan dilayani.
2. Volume lalu lintas, konfigurasi sumbu dan roda, beban sumbu, ukuran dan tekanan beban, pertumbuhan lalu lintas, jumlah jalur dan arah lalu lintas.
3. Umur rencana perkerasan kaku ditentukan atas dasar pertimbangan peranan perkerasan, pola lalu lintas dan nilai ekonomi perkerasan serta faktor pengembangan wilayah.

4. Kapasitas perkerasan yang direncanakan harus dipandang sebagai pembatasan.
5. Daya dukung dan keseragaman tanah dasar sangat mempengaruhi keawetan dan kekuatan pelat perkerasan.
6. Lapis pondasi bawah meskipun bukan merupakan bagian utama dalam menahan beban, tetapi merupakan bagian yang tidak bisa diabaikan dengan fungsi sebagai berikut:
  - a. mengendalikan pengaruh kembang susut tanah dasar,
  - b. mencegah intrusi dan pemompaan pada sambungan, retakan pada tepi-tepi pelat,
  - c. memberikan dukungan yang mantap dan seragam pada pelat
  - d. sebagai perkerasan jalan kerja selama pelaksanaan.
7. Kekuatan lentur beton (*flexural strength*) merupakan pencerminan kekuatan yang paling cocok untuk perencanaan karena tegangan kritis dalam perkerasan beton terjadi akibat melenturnya perkerasan beton tersebut.

Parameter-parameter yang digunakan dalam merencanakan perkerasan kaku meliputi tanah dasar, pondasi bawah, beton semen, lalu lintas, dan sambungan.

### 3.3.1 Tanah Dasar

Pada perkerasan jalan beton, daya dukung tanah tidak berpengaruh terhadap kekuatan struktur perkerasan. Hal ini disebabkan karena kekakuan maupun modulus elastisitas plat beton yang cukup tinggi, sehingga penyebaran beban ke lapisan tanah cukup luas. Dengan demikian maka tegangan yang diterima oleh tanah dasar menjadi relatif kecil.

Menurut SNI Pd T-14-2003 mengenai perencanaan tebal perkerasan jalan beton semen, apabila tanah dasar mempunyai nilai CBR lebih kecil dari 2%, maka harus dipasang pondasi bawah yang terbuat dari beton kurus (*Lean-Mix Concrete*) setebal 15 cm yang dianggap mempunyai nilai CBR tanah dasar efektif 5 %. Persyaratan tanah dasar yang cukup penting di dalam perkerasan beton adalah daya dukung tanah yang harus diusahakan sedemikian rupa agar seragam atau kepadatannya relatif sama. Keseragaman yang merata serta kepadatan yang baik pada perkerasan jalan beton dapat mencegah kerusakan bila terjadi *pumping*

(*pumping* adalah proses keluarnya air dan butiran-butiran tanah dasar atau pondasi bawah melalui sambungan dan retakan atau pada bagian pinggir perkerasan akibat lendutan atau gerakan vertikal pelat karena beban lalu lintas, setelah adanya air bebas yang terakumulasi di bawah pelat).

### 3.3.2 Pondasi Bawah

Pondasi bawah tidak memiliki nilai struktural, tetapi berfungsi untuk:

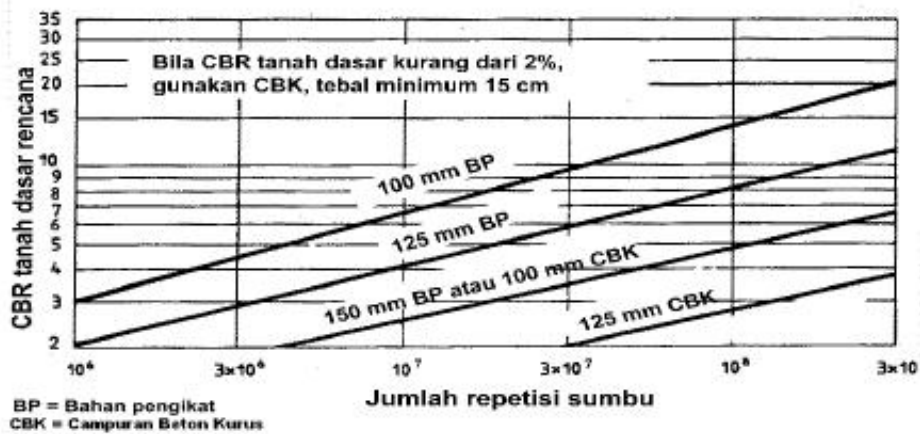
1. menyediakan lapisan yang seragam, stabil dan permanen,
2. melindungi gejala *pumping* butir-butiran halus tanah pada daerah sambungan, retakan dan ujung samping perkerasan,
3. mengurangi terjadinya keretakan pada plat beton, dan
4. menyediakan lantai kerja.

Bahan pondasi bawah dapat berupa:

1. bahan berbutir,
2. stabilisasi atau dengan beton kurus giling padat (*Lean Rolled Concrete*), dan
3. campuran beton kurus (*Lean-Mix Concrete*).

