



KAJIAN SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU

Hubungan antara spesifikasi perkerasan kaku dengan spesifikasi perkerasan lunak pada umumnya dapat dilihat dari spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak.

Spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak pada umumnya dapat dilihat dari spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak. Spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak pada umumnya dapat dilihat dari spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak. Spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak pada umumnya dapat dilihat dari spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak.

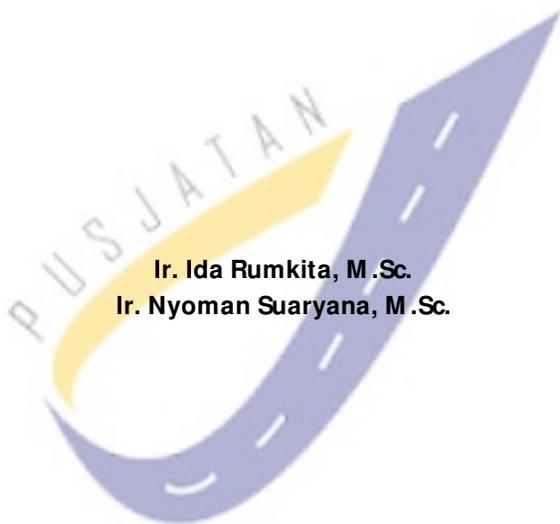
Spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak pada umumnya dapat dilihat dari spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak. Spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak pada umumnya dapat dilihat dari spesifikasi perkerasan kaku dan perkerasan lunak.

KAJIAN SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU





**TEKNOLOGI PERKERASAN KAKU
(KAJI AN SPESI FI KASI PERKERASAN KAKU)**



**Ir. Ida Rumkita, M.Sc.
Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc.**



**INFORMATIKA
Bandung**

TEKNOLOGI PERKERASAN KAKU (KAJIAN SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU)

Desember 2012

Cetakan Ke-1, tahun 2012, (x + 62 Halaman)

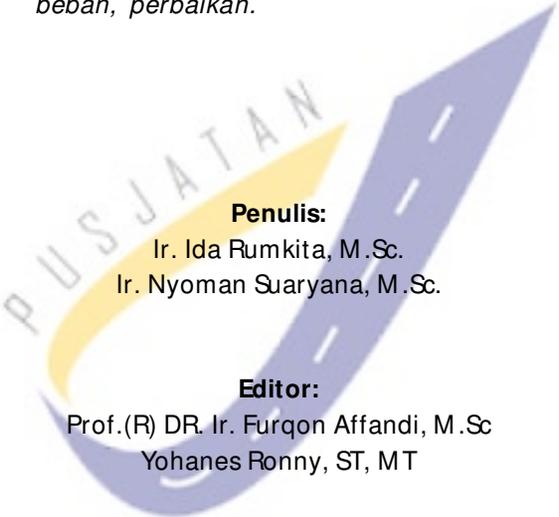
© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

No. ISBN : 978-602-1514-23-8

Kode Kegiatan : 04-PPK3-001107-P12

Kode Publikasi : IRE-TR-88/2012

Kata Kunci : *Sambungan, pracetak. pracetak-prategang, alat transfer beban, perbaikan.*



Penulis:

Ir. Ida Rumkita, M.Sc.

Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc.

Editor:

Prof.(R) DR. Ir. Furqon Affandi, M.Sc

Yohanes Ronny, ST, MT

Diterbitkan oleh:

Penerbit Informatika - Bandung

Anggota IKAPI Jabar Nomor : 033/JBA/99

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

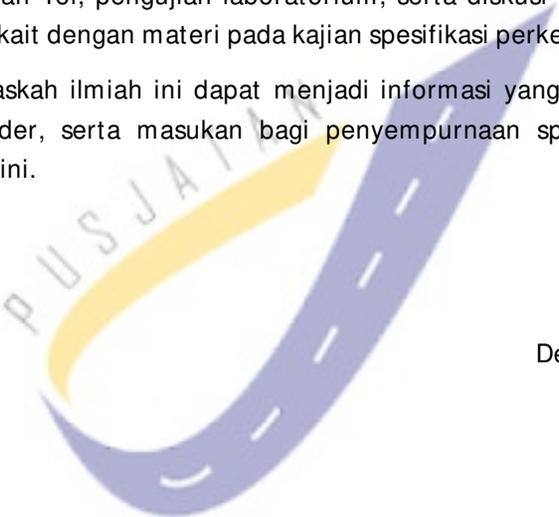
info@pusjatan.pu.go.id

Kata Pengantar

Naskah ilmiah Kajian Spesifikasi Perkerasan Kaku ini merupakan output dari kegiatan penelitian Tahun anggaran 2012 dengan judul paket kerja Kajian Spesifikasi Perkerasan Kaku.

Naskah ini disusun berdasarkan kajian terhadap spesifikasi perkerasan kaku yang terdapat di Indonesia serta beberapa spesifikasi dari luar negeri. Untuk melengkapi kajian dilakukan juga pengamatan pada pelaksanaan pekerjaan perkerasan kaku di beberapa kegiatan pekerjaan Ditjen Bina Marga dan Jalan Tol, pengujian laboratorium, serta diskusi dengan pihak-pihak yang terkait dengan materi pada kajian spesifikasi perkerasan kaku.

Diharapkan naskah ilmiah ini dapat menjadi informasi yang berguna bagi para stakeholder, serta masukan bagi penyempurnaan spesifikasi yang telah ada saat ini.



Bandung,
Desember 2012



Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vii
Daftar Gambar	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	3
2.1 Umum.....	3
2.2 Sambungan.....	4
2.2.1 Sambungan Susut melintang.....	4
2.2.2 Sambungan Susut memanjang.....	7
2.2.3 Sambungan Konstruksi arah melintang.....	9
2.2.4 Sambungan Isolasi.....	9
2.2.5 Sambungan Ekspansi.....	10
2.3 Alat Transfer Beban.....	11
2.3.1 Agregat Interlock.....	11
2.3.2 Dowel.....	11
2.4 Pembukaan Terhadap Lalu Lintas.....	17
2.5 Toleransi Ketebalan Perkerasan.....	17
2.5.1 Pengaruh Penyimpangan Ketebalan.....	17
2.5.2 Pengaruh Penyimpangan Kekuatan.....	20
BAB III SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU DI INDONESIA.....	21
3.1 Sambungan.....	21
3.1.1 Sambungan Melintang.....	21
3.1.1.1 Jarak sambungan.....	21
3.1.1.2 Alat Transfer Beban Dowel.....	29

3.1.2 Sambungan Memanjang.....	43
3.2 Pembukaan Perkerasan untuk lalu lintas.....	49
3.2.1 Kriteria pembukaan perkerasan.....	49
DAFTAR PUSTAKA	62



DAFTAR TABEL

		Hal
Tabel 1.	Jenis-jenis bahan penutup sambungan pada perkerasan beton	6
Tabel 2.	Rekomendasi dimensi dowel untuk JRCP (ACPA)	15
Tabel 3.	Penyesuaian harga kontrak berkaitan kekurangan tebal	19
Tabel 4.	Jarak sambungan melintang untuk beton tanpa tulangan	27
Tabel 5.	Rekomendasi jarak sambungan untuk beton bertulang	28
Tabel 6.	Perbandingan ukuran diameter dowel hasil perhitungan dengan analisa Friberg dan AASHTO	32
Tabel 7.	Spesifikasi ketentuan toleransi penyimpangan dowel	38
Tabel 8.	Pengaruh penyimpangan letak dan posisi dowel, Tayabji (1986)	40
Tabel 9.	Contoh maturity, kuat tekan, kuat lentur beton pada umur 3,5 dan 7 hari	56
Tabel 10.	Contoh hasil perhitungan kekuatan perkerasan minimum untuk pembukaan lalu lintas dengan menggunakan analisa Friberg	61

DAFTAR GAMBAR

		Hal
Gambar 1	Tipikal sambungan memanjang dengan <i>keyway</i>	8
Gambar 2	Pelat beton telah turun sebelum <i>keyway</i>	8
Gambar 3	Tipikal sambungan isolasi	9
Gambar 4	Tipikal sambungan ekspansi	10
Gambar 5	Mekanisme Tranfer beban antar partikel agregat	11
Gambar 6a	Sabungan dengan dowel	12
Gambar 6b	Sambungan tanpa dowel	12
Gambar 7	Beberapa tipikal dowel berbentuk pelat	14
Gambar 8	iTipe-tipe penyimpangan dowel (Tayabji, 1986	15
Gambar 9	Hubungan tebal perkerasan dengan umur perkerasan (beban lalulintas) (AASHTO	18
Gambar 10	Hubungan tegangan yang terjadi pada perkerasan dengan pengurangan tebal perkerasan	18
Gambar 11	Curling dan warping pada perkerasan kaku	22
Gambar 12	Faktor koreksi tegangan curling pada pelat beton (Bradbury 1938)	23
Gambar 13a	Hubungan tebal perkerasan dengan panjang perkerasan dengan berbagai nilai k	24
Gambar 13b	Hubungan tebal perkerasan dengan panjang perkerasan dengan berbagai nilai k	24
Gambar 13c	Hubungan tebal perkerasan dengan panjang perkerasan dengan berbagai nilai k	25
Gambar 14	Hubungan Jarak maksimum sambungan dengan tebal perkerasan	26
Gambar 15	Jarak maksimum sambungan dengan tebal perkerasan untuk lapis pondasi yang distabilisasi	27
Gambar 16	Variasi jarak antar dowel	34
Gambar 17	Jarak dowel pertama terhadap tepi perkerasan	35
Gambar 18	Pendeteksian dengan GPR	37
Gambar 19	Tipikal pendeteksian MIT Scan-2 di lapangan	37

Gambar 20	Hubungan bukaan sambungan dengan usaha yang diperlukan untuk menariknya	41
Gambar 21	Tipikal kawat pengikat pada rakitan dowel	42
Gambar 22	Bukaan sambungan yang berlebihan	44
Gambar 23	<i>Faulting</i> pada sambungan memanjang	44
Gambar 24	Penyimpangan alinyemen pada sambungan memanjang	44
Gambar 25	Pengaruh tebal perkerasan terhadap tegangan pada ruji	47
Gambar 26	Pengaruh tebal perkerasan terhadap lebar bukaan sambungan	47
Gambar 27a	Hubungan <i>bearing stress</i> beton dengan jarak antar ruji	48
Gambar 27b	Hubungan <i>bearing stress</i> beton dengan jarak antar ruji	48
Gambar 27c	Hubungan <i>bearing stress</i> beton dengan jarak antar ruji	49
Gambar 28	Konsep Maturity	52
Gambar 29	Grafik Maturity atau faktor temperatur – waktu beton	54
Gambar 30	Tipikal hubungan waktu - temperatur beton dari benda uji	56
Gambar 31	Grafik Hubungan maturity – kuat tarik lentur (laboratorium)	57
Gambar 32	Grafik hubungan maturity – kuat tekan (laboratorium)	57
Gambar 33	Benda uji silinder yang telah di beri sensor di dalamnya	57
Gambar 34	Pemantauan maturity perkerasan beton di lapangan	58
Gambar 35	Alat maturity meter yang berukuran kecil	59



Bab- 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejak tahun 1985, perkerasan jalan beton mulai diaplikasikan di Indonesia, dengan membangun jalan - jalan beton di beberapa kota di Indonesia. Akan tetapi setelah itu perkembangan penggunaan jalan beton di Indonesia berjalan lambat, namun dalam beberapa tahun terakhir ini perkembangannya menunjukkan percepatan yang sangat tinggi.

Pembangunan jalan beton di Indonesia terus bertambah dengan cepat, baik untuk jalan tol, jalan nasional, jalan propinsi, jalan kota bahkan sampai ke jalan-jalan perumahan. Dari hasil pengamatan di lapangan jelas terlihat bahwa sebagian besar pelaksanaan masih belum mengikuti ketentuan-ketentuan pada spesifikasi, seperti cara pemasangan *dowel* yang benar, pelaksanaan perawatan (*curing*) yang benar, kapan waktu yang tepat untuk dilakukan penggantian sambungan, pembukaan perkerasan untuk dilalui lalu lintas, dll.

Untuk menunjang perkembangan jalan beton ini perlu diperlengkapi dengan spesifikasi yang tepat, pedoman perencanaan, pedoman pelaksanaan, serta pedoman pemeliharaan untuk perkerasan kaku.

Spesifikasi perkerasan kaku yang ada saat ini di Indonesia edisi terakhir disusun pada tahun 2010. Meskipun spesifikasi tersebut masih relatif baru, ternyata di beberapa bagian isinya masih terdapat ketentuan-ketentuan yang belum tepat. Demikian pula dengan perkembangan kebutuhan yang terjadi di lapangan masih belum terakomodir oleh spesifikasi yang ada.

Pada tahun 2011 telah dilakukan kajian pada beberapa bagian dari spesifikasi, seperti ketentuan bahan dan beberapa ketentuan mengenai pelaksanaan. Sedangkan pada tahun 2012 kajian dilakukan terhadap ketentuan mengenai

sambungan, ketentuan dowel sebagai alat transfer beban dan ketentuan mengenai kriteria pembukaan perkerasan untuk lalu lintas.