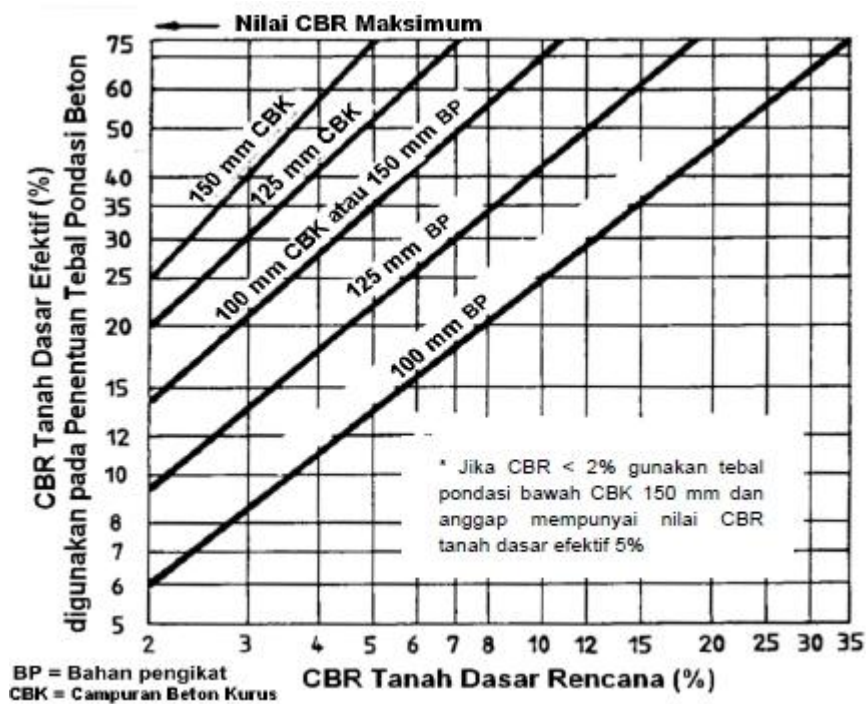
Lapis pondasi bawah perlu diperlebar sampai 60 cm diluar tepi perkerasan beton semen. Untuk tanah ekspansif perlu pertimbangan khusus perihal jenis dan penentuan lebar lapisan pondasi dengan memperhitungkan tegangan pengembangan yang mungkin timbul. Pemasangan lapis pondasi dengan lebar sampai ke tepi luar lebar jalan merupakan salah satu cara untuk mereduksi perilaku tanah ekspansif. Tebal lapisan pondasi minimum 10 cm. Bila direncanakan perkerasan beton semen bersambung tanpa ruji, pondasi bawah harus menggunakan campuran beton kurus (CBK). Tebal lapis pondasi bawah minimum yang disarankan dapat dilihat pada Gambar 3.9 dan 3.10 dengan menarik grafik dari nilai CBR tanah dasar rencana dan tebal serta jenis lapis pondasi bawah.





**Gambar 3.9 Tebal Pondasi Bawah Minimum Untuk Perkerasan Beton Semen**

(Sumber: Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah, 2003)



**Gambar 3.10 CBR Tanah Dasar Efektif Dan Tebal Pondasi Bawah**

(Sumber: Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah, 2003)

#### 1. Pondasi Bawah dengan Material berbutir

Material berbutir tanpa bahan pengikat harus memenuhi persyaratan sesuai dengan SNI-03-6388-2000. Persyaratan dan gradasi pondasi bawah harus sesuai. Sebelum pekerjaan dimulai, bahan pondasi bawah harus diuji gradasinya dan harus memenuhi spesifikasi bahan untuk pondasi bawah, dengan penyimpangan

ijin 3%-5%. Ketebalan minimum untuk lapis pondasi bawah dengan CBR tanah dasar minimum 5% adalah 15 cm. Derajat kepadatan lapis pondasi bawah minimum 100% sesuai SNI-03-1743-1989.

## 2. Pondasi Bawah dengan Bahan Pengikat (*Bound Subbase*)

Pondasi bawah dengan bahan pengikat (BP) dapat digunakan salah satu dari:

- a. stabilisasi material berbutir dengan kadar bahan pengikat yang sesuai dengan hasil perencanaan, untuk menjamin kekuatan campuran dan ketahanan terhadap erosi. Jenis bahan pengikat dapat meliputi semen, kapur, serta abu terbang dan/atau slag yang dihaluskan,
- b. campuran beraspal bergradasi rapat (*dense-graded asphalt*), dan
- c. campuran beton kurus giling padat yang harus mempunyai kuat tekan karakteristik pada umur 28 hari minimum  $55 \text{ kg/cm}^2$ .

## 3. Pondasi Bawah dengan Campuran Beton Kurus (*Lean Mix Concrete*)

Campuran beton kurus (CBK) harus mempunyai kuat tekan beton karakteristik pada umur 28 hari minimum  $50 \text{ kg/cm}^2$  tanpa menggunakan abu terbang atau  $70 \text{ kg/cm}^2$  bila menggunakan abu terbang, dengan tebal minimum 10 cm.