Bab-2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Umum

Spesifikasi jalan merupakan rambu - rambu yang harus diikuti dalam suatu tahap pembangunan jalan. Pada Spesifikasi umum bidang jalan dan jembatan divisi 5, khususnya seksi 5.5 perkerasan beton semen mencakup persyaratan, pelaksanaan, pengendalian mutu, pengukuran dan pembayaran.

Di Indonesia terdapat beberapa spesifikasi yang latar belakang penyusunan dan penggunaannya cukup berbeda, akan tetapi secara umum isinya hampir sama. Spesifikasi - spesifikasi tersebut adalah ;

- Spesifikasi Binamarga
- Spesifikasi Jasamarga
- Spesifikasi Balitbang
- Spesifikasi Enrip
- Spesifikasi SRIP

Ketentuan-ketentuan yang menjadi bahan kajian adalah ;

Sambungan (Joints):

- Ketentuan jarak sambungan pada beton bersambung dengan tulangan
- Ketentuan jarak sambungan pada beton bertulang

Alat transfer beban Dowel :

- Dimensi dowel ; diameter, panjang
- Bahan dan bentuk dowel
- Toleransi penyimpangan

Kriteria pembukaan perkerasan terhadap lalulintas

2.2 Sambungan

Sambungan adalah tempat dimana terputusnya kesinambungan dari pelat perkerasan kaku.

Perkerasan kaku tanpa tulangan dengan sambungan sering mengalami retak pada jarak 4 -8 m, yang dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain:

- Penyusutan awal setelah pengecoran lapisan beton, dimana air permukaan mengalami penguapan.
- Pengaruh temperatur yang menyebabkan terjadinya kontraksi, yang menimbulkan gesekan antara perkerasan dengan lapisan dibawahnya.
- *Curling* dan *warping* yang terjadi karena perbedaan temperatur dan kelembaban antara bagian atas dan bawah pelat.
- Tegangan yang terjadi akibat beban lalu lintas.

Oleh karena itu untuk mengendalikan terjadinya retak, maka pada perkerasan beton dibuat sambungan dengan jarak tertentu.

Sambungan pada perkerasan beton dapat dikategorikan pada 4 jenis dengan fungsinya masing-masing, sebagai berikut :

1. Sambungan susut melintang (*transverse contraction joints*): dan sambungan susut memanjang (*longitudinal contraction joints*);
2. Sambungan konstruksi arah melintang (*transverse construction joints*)
3. Sambungan isolasi
4. Sambungan ekspansi

2.2.1 Sambungan susut melintang

Sambungan kontraksi diperlukan untuk mengendalikan retak karena tegangan yang disebabkan oleh penyusutan beton akibat proses hidrasi, beban lalu lintas, perubahan temperatur serta berkurangnya kelembaban beton.

Kerusakan yang terjadi pada sambungan melintang pada umumnya berupa *faulting* dan *spalling*, dan pada tahapan yang lebih buruk menyebabkan kerusakan lanjutan berupa *corner breaks*, *blow-up* dan retak di tengah panel. *Smith* dkk (1990) melaporkan bahwa *faulting* pada sambungan serta retak melintang semakin meningkat dengan peningkatan jarak sambungan melintang.

Kinerja sambungan melintang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

- Jarak sambungan

- Alat transfer beban
- Bentuk / dimensi sambungan serta bahan penutup sambungan

a. Jarak Sambungan

Ketentuan mengenai jarak sambungan bervariasi di berbagai Negara. Variasi jarak sambungan ini disebabkan pertimbangan beberapa faktor antara lain :

- biaya awal pekerjaan,
- jenis perkerasan beton (dengan atau tanpa tulangan)
- jenis alat transfer beban
- kondisi lokal setempat

Perkerasan beton mengalami kontraksi terutama diakibatkan oleh perubahan temperatur dan reaksi kimia yang terjadi dalam beton, terutama pada awal proses hidrasi. Dimana semakin panjang panel pelat beton, maka semakin besar tegangan yang terjadi serta semakin besar juga pergerakan dari panel beton, ACI (2002), FHWA (2007) dan US Airfield mengemukakan bahwa jarak retak pada umumnya terjadi pada interval 4 – 8 m, dan jarak ini berkaitan dengan karakteristik beton yaitu *radius of relative stiffness*. Interval dari jarak retak yang terjadi pada masa - masa awal umur beton merupakan faktor yang penting dalam menetapkan letak sambungan sebagai pengendali retak.

$$l = \left(\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right)^{0,25}$$

dimana ;

l = *radius of relative stiffness* (m)

k = *modulus of subgrade reaction* (MPa/m)

E = Modulus elastisitas beton

h = tebal perkerasan (m)

ν = *Poisson ratio* beton

Pada umumnya panduan praktis untuk jarak sambungan melintang beton yang digunakan adalah 4,6 m untuk perkerasan beton tanpa tulangan, serta 9 m untuk perkerasan beton dengan tulangan.

Sambungan kontraksi melintang pada umumnya dipotong tegak lurus perkerasan arah lalu lintas. Meskipun demikian beberapa institusi jalan menyarankan penggunaan sambungan miring dengan tujuan untuk mengurangi beban dinamis yang melintasi sambungan, dimana hanya satu

roda kendaraan yang menginjak sambungan pada waktu tertentu. Sehingga tegangan yang terjadi pada beton berkurang dan berkendara lebih nyaman.

b. Alat transfer beban

Beban lalu lintas yang diterima oleh perkerasan beton harus disalurkan secara efektif antar pelat beton, untuk meminimalisir terjadinya lendutan pada sambungan dan mengurangi potensi pumping.

Ada 2 metode yang digunakan untuk melakukan transfer beban, yaitu :

- Melalui saling mengunci antar agregat (*aggregate interlock*)
- Melalui alat transfer beban seperti dowel.

c. Bentuk dan karekteristik bahan penutup sambungan

Penutup sambungan diperlukan untuk mencegah masuknya air dan material yang keras dan tidak termampatkan ke dalam sambungan dan struktur perkerasan beton. Pencegahan ini dilakukan agar tidak terjadi kerusakan-kerusakan seperti *spalling* dan *pumping*, yang dapat mengganggu kinerja perkerasan beton.

Bahan-bahan yang digunakan sebagai penutup sambungan dapat berupa cairan yang dituang panas atau dingin, dan dapat pula berupa bahan telah dibentuk (*preformed*) dan diselipkan kedalam sambungan. Pemilihan material bahan penutup didasarkan pada :

- Lingkungan
- Kinerja
- Jenis dan celah sambungan

Tabel 1 di bawah menunjukkan jenis bahan penutup yang dapat digunakan serta deskripsi singkat dari bahan tersebut.

Tabel 1. Jenis-jenis bahan penutup sambungan pada perkerasan beton

Jenis bahan penutup	Deskripsi	Spesifikasi
<i>Cair, diterapkan panas</i> Aspal karet Terbuat dari <i>polimer elastomer</i>	Termoplastis <ul style="list-style-type: none"> ▪ Meratakan sendiri ▪ Meratakan sendiri 	ASTM D 6690 ASTM D 3406

Jenis bahan penutup	Deskripsi	Spesifikasi
<i>Cair, diterapkan dingin</i> Silicon 1 Silicon 2 Silicon 3 Polisufida Poliuretan	Modulus rendah <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tidak melendut ▪ Meratakan sendiri ▪ Meratakan sendiri ▪ Meratakan sendiri ▪ Meratakan sendiri 	ASTM D 5893 ASTM D 5893 ASTM D 5893 Fed Spec SS-s-200E Fed Spec SS-s-200E
Bahan pengisi yang dibentuk sebelumnya (<i>preformed sealent</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beraspal tidak menekan dan elastis. ▪ Busa karet, bersifat menyumbat dan PVC daur ulang ▪ Beraspal 	ASTM D 1751 / AASHTO M 213 ASTM D 1752 / AASHTO M 213 ASTM D 994 / AASHTO M 33

2.2.2 Sambungan susut memanjang

Sambungan susut memanjang diperlukan untuk semua jenis perkerasan kaku yang mempunyai lebar perkerasan lebih dari 4,5 m. Sambungan berfungsi untuk mengendalikan retak pada arah memanjang dan untuk mengakomodir pelaksanaan pembangunan jalan dengan banyak lajur (Mallela et al, 2009).

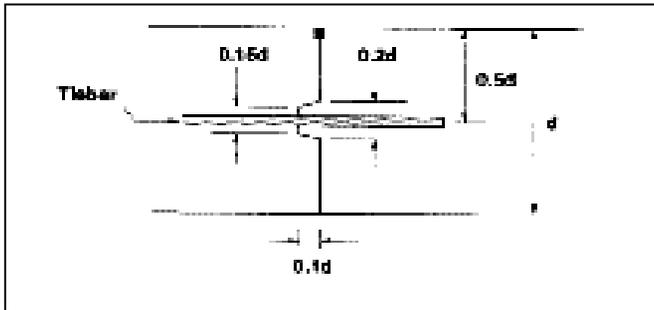
Menurut FHWA (1990), transfer beban pada sambungan memanjang dapat dilakukan melalui *interlocking aggregate*. Untuk mencegah terbukanya sambungan serta *faulting*, maka antara sambungan susut memanjang harus diikat menggunakan ruji (*tie bar*).

Sistem *keyway*

FHWA (1990) juga secara hati-hati menyarankan penggunaan *keyway* untuk meningkatkan kinerja sambungan. Gambar 1 di bawah merupakan tipikal sambungan susut memanjang dengan *keyway* yang disarankan oleh FHWA (1990).

Meskipun sistem *keyway* tidak terbukti meningkatkan efisiensi transfer beban pada sambungan memanjang, tetapi membantu mengurangi lendutan pada perkerasan beton. *Keyways* tidak dianjurkan pada pelat

beton dengan ketebalan kurang dari 25 cm, karena kesulitan pengerjaannya pada waktu pelaksanaan.



Gambar 1. Tipikal sambungan memanjang dengan *keyway*

Permasalahan penggunaan *keyways* adalah bentuknya harus lurus dan mulus, dimana untuk mendapatkan hal itu cukup sulit di lapangan. Selain itu pemadatan di sekitar *keyways* juga membutuhkan penanganan ekstra. Untuk mengatasi hal tersebut dapat digunakan cetakan yang terbuat dari baja, yang tentu saja membutuhkan biaya yang jauh lebih mahal dari cetakan yang terbuat dari kayu.

Permasalahan lain dari penggunaan *keyways* adalah, kekuatan kunci *keyways* hanya sekitar 1/3 dari tebal kunci. Jika sambungan membuka, pinggiran pelat beton akan menurun sebelum kunci menyentuh sisi pelat beton disebelahnya untuk melakukan transfer beban. Dan jika bukaan sambungan tersebut cukup besar, pinggiran pelat beton disisi lainnya dapat mengalami penurunan sampai titik tertentu yang dapat mengakibatkan retak/patah sebelum beban ditransfer ke pelat beton disebelahnya. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Pelat beton telah turun sebelum *keyway* mentransfer beban

2.2.3 Sambungan konstruksi arah melintang

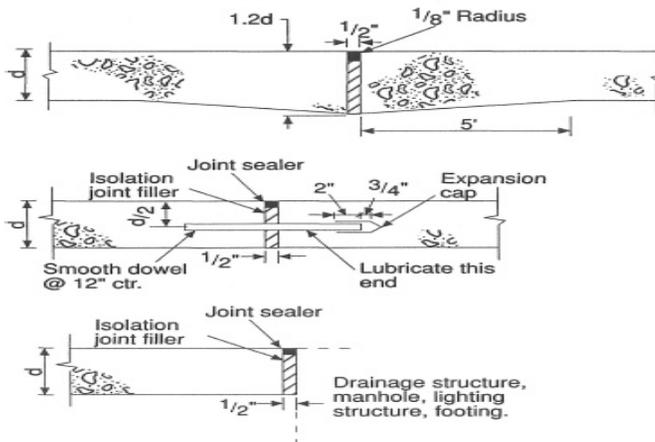
Sambungan konstruksi melintang diperlukan jika pelaksanaan penghamparan campuran beton di lapangan mengalami gangguan selama lebih dari 30 menit. Sambungan ini biasanya diperlukan pada akhir pelaksanaan setiap hari. Sambungan pelaksanaan ini harus berjarak minimal 1,8 m dari sambungan kontraksi lainnya.

Sambungan pelaksanaan melintang biasanya menjadi pengganti sambungan kontraksi melintang yang direncanakan. Namun bentuknya sebaiknya tidak miring, karena sulit melakukan pemadatan yang maksimal. Sambungan pelaksanaan melintang harus menggunakan dowel, dan tidak menggunakan system *keyway* karena sering terjadi *spall*. Sambungan pelaksanaan melintang disarankan dipotong dan diberi bahan penutup sambungan sesuai ketentuan pada sambungan kontraksi melintang.

2.2.4 Sambungan Isolasi

Sambungan isolasi merupakan sambungan yang diperlukan untuk memisahkan perkerasan dengan bangunan lainnya, seperti jembatan, jalan lama, persimpangan, *manhole* dan lain sebagainya. Sambungan ini dibuat untuk mengantisipasi terjadinya perbedaan pergerakan arah vertikal dan horizontal antara perkerasan dengan bangunan di dekatnya, sehingga kerusakan yang disebabkan perbedaan pergerakan tersebut dapat dihindari.