### 3.3.3 Beton Semen

Pelat beton di dalam perkerasan beton semen merupakan lapisan permukaan dan termasuk bagian yang memegang peranan utama dalam struktur perkerasan. Di Indonesia jenis perkerasan beton semen yang dipakai umumnya *jointed unreinforced concrete pavement* yaitu perkerasan semen bersambung tanpa tulangan. Tulangan pada perkerasan beton semen tidak mempunyai fungsi struktural, tetapi sebagai pengontrol retak. Namun pemilihan jenis *jointed unreinforced concrete pavement*, bukan karena alasan diatas melainkan didasarkan pada:

1. jenis ini dianggap paling sederhana,
2. pelaksanaannya lebih mudah dengan peralatan sederhana, dan
3. sesuai untuk kondisi dimana pengalamannya masih terbatas dan relatif murah.

Kekuatan beton harus dinyatakan dalam nilai kuat tarik lentur (*flexural strength*) umur 28 hari, yang didapat dari hasil pengujian balok dengan pembebanan tiga titik yang besarnya secara tipikal sekitar 3-5 MPa (30-50 kg/cm<sup>2</sup>).

Kuat tarik lentur beton yang diperkuat dengan bahan serat penguat seperti serat baja, aramit atau serat karbon, harus mencapai kuat tarik lentur 5-5,5 MPa (50-55 kg/cm<sup>2</sup>). Kekuatan rencana harus dinyatakan dengan kuat tarik lentur karakteristik yang dibulatkan hingga 0,25 MPa (2,5 kg/cm<sup>2</sup>) terdekat. Hubungan antara kuat tekan karakteristik dengan kuat tarik-lentur beton dapat didekati dengan rumus berikut:

$$f_{cf} = K (f_c')^{0,50} \text{ dalam MPa atau } f_{cf} = 3,13 K (f_c')^{0,50} \text{ dalam kg/cm}^2 \quad (3.4)$$

dengan:

$f_c'$  : kuat tekan beton karakteristik 28 hari (kg/cm<sup>2</sup>),

$f_{cf}$  : kuat tarik lentur beton 28 hari (kg/cm<sup>2</sup>), dan

$K$  : konstanta 0,7 untuk agregat tidak dipecah dan 0,75 untuk agregat pecah.

Beton dapat diperkuat dengan serat baja (*steel-fibre*) untuk meningkatkan kuat tarik lenturnya dan mengendalikan retak pada pelat khususnya untuk bentuk tidak lazim. Serat baja dapat digunakan pada campuran beton, untuk jalan plaza tol, putaran dan perhentian bus. Panjang serat baja antara 15 mm dan 50 mm yang bagian ujungnya melebar sebagai angker dan/atau sekrup penguat untuk meningkatkan ikatan. Secara tipikal serat dengan panjang antara 15 dan 50 mm dapat ditambahkan ke dalam adukan beton, masing-masing sebanyak 75 dan 45 kg/m<sup>3</sup>. Semen yang akan digunakan untuk pekerjaan beton harus dipilih dan sesuai dengan lingkungan dimana perkerasan akan dilaksanakan.

### 3.3.4 Lalu Lintas

Penentuan beban lalu-lintas rencana untuk perkerasan beton semen, dinyatakan dalam jumlah sumbu kendaraan niaga (*commercial vehicle*), sesuai dengan konfigurasi sumbu pada lajur rencana selama umur rencana. Lalu-lintas harus dianalisis berdasarkan hasil perhitungan volume lalu-lintas dan konfigurasi sumbu, menggunakan data terakhir atau data 2 tahun terakhir. Kendaraan yang

ditinjau untuk perencanaan perkerasan beton semen adalah yang mempunyai berat total minimum 5 ton.

Konfigurasi sumbu untuk perencanaan terdiri atas 4 jenis kelompok sumbu, yaitu Sumbu tunggal roda tunggal (STRT), Sumbu tunggal roda ganda (STRG), Sumbu tandem roda ganda (STdRG), Sumbu tridem roda ganda (STrRG).

#### 1. Lajur Rencana dan Koefisien Distribusi

Lajur rencana merupakan salah satu lajur lalu lintas dari suatu ruas jalan raya yang menampung lalu lintas kendaraan niaga terbesar. Jika jalan tidak memiliki tanda batas lajur, maka jumlah lajur dan koefisien distribusi (C) kendaraan niaga dapat ditentukan dari lebar perkerasan sesuai Tabel 3.2 berikut ini.

**Tabel 3.2 Jumlah Lajur Berdasarkan Lebar Perkerasan Dan Koefisien Distribusi (C) Kendaraan Niaga Pada Lajur Rencana**

Lebar perkerasan ( $L_p$ )	Jumlah lajur (n)	Koefisien distribusi	
		1 Arah	2 Arah
$L_p < 5,50$ m	1 lajur	1	1
$5,50 \text{ m} \leq L_p < 8,25$ m	2 lajur	0,70	0,50
$8,25 \text{ m} \leq L_p < 11,25$ m	3 lajur	0,50	0,475
$11,23 \text{ m} \leq L_p < 15,00$ m	4 lajur	-	0,45
$15,00 \text{ m} \leq L_p < 18,75$ m	5 lajur	-	0,425
$18,75 \text{ m} \leq L_p < 22,00$ m	6 lajur	-	0,40

(Sumber: Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah, 2003)

#### 2. Umur Rencana

Umur rencana perkerasan jalan ditentukan atas pertimbangan klasifikasi fungsional jalan, pola lalu-lintas serta nilai ekonomi jalan yang bersangkutan. Umumnya perkerasan beton semen dapat direncanakan dengan umur rencana (UR) 20 tahun sampai 40 tahun.