ACPA (1992) menyarankan tipikal sambungan isolasi yaitu sambungan isolasi dengan menggunakan dowel, dengan penebalan serta tanpa menggunakan dowel seperti ditunjukkan pada gambar - gambar di bawah ini.



Gambar 3. Tipikal sambungan isolasi

2.2.5 Sambungan Ekspansi

Menurut ACPA (1992), sambungan ekspansi hanya diperlukan pada kondisi sbb :

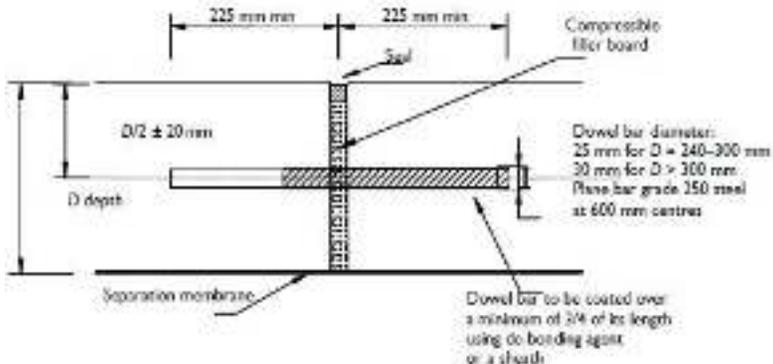
- Jika panjang perkerasan lebih dari 18 m, tanpa sambungan kontraksi.
- Jika perkerasan dilaksanakan pada temperatur $< 4^{\circ}\text{C}$.
- Jika sambungan susut diperbolehkan dimasuki oleh material yang tidak dapat dimampatkan.
- Jika material yang digunakan untuk membuat perkerasan merupakan bahan yang memiliki sifat ekspansi yang tinggi.

Tipikal sambungan ekspansi pada dasarnya seperti sambungan susut melintang, dengan perbedaan pada ukuran lebar sambungan. Karena fungsinya untuk memberi ruang bagi ekspansi pelat perkerasan kaku, maka lebar minimum sambungan ekspansi adalah 3 cm.

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada sambungan ekspansi adalah :

Seperti sambungan lainnya, sambungan ekspansi akan membuka dan menutup jika terjadi perubahan temperatur, juga karena penggunaan material yang mempunyai koefisien ekspansi yang tinggi. Hal penting yang harus diperhatikan adalah pada waktu sambungan membuka dan melebar adalah potensi lepasnya bahan penutup (karena lebar bukaan cukup besar $> 3\text{ cm}$), juga air gampang menyusup demikian pula dengan bahan yang cukup keras. Oleh karena itu penggunaan sambungan ini harus benar-benar memperhatikan ketentuan yang ada, seperti menggunakan bahan penutup khusus untuk sambungan ekspansi.

Tipikal sambungan ekspansi ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Tipikal sambungan ekspansi

2.3 Alat Transfer Beban

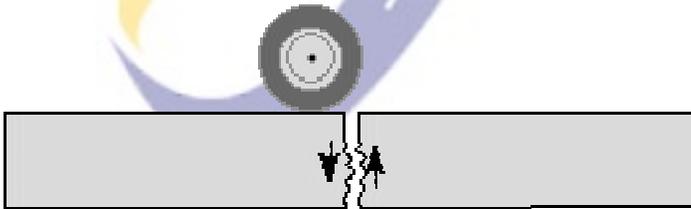
Pada perkerasan dengan sambungan, beban lalu lintas harus ditransfer dari pelat beton yang dibebani ke pelat beton disebelahnya.

Mekanisme transfer beban dapat terjadi melalui 3 cara,yaitu:

- lapis pondasi
- *interlocking aggregate*
- *dowel*

2.3.1 Agregat *interlock*

Mekanisme transfer beban yang mengandalkan *interlocking agregat* bergantung pada gesekan antar muka agregat pada bidang vertikal di bagian bawah hasil penggergajian sambungan, seperti ditunjukkan Gambar 5 dibawah. *Load transfer efficiency* sangat tergantung pada temperatur serta kekerasan agregat, dan hal ini dapat ditingkatkan dengan penggunaan agregat yang besar, bersudut serta mempunyai durability yang baik. Namun demikian kemampuan *interlocking aggregate* akan segera menurun apabila lebar retak atau bukaan sambungan membesar, dan frekuensi kendaraan berat yang melintasnya meningkat yang menyebabkan keausan agregat. Oleh karena itu *interlocking aggregate* sebagai alat transfer beban hanya disarankan untuk jalan-jalan lokal yang hanya dilalui lalulintas rendah dengan kendaraan ringan.



Gesekan antar partikel agregat pada waktu terjadi pembebanan

Gambar 5. Mekanisme Transfer beban antar partikel agregat

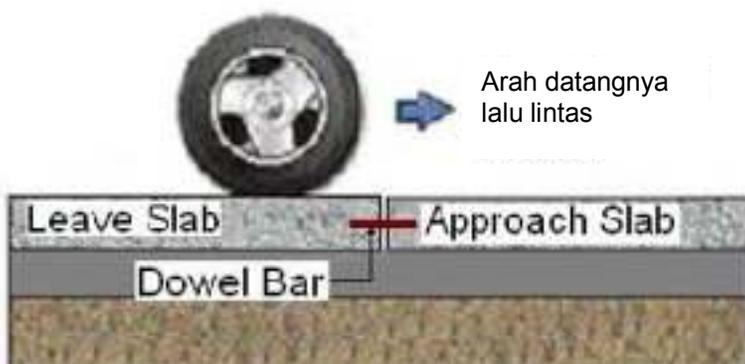
2.3.2 Dowel

Dowel berfungsi sebagai alat transfer beban dari pelat beton yang dibebani kepada pelat beton yang disebelahnya. Pada Gambar 6a di bawah terlihat jika perkerasan dilengkapi dengan dowel, maka pelat beton tidak mengalami

lendutan yang berarti. Akan tetapi jika perkerasan tidak dilengkapi dengan dowel (Gambar 6b), pada saat perkerasan dibebani, pelat beton akan mengalami lendutan yang cukup signifikan (terutama jika lapis pondasi yang dibawahnya tidak memadai). Lama kelamaan pada sambungan dapat terjadi perbedaan permukaan sambungan (*faulting*), dan selanjutnya dapat terjadi *pumping* dimana terpompanya butiran-butiran dari lapisan bawah naik ke permukaan perkerasan. Jika pada bagian bawah sambungan telah terbentuk rongga dan kendaraan berat dengan kecepatan tinggi melaluinya maka dapat terjadi *corner breaks* ataupun *blow up*.