#### 3. Pertumbuhan Lalu-lintas

Volume lalu lintas akan bertambah sesuai dengan umur rencana atau sampai tahap dimana kapasitas jalan dicapai dengan faktor pertumbuhan lalu-lintas yang dapat ditentukan berdasarkan rumus sebagai berikut:

$$R = \frac{(1+i)^{UR}-1}{i} \quad (3.5)$$

dengan:

R = Faktor pertumbuhan lalu lintas,

I = Laju pertumbuhan lalu lintas per tahun dalam %, dan

UR = Umur rencana (tahun).

Faktor pertumbuhan lalu-lintas (R) dapat juga ditentukan berdasarkan Tabel 3.3 berikut ini.

**Tabel 3.3 Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas**

Umur Rencana (Tahun)	Laju Pertumbuhan (i) per tahun (%)					
	0	2	4	6	8	10
5	5	5,2	5,4	5,6	5,9	6,1
10	10	10,9	12	13,2	14,5	15,9
15	15	17,3	20	23,3	27,2	31,8
20	20	24,3	29,8	36,8	45,8	57,3
25	25	32	41,6	54,9	73,1	98,3
30	30	40,6	56,1	79,1	113,3	164,5
35	35	50	73,7	111,4	172,3	271
40	40	60,4	95	154,8	259,1	442,6

(Sumber: Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah, 2003)

Apabila setelah waktu tertentu (UR<sub>m</sub> tahun) pertumbuhan lalu lintas tidak terjadi lagi, maka R dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$R = \frac{(1+i)^{UR}}{i} + (UR-UR_m) \{(1+i)^{UR_m}-1\} \quad (3.6)$$

dengan:

R : Faktor pertumbuhan lalu lintas,

i : Laju pertumbuhan lalu lintas per tahun dalam %, dan

UR<sub>m</sub> : Waktu tertentu dalam tahun, sebelum UR selesai.

#### 4. Lalu-lintas Rencana

Lalu-lintas rencana adalah jumlah kumulatif sumbu kendaraan niaga pada lajur rencana selama umur rencana, meliputi proporsi sumbu serta distribusi beban pada setiap jenis sumbu kendaraan.

Beban pada suatu jenis sumbu secara tipikal dikelompokkan dalam interval 10 Kn (1 ton) bila diambil dari survei beban. Jumlah sumbu kendaraan niaga selama umur rencana dihitung dengan rumus berikut:

$$JSKN = JSKNH \times 365 \times R \times C \quad (3.7)$$

dengan:

JSKN : Jumlah total sumbu kendaraan niaga selama umur rencana,

JSKNH : Jumlah total sumbu kendaraan niaga per hari pada saat jalan dibuka,

R : Faktor pertumbuhan lalu lintas kumulatif dari rumus atau Tabel 3.3 yang besarnya tergantung dari pertumbuhan lalu lintas tahunan dan umur rencana, dan

C : Koefisien distribusi kendaraan.

Setelah mendapatkan nilai JSKN, kemudian dihitung nilai repetisi sumbu kendaraan selama umur rencana dengan persamaan – persamaan berikut ini:

$$\text{Repetisi Sumbu} = JSKNH \times \text{proporsi sumbu} \times \text{proporsi beban} \quad (3.8)$$

$$\text{Proporsi beban} = \frac{\text{jumlah sumbu dalam satu kelompok beban}}{\text{jumlah total sumbu dalam satu tipe sumbu}} \quad (3.9)$$

$$\text{Proporsi sumbu} = \frac{\text{jumlah sumbu dalam satu tipe sumbu kendaraan}}{\text{jumlah total semua jenis sumbu kendaraan}} \quad (3.10)$$

#### 5. Faktor Keamanan Beban

Pada penentuan beban rencana, beban sumbu dikalikan dengan faktor keamanan beban ( $F_{KB}$ ). Faktor keamanan beban ini digunakan berkaitan adanya berbagai tingkat reabilitas perencanaan sesuai pada Tabel 3.4

**Tabel 3.4 Faktor Keamanan Beban (FKB)**

No.	Penggunaan	Nilai FKB
1	Jalan bebas hambatan utama ( <i>major freeway</i> ) dan jalan berlajur banyak, yang aliran lalu lintasnya tidak terhambat serta volume kendaraan niaga yang tinggi. Bila menggunakan data lalu-lintas dari hasil survei beban ( <i>weight-in-motion</i> ) dan adanya kemungkinan route alternatif, maka nilai faktor keamanan beban dapat dikurangi menjadi 1,15.	1,2
2	Jalan bebas hambatan ( <i>freeway</i> ) dan jalan arteri dengan volume kendaraan niaga menengah.	1,1
3	Jalan dengan volume kendaraan niaga rendah.	1,0

(Sumber: Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah, 2003)

### 3.3.5 Sambungan

Sambungan atau *joint* adalah alat yang digunakan pada perkerasan kaku untuk menghubungkan tiap segmen pada perkerasan kaku. Berfungsi untuk mendistribusikan atau menyalurkan beban yang diterima pelat atau segmen satu ke segmen lain sehingga tidak terjadi pergeseran pada segmen akibat beban dari kendaraan. Sambungan pada perkerasan jalan beton terdiri dari sambungan arah melintang dan sambungan arah memanjang.