Faktor-faktor yang menentukan kinerja dowel adalah :

- Diameter dowel
- Jarak antar dowel (*dowel spacing*)
- Letak dan posisi dowel yang tepat (*alignment*)
- Panjang batang dowel tertanam (*embedment length*)



Gambar 6a. Sambungan dengan dowel



Gambar 6b. Sambungan tanpa dowel

Alat transfer beban yang umum digunakan adalah dowel dengan bentuk bulat dan permukaan yang polos dan licin sesuai ketentuan AASHTO M31 atau ASTM A615.

Dimensi dowel yang umum digunakan adalah diameter 25 – 38 mm (1 - 1,5 in) dengan panjang 45 mm (1,8 in), dan ditempatkan ditengah - tengah ketebalan pelat beton, dengan jarak antar dowel 30 mm (1,2-in). Akhir-akhir ini penggunaan diameter dowel di beberapa negara cenderung menggunakan ukuran besar 38 mm (1,5 in), karena penggunaan dowel dengan diameter yang lebih besar dianggap lebih efektif mengurangi tegangan dan *faulting*.

Bahan Dowel

Penggunaan varian bahan dowel adalah terutama untuk menangani masalah korosi, yang umumnya menjadi permasalahan pada daerah yang lembab. Beberapa type dowel yang biasa digunakan yaitu :

- *Fiber reinforced polymer (FRP) composite dowel bars.*
- *FRP composite tubes filled with cement grout.*
- *Plastic-coated dowel bars.*
- *Solid stainless steel dowel bars.*
- *Stainless steel clad dowel bars.*
- *Stainless steel tubes filled with cement grout.*

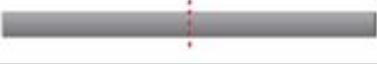
Bentuk Dowel

Selama ini dowel yang umum digunakan berbentuk bulat polos, namun akhir-akhir ini telah mulai dikembangkan dowel dalam berbagai bentuk varian. Bentuk - bentuk dowel tersebut ada yang berupa elips dan berbagai tipe pelat.

Hasil - hasil penelitian terkait penggunaan batang dowel yang berbentuk elips dan bulat mengemukakan bahwa;

- Dowel berbentuk elips dapat meningkatkan *bearing strength* beton-dowel.
- Dowel berbentuk pelat mampu mengurangi tahanan lateral pelat beton
- Penggunaan bahan relatif lebih sedikit dibanding dowel berbentuk bulat

Batang dowel yang berbentuk pelat dikenal dalam berbagai tipe seperti tertera pada Gambar 7.

Dowel Type	Plan View	Cross Section	Uses
Round Dowel Bar			I, CNT, CNST
Square Dowel Bar			I, CNT, CNST
Rectangular Plate Dowel			CNT, CNST
Diamond Plate Dowel			CNST
Tapered Plate Dowel			CNT
Double-Tapered Plate Dowel			CNT

I = Isolation Joints CNT = Contraction Joints CNST = Construction Joints

Gambar 7. Beberapa tipikal dowel berbentuk pelat

Penempatan Dowel

Dowel biasanya digunakan untuk sambungan dengan jarak 4,5 – 6,0 m, akan tetapi untuk perkerasan yang dilalui oleh lalu lintas berat, berdasarkan pengalaman pada sambungan dengan jarak yang lebih pendek pun disarankan tetap menggunakan dowel karena sangat berpotensi terjadi *faulting* (Witczak dan Yoder, 1975).

Dimensi dowel

Untuk beton bersambung tanpa tulangan (JPCP): AASHTO (1993) dan PCA (1991) menyarankan ketentuan diameter batang dowel 1/8 tebal perkerasan, dengan panjang batang dowel 46 cm (18 inch) dan jarak antar dowel 30,5 cm (12 inch).

Sedangkan untuk beton bersambung dengan tulangan (JRCP), ACPA menyarankan dimensi dowel seperti ditunjukkan Tabel 2 :

Tabel 2. Rekomendasi dimensi dowel untuk JRCP (ACPA)

Tebal perkerasan (mm)	Diameter dowel (mm)	Panjang dowel tertanam (mm)	Panjang dowel (mm)
150	20	125	360
165	22	125	360
180	25	150	400
190	28	180	400
200	32	200	430

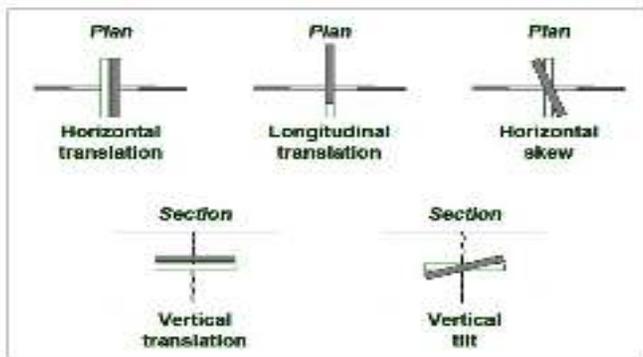
Penyimpangan posisi dowel (*dowel misalignment*)

Batang dowel harus ditempatkan secara tegak lurus terhadap sambungan melintang, sehingga dapat berfungsi dengan baik. Penempatan batang dowel yang menyimpang tidak hanya akan mengurangi efektivitas batang dowel sebagai alat transfer beban, tetapi juga dapat menyebabkan kerusakan dini dan *spalling* pada sambungan.

Tayabji (1986) mengidentifikasi beberapa kategori penyimpangan batang dowel (*misaligned*) yaitu:

- Pergeseran arah horizontal (*horizontal translation*)
- Pergeseran arah longitudinal (*longitudinal translation*)
- Pergeseran arah vertikal (*vertical translation*)
- Kemiringan arah horizontal (*horizontal skew*)
- Kemiringan arah vertikal (*vertical tilt*)

Tipe-tipe penyimpangan letak dowel ditunjukkan pada Gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8. Tipe-tipe penyimpangan dowel (Tayabji,1986)

Selama ini hipotesa yang dipercaya terkait dengan penyimpangan-penyimpangan karena kesalahan penempatan (*misalignment*) dan pergeseran (*translation*) akan menyebabkan hal-hal sbb:

- **Pergeseran arah horizontal (*horizontal translation*)**
Pergeseran horizontal, akan mengurangi efektifitas dan kemampuan batang dowel sebagai alat transfer beban.
- **Pergeseran arah longitudinal (*longitudinal translation*)**
Jika batang dowel yang tertanam tidak cukup pada kedua sisi pelat beton, yang disebabkan karena pergeseran longitudinal, maka tegangan (*concrete bearing stress*) pada pelat beton akan meningkat, yang dapat menyebabkan longgarnya posisi batang dowel (*dowel looseness*) yang mengakibatkan hilangnya LTE.
- **Pergeseran arah vertikal (*vertical translation*)**
Pergeseran arah vertikal dapat menyebabkan batang dowel tidak cukup tertutupi dengan lapisan beton, yang mana dapat menyebabkan *spalling* pada sambungan dan kehilangan LTE.
- **Kemiringan arah horizontal (*horizontal skew*) dan arah vertikal (*vertical tilt*)**
Penyimpangan arah horizontal dan vertikal dapat menyebabkan pergerakan tertahan bahkan mengunci sambungan pada waktu beton mengalami kontraksi karena perubahan temperatur atau pada waktu sambungan dilalui beban kendaraan. Dan gerakan yang tertahan tersebut dapat meningkatkan tegangan tarik pada pelat beton yang berpotensi menyebabkan terjadinya retak arah melintang. Demikian pula dengan area sekitar dowel dapat terjadi *spalling*, serta kelonggaran posisi batang dowel pada pelat beton.