#### 1. Sambungan Memanjang Dengan Batang Pengikat (*tie bars*)

Pemasangan sambungan memanjang ditujukan untuk mengendalikan terjadinya retak memanjang. Jarak antar sambungan memanjang sekitar 3-4 m. Sambungan memanjang harus dilengkapi dengan batang ulir dengan mutu minimum BJTU-24 dan berdiameter 16 mm.

Ukuran batang pengikat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$A_t = 204 \times b \times h \quad (3.11)$$

$$I = (38,3 \times \emptyset) + 75 \quad (3.12)$$

dengan:

$A_t$  = Luas penampang tulangan per meter panjang sambungan ( $\text{mm}^2$ ),

- b = Jarak terkecil antar sambungan atau jarak sambungan dengan tepi perkerasan (m),  
 h = Tebal pelat (m),  
 I = Panjang batang pengikat (mm), dan  
 Ø = Diameter batang pengikat yang dipilih (mm).

## 2. Sambungan Susut Melintang Dengan Ruji (*Dowel*)

Sambungan susut melintang dengan ruji (*dowel*) kedalaman sambungan kurang lebih mencapai seperempat dari tebal pelat untuk perkerasan dengan lapis pondasi berbutir atau sepertiga dari tebal pelat untuk lapis pondasi stabilisasi semen.

Jarak sambungan susut melintang untuk perkerasan beton bersambung tanpa tulangan sekitar 4 - 5 m, sedangkan untuk perkerasan beton bersambung dengan tulangan 8 – 15 m dan untuk sambungan perkerasan beton menerus dengan tulangan sesuai dengan kemampuan pelaksanaan. Sambungan ini harus dilengkapi dengan ruji polos panjang 45 cm, jarak antara ruji 30 cm, lurus dan bebas dari tonjolan tajam yang akan mempengaruhi gerakan bebas pada saat pelat beton menyusut. Setengah panjang ruji polos harus dicat atau dilumuri dengan bahan anti lengket untuk menjamin tidak ada ikatan dengan beton.

Diameter ruji tergantung pada tebal pelat beton sebagaimana terlihat pada Tabel 3.5 berikut ini.

**Tabel 3.5 Diameter Ruji (*Dowel*)**

No	Tebal Pelat Beton, h (mm)	Diameter Ruji (mm)
1	$125 < h \leq 140$	20
2	$140 < h \leq 160$	24
3	$160 < h \leq 190$	28
4	$190 < h \leq 220$	33
5	$220 < h \leq 250$	36

(Sumber: Departemen Permukiman dan Perencanaan Wilayah, 2003)



### 3.3.6 Perencanaan Tebal Pelat Beton

Prosedur perencanaan perkerasan beton semen didasarkan pada dua model kerusakan, yaitu retak fatik (lelah) tarik lentur pada pelat dan erosi pada pondasi bawah atau tanah dasar yang diakibatkan oleh lendutan berulang pada sambungan dan tempat retak yang direncanakan. Tebal pelat taksiran dipilih dan total fatik serta kerusakan erosi dihitung berdasarkan komposisi lalu-lintas selama umur rencana. Jika kerusakan fatik atau erosi lebih dari 100%, tebal taksiran dinaikan dan proses perencanaan diulangi. Tebal rencana adalah tebal taksiran yang paling kecil yang mempunyai total fatik dan atau total kerusakan erosi lebih kecil atau sama dengan 100%. Hal yang harus dihitung dalam analisis rusak fatik dan erosi terlebih dahulu menghitung beban rencana per roda kendaraan menggunakan persamaan 3.13 berikut ini.

$$\text{Beban rencana per roda} = \frac{\text{Beban satu sumbu} \times \text{FKB}}{\text{jumlah roda dalam satu sumbu}} \quad (3.13)$$

dengan:

Beban rencana per roda = Jumlah beban tiap satu roda kendaraan (KN),

Beban satu sumbu = Jumlah beban pada satu roda kendaraan (KN), dan

$F_{KB}$  = Faktor keamanan beban (didapat dari Tabel 3.4).