Ruji/ batang pengikat (*tie bar*)

Ruji biasanya berupa baja berulir yang ditempatkan melintang sambungan longitudinal. Ruji merupakan batang berulir yang menyatu dengan beton, dan tidak diperbolehkan mengalami pergerakan, dengan demikian berfungsi meminimalisir bukaan sambungan longitudinal dan sekaligus mempertahankan agregat *interlock*. Ruji berfungsi untuk mencegah *faulting* dan pergerakan arah lateral pelat beton. Ruji juga biasanya digunakan untuk menyatukan bahu dengan pelat beton.

Ruji yang digunakan umumnya berdiameter 12,5 mm (1/2 inch), dengan panjang antara 0,6 - 1,0 m (24 dan 39 inch), dan berjarak interval antara 0,75-1,1 m (30 sampai 43 inch).

Penempatan ruji harus berjarak minimal 380 mm (15 inch) dari sambungan melintang, agar tidak mengganggu pergerakan sambungan (ACPA,1991).

2.4 Pembukaan Terhadap Lalu Lintas

Cohen M.D et al (2003) mengemukakan beberapa ketentuan mengenai pembukaan perkerasan untuk dapat dilalui oleh lalu lintas dapat didasarkan oleh :

- Kekuatan beton
- Waktu
- *Maturity*

2.5 Toleransi Ketebalan Perkerasan

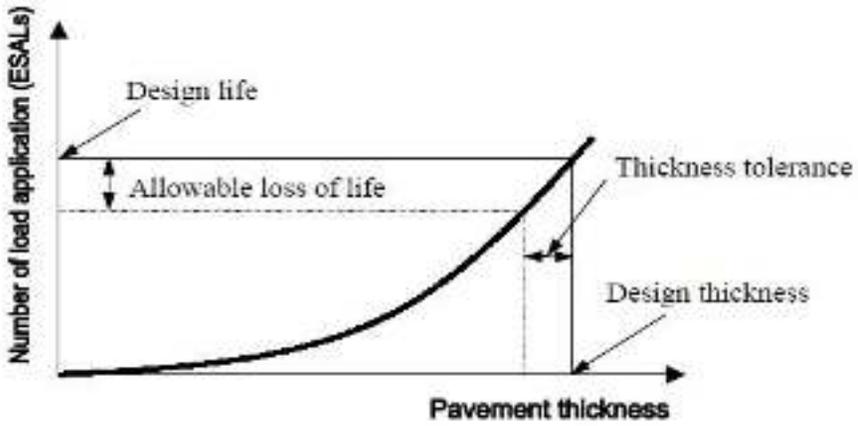
2.5.1 Pengaruh Penyimpangan Ketebalan

Beberapa Negara menentukan kekurangan pembayaran akibat penyimpangan tebal, seperti yang tercantum dibawah pada Tabel 2. Spesifikasi Binamarga menggunakan ketentuan seperti pada Negara bagian Virginia dan Connecticut.

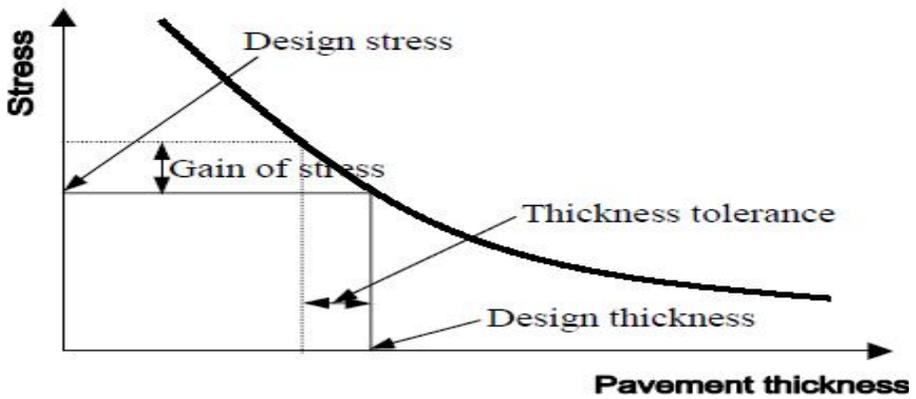
Pengurangan ketebalan pelat dari ketebalan rencana mempunyai pengaruh yang besar terhadap penurunan kemampuan memikul beban lalu lintas pada perkerasan kaku. Menurut Furqon (2004), pengurangan ketebalan pelat 25 mm dari ketebalan rencana 25 cm menyebabkan penurunan kemampuan perkerasan memikul beban lalu lintas atau umur pelayanan sampai sekitar setengahnya.

Kim dan Mc Cullough (2002) mengemukakan tiga pendekatan untuk mengetahui pengaruh kurangnya tebal rencana dengan hilangnya umur layanan perkerasan, yaitu

1. Menggunakan persamaan perencanaan tebal perkerasan pada AASHTO, seperti digambarkan pada Grafik 9.
2. Menggunakan persamaan *Westergaard, Stress and Fatigue Failure model*.
3. Menggunakan *mechanistic* model untuk memprediksi kerusakan perkerasan (mis : retak dan *punchout*).



Gambar 9. Hubungan tebal perkerasan dengan umur perkerasan (beban lalulintas) (AASHTO)



Gambar 10. Hubungan tegangan yang terjadi pada perkerasan dengan pengurangan tebal perkerasan.