#### 1. Retak Fatik (lelah)

Nilai kerusakan fatik didapatkan dari hasil perbandingan nilai repetisi beban yang terjadi selama umur rencana dengan nilai repetisi ijin pelat beton. Untuk mencari nilai repetisi ijin pelat beton harus mencari faktor rasio tegangan terlebih dahulu menggunakan persamaan 3.14 berikut ini.

$$F_{RT} = \frac{TE}{F_{cf}} \quad (3.14)$$

dengan:

$F_{RT}$  = Faktor rasio tegangan,

$TE$  = Tegangan ekivalen pelat beton (Mpa) (lihat lampiran 2), dan

$F_{CF}$  = Kuat lentur momen umur 28 hari (Mpa).

Dari nilai  $F_{RT}$ , digunakan untuk mencari nilai refetisi ijin tiap roda menggunakan nomogram (Lampiran 2). Adapun nilai persen (%) rusak fatik dihitung menggunakan Persamaan 3.15 berikut ini.

$$\% \text{ rusak fatik} = \frac{\text{repetisi sumbu beban}}{\text{repetisi ijin fatik}} \times 100\% \quad (3.15)$$

## 2. Rusak akibat erosi

Nilai kerusakan akibat erosi didapatkan dari hasil perbandingan nilai repetisi beban yang terjadi selama umur rencana dengan nilai repetisi ijin rusak erosi pelat beton. Untuk mencari nilai repetisi ijin rusak erosi pelat beton harus mencari faktor erosi terlebih dahulu. Faktor erosi dapat dicari menggunakan Lampiran 2. Setelah didapatkan nilai faktor erosi, dilanjutkan mencari repetisi ijin untuk rusak akibat erosi menggunakan nomogram pada Lampiran 2. Kemudian nilai persen (%) rusak akibat erosi dihitung menggunakan Persamaan 3.16 berikut ini.

$$\% \text{ rusak erosi} = \frac{\text{repetisi sumbu beban}}{\text{repetisi ijin erosi}} \times 100\% \quad (3.16)$$

## 3.4 Pemodelan Elemen Hingga

Sistem yang rumit model elemen hingga ini mampu secara akurat memprediksi respon perkerasan: tekanan, tegangan dan lendutan. Dengan *KENSLAB* dapat mewakili geometri perkerasan, kondisi batas, karakteristik bahan dan kondisi pembebanan yang serealistis mungkin. *KENSLAB* menggunakan elemen pelat tipis dalam kondisi model slab, sejak Huang (2004) menganggap bahwa perkerasan beton harus dianalisis dengan teori plat, dari pada teori lapisan. Elemen dua dimensi pelat untuk model perilaku dari slab beton dianggap bahwa sebuah pelat dengan ketebalan yang cukup tebal mampu menahan beban sebelum menekuk.

Dengan *KENSLAB*, slab dalam model ini diperlakukan dengan disusun atas dua lapisan terikat atau lapisan tidak terikat dengan ketebalan seragam. Elemen

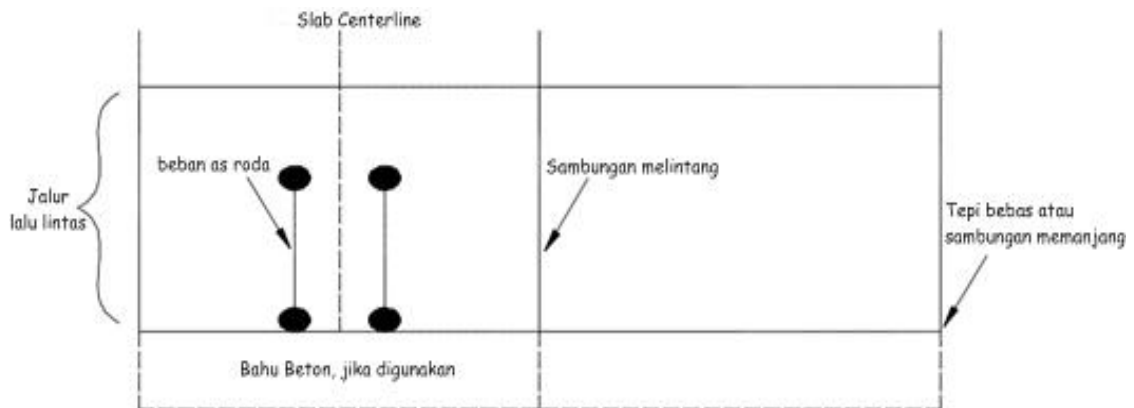
pelat tipis persegi panjang dengan tiga tingkat dari kebebasan setiap simpul (lendutan vertikal dan dua rotasi) yang digunakan untuk menggambarkan slab. Transfer pembebanan dapat dimodelkan menggunakan sistem *dowel*. Jenis *foundation* dapat dimodelkan menggunakan beberapa jenis *foundation*, salah satu yang paling banyak dipakai *Winkler Foundation* yang juga tersedia dalam analisis *KENSLAB*.

### 3.4.1 Kelelahan Rusaknya Slab Beton

Sebagai alasan utama selain proses kemerosotan, retak dapat dianggap sebuah kegagalan tarik dalam perkerasan beton. Retak dapat terjadi di mana saja dalam perkerasan dimana tekanan tarik melebihi kekuatan lentur beton. Gerakan membengkok dari slab beton di bawah lalu lintas kendaraan dan juga iklim gaya biasanya menyebabkan tekanan tarik dalam sebuah perkerasan beton (Darestani, 2007).

Sejak diterapkan pembebanan yang berulang di lapangan, perkerasan beton lebih banyak gagal dalam fenomena kelelahan dari pada kegagalan langsung yang disebabkan tekanan tarik maksimum. Kelelahan pada beton dapat menyebabkan beberapa retak melintang, yang mana akan terjadi pada tepi pertengahan perkerasan antara sambungan melintang, dan retak longitudinal, yang mana akan terjadi di jalur roda terdekat dengan *centerline* slab (Huang, 2004). Gambar 3.11 menunjukkan lokasi pembebanan paling kritis untuk dipertimbangkan dalam analisis kelelahan.

Karena pembebanan ditempatkan jauh dari sambungan, kehadiran batang *dowel* di dalam sambungan melintang hampir tidak ada pengaruh yang besar terhadap respon perkerasan. Akibatnya, permodelan dan analisis pada perkerasan dilakukan khusus untuk kasus ini, kehadiran sambungan melintang di JPCP akan diabaikan.



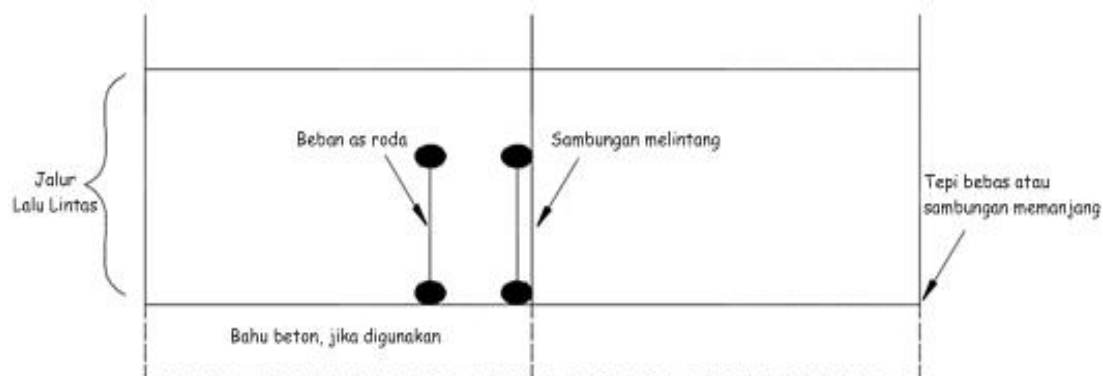
**Gambar 3.11 Posisi Pembebanan yang Paling Kritis untuk Kegagalan Kelelahan**

(Sumber: Huang, 2004)

### 3.4.2 Erosi dari *Subbase* dan Bahan *Subgrade*

Pumping dan erosi bahan di bawah dan di samping slab adalah kerusakan utama lainnya yang terjadi pada perkerasan beton yang perlu ditambah dalam perhitungan retak kelelahan. Keberadaan air, tingkat dimana air itu keluar dari bawah slab, erodibilitas dari bahan *subbase*, seberapa besar dan jumlah beban pengulangan, dan jumlah lendutan merupakan faktor utama yang memberikan kontribusi dalam terjadinya pumping dan fenomena erosi (Huang, 2004). Erosi kegagalan pada perkerasan beton mengakibatkan hilangnya dukungan karena kekosongan distribusi di bawah slab yang tidak sepatasnya terjadi.

Demikian kerusakan lebih terkait dengan lendutan perkerasan daripada tekanan lentur, yang menjadi hal utama berkontribusi dalam kerusakan kelelahan. Huang (2004) menyimpulkan bahwa lendutan perkerasan yang paling kritis terjadi pada sudut slab ketika beban sumbu ditempatkan pada sambungan dekat sudut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12 Posisi Pembebanan yang Paling Kritis untuk Erosi Kegagalan**  
(Sumber: Huang, 2004)

### 3.4.3 Beban Pengulangan yang Diperbolehkan

Model struktur untuk perkerasan beton lebih maju dari model kerusakan. Analisis mekanistik seperti metode elemen hingga dapat digunakan untuk membangun model struktur yang pantas, tetapi kebanyakan permodelan adalah persamaan regresi jadian dengan data penyebaran yang besar (Huang, 2004).

Metode mekanistik-empiris secara luas digunakan dalam desain dan evaluasi perkerasan. Kegagalan ini biasanya memperkirakan menggunakan model akumulasi kerusakan linier yang disebut sebagai Hipotesis Penambang (Darenberg, 2005), yang mengasumsikan bahwa kerusakan terakumulasi linier didasarkan secara empiris dan diberikan sebagai berikut:

$$\text{Rasio Kerusakan} = \sum_{i=1}^i \frac{n_i}{N_i} \quad (3.17)$$

dengan:

$n_i$  = jumlah beban sebenarnya aplikasi di bawah kondisi yang diwakili  $i$ , dan

$N_i$  = jumlah aplikasi beban yang diijinkan atau pengulangan sampai kegagalan di bawah kondisi yang diwakili oleh  $i$ .

Perkerasan dianggap gagal ketika Rasio Kerusakan sudah lebih dari satu.

Salah satu model kerusakan yang ada disajikan oleh *Portland Cement Association* (PCA). Model PCA terutama didasarkan pada percobaan yang dilakukan oleh *AASHTO Road Test*. Salah satu keuntungan menggunakan

persamaan PCA adalah bahwa persamaan ini menyediakan model untuk erosi dan kegagalan kelelahan.

### 1. Beban Pengulangan untuk Kegagalan Kelelahan

Menurut Barenberg (2005), kegagalan kelelahan dari perkerasan beton terkait dengan rasio dari tegangan yang diterapkan pada kekuatan beton. Banyak model kerusakan mengambil rasio tegangan-kekuatan ke dalam pertimbangan. PCA merekomendasikan dalam estimasi persamaan untuk perkiraan jumlah beban pengulangan yang diijinkan untuk kegagalan kelelahan pada perkerasan beton:

$$\text{Untuk } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0,55: \log N_f = 11,737 - 12,707 \left( \frac{\sigma}{S_c} \right) \quad (3.18a)$$

$$\text{Untuk } 0,45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0,55: N_f = \left( \frac{4,2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0,4325} \right) \quad (3.18b)$$

$$\text{Untuk } \frac{\sigma}{S_c} \leq 0,45: N_f = \text{tak terbatas} \quad (3.18c)$$

dengan:

$N_f$  = jumlah beban pengulangan yang diijinkan untuk kegagalan kelelahan,

$\sigma$  = tegangan lentur dalam slab beton, dan

$S_c$  = modulus keruntuhan beton.

### 2. Beban Pengulangan untuk Kegagalan Erosi

PCA merekomendasikan persamaan di bawah ini untuk menentukan beban pengulangan yang diijinkan untuk analisis erosi:

$$\log N_e = 14,524 - 6,777 (C_1 P - 9,0)^{0,103} \quad (3.19a)$$

dengan:

$N_e$  = beban pengulangan yang diijinkan untuk kegagalan erosi,

$C_1$  = faktor penyesuaian ( 1 untuk *subbase* yang tidak diperlakukan khusus dan 0,9 untuk *subbase* yang distabilisasi), dan

$P$  = tingkat kekuatan, didefinisikan sebagai:

$$P = 268,7 \frac{p^2}{hk^{0,73}} \quad (3.19b)$$

dengan:

$p$  = tekanan pada dasar di bawah sudut slab dalam psi ( yang sama dengan  $kw$  untuk *liquid foundation*, dimana  $w$  adalah lendutan maksimal),

$h$  = ketebalan slab dalam inci, dan

$k$  = modulus reaksi *subgrade* dalam pci.

#### 3.4.4 Analisis Sensitivitas *KENSLABS*

Program komputer *KENSLABS* (Huang, 1985) merupakan bagian dari piranti lunak *KENPAVE* yang berbasis pada metode elemen hingga, yang mana pelat/slab beton dibagi menjadi beberapa elemen segi empat dengan banyak titik node. Beban dan reaksi tanah dasar diaplikasikan sebagai beban vertikal yang bekerja pada titik node. *KENSLABS* dapat digunakan untuk menghitung maksimal 6 slab beton, 7 sambungan (*joint*) dan 420 titik node. Setiap slab beton dapat mempunyai maksimum 15 titik node pada sumbu  $x$  dan 15 titik pada sumbu  $y$ . Analisis kerusakan dapat dibuat pada tiap tahunnya dengan membagi menjadi maksimum 12 periode dan 12 kelompok beban. Kapabilitas dari *KENSLABS* antara lain:

1. Dapat menganalisis maksimum 6 (enam) buah slab beton,
2. Tiap slab dapat mempunyai ketebalan yang beragam,
3. Satu slab beton dapat terdiri dari 2 lapis beton, dengan ikatan antar lapis secara terikat (*bounded*) atau tidak terikat (*unbounded*),
4. Beban dapat tersebar merata pada luasan segi empat atau terpusat pada titik node. Tiap beban dapat mempunyai tekanan yang berbeda,
5. Efek dari *curling* akibat suhu dan jarak/gap antara slab beton dan lapis pondasi dapat dianalisis,
6. Hubungan antara slab dan pondasi dapat diasumsikan secara kontak penuh (*full*

*contact*) maupun tidak ada kontak pada beberapa titik node (*partial contact*), dan

7. Program dapat menganalisa slab beton pada tipe pondasi elastis, *solid* maupun berlapis (*layered*).

Batasan dalam program *KENSLABS* antara lain:

1. Analisis curling akibat suhu berdasarkan asumsi bahwa hanya terdapat satu lapisan slab dan tiap slab mempunyai ketebalan yang sama. Untuk slab dengan ketebalan beragam harus diasumsikan rata-ratanya,
2. Program tidak memperbolehkan penggunaan sambungan yang kaku dimana lendutan atau rotasi pada dua sisi sambungan besarnya sama, dan
3. Program hanya dapat menghitung tegangan pada slab beton dan lendutan pada slab dan lapis pondasi. Tegangan pada lapis pondasi tidak dapat diketahui.