Tabel 3. Penyesuaian harga kontrak berkaitan kekurangan tebal

Kekurangan Tebal	Pengurangan Pembayaran (%)	Kekurangan Tebal	Pengurangan Pembayaran (%)
Alabama		Pennsylvania	
0 – 5 (mm)	100	0 – 6.5 (mm)	100
5.1 – 10 (mm)	80	6.6 - 7.7 (mm)	95
10.1 – 15 (mm)	70	7.8 – 8.9 (mm)	85
15.1 – 20 (mm)	60	9.0 – 10.1 (mm)	75
20.1 – 25 (mm)	50	10.2 – 11.3 (mm)	50
Connecticut		11.4 – 12.5 (mm)	25
		North Carolina	
0 – 5.1 (in)	100	0 – 0.2 (in)	100
5.2 – 7.6 (mm)	80	0.21 – 0.3 (in)	80
7.7 – 10.2 (mm)	72	0.31 – 0.4 (in)	72
10.3 – 12.7 (mm)	68	0.41 – 0.5 (in)	68
12.8 – 19.1 (mm)	57	0.51 – 0.75 (in)	57
19.2 – 25.4 (mm)	50	0.76 – 1 (in)	50
Massachusetts			
0 – 5 (mm)	100	Virginia	
5 – 10 (mm)	80	0 – 0.2 (in)	100
10 – 15 (mm)	70	0.21 – 0.3 (in)	80
New York		0.31 – 0.4 (in)	72
0 – 13 (mm)	100	0.41 – 0.5 (in)	68
Oregon		0.51 – 0.75 (in)	57
0 – 5 (mm)	100	0.76 – 1 (in)	50
5.1 – 7.6 (mm)	83	West Virginia	
7.7 – 10.1 (mm)	76	0.01 – 0.1 (in)	98
10.2 – 12.7 (mm)	73	0.11 – 0.2 (in)	96
12.8 – 19 (mm)	63	0.21 – 0.3 (in)	94
19.1 – 25 (mm)	59	0.31 – 0.4 (in)	92.2
Hawaii		0.41 – 0.5 (in)	90.3
0 – 0.2 (in)	100	0.51 – 0.6 (in)	88.4
0.21 – 0.4 (in)	75	0.61 – 0.7 (in)	86.5
0.41 – 0.6 (in)	40		

2.5.2 Pengaruh Penyimpangan Kekuatan

Penurunan mutu beton pada pelat perkerasan kaku mengakibatkan penurunan yang besar dari kemampuan perkerasan tersebut dalam memikul beban lalu lintas. Penurunan mutu beton (kuat lentur) pelat beton sebesar 20% dari kekuatan rencana dapat menyebabkan penurunan masa pelayanan perkerasan sampai setengahnya, Affandi (2004).



Bab-3

SPEKIFIKASI PERKERASAN KAKU DI INDONESIA

Pada bab ini dibahas mengenai beberapa ketentuan yang terdapat pada spesifikasi, yaitu;

- Sambungan
- Dowel
- Pembukaan perkerasan untuk lalu lintas

3.1 Sambungan

Kinerja sambungan sangat ditentukan oleh : jarak sambungan, kedalaman penggergajian, waktu penggergajian dan alat transfer beban pada sambungan.

3.1.1 Sambungan Melintang

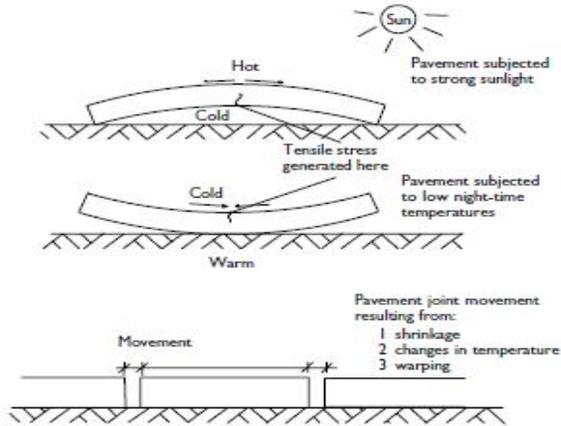
3.1.1.1 Jarak sambungan

Pada spesifikasi Binamarga tidak ada tercantum ketentuan mengenai jarak sambungan, karena merupakan bagian dari perencanaan perkerasan. Akan tetapi pada kajian ini dipandang perlu untuk menguraikan ketentuan mengenai jarak sambungan.

Pengaruh perbedaan temperatur pada pelat beton (Pengaruh temperatur)

Pada siang hari, dimana temperatur permukaan pelat beton lebih tinggi daripada temperatur bagian bawah pelat, maka bagian atas pelat beton cenderung memanjang dan bagian bawah mengalami kontraksi (*curling*)

downward). Sebaliknya terjadi pada waktu malam hari, dimana temperatur pada permukaan pelat beton lebih rendah daripada bagian bawah pelat beton. Hal ini menyebabkan permukaan pelat beton berkontraksi (*curling upward*). Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 11 di bawah.



Gambar 11. *Curling* dan *warping* pada perkerasan kaku

Perkerasan beton mengalami kontraksi terutama diakibatkan oleh perubahan temperatur dan reaksi kimia yang terjadi dalam beton, khususnya pada umur awal beton. Dimana semakin panjang panel pelat beton, maka semakin besar tegangan yang terjadi serta semakin besar juga pergerakan dari panel beton. dan hal ini menyebabkan pelat beton berpotensi mengalami retak melintang.

Panjang jarak sambungan mempengaruhi tegangan yang terjadi pada tepi pelat beton, dimana besarnya tegangan pada tepi pelat pada waktu terjadi *curling* ditunjukkan pada persamaan di bawah ini, yaitu :

$$\sigma = \frac{CE \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu^2)}$$

Dimana :

E = Modulus elastisitas beton

α_t = koefisien thermal beton

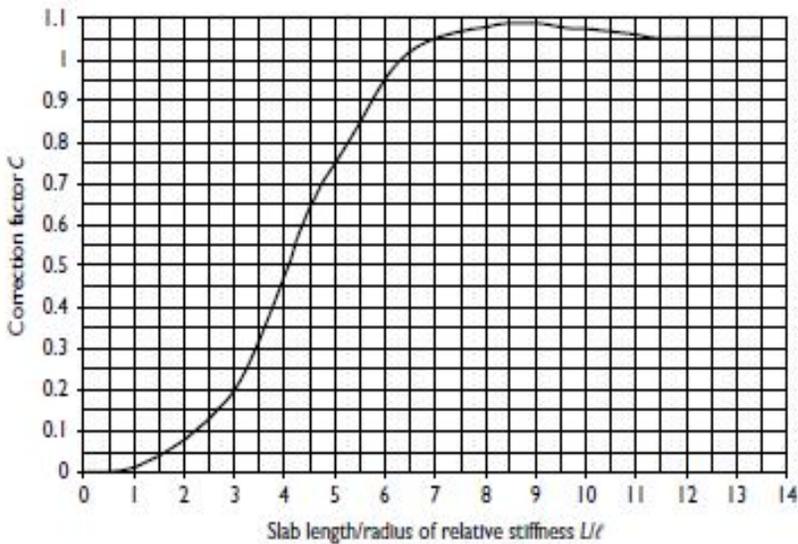
Δt = perbedaan temperatur bagian atas dan bawah pelat beton

ν = Poisson's ratio beton

C = faktor koreksi,

Nilai C (faktor koreksi) diperoleh berdasarkan grafik *Bradbury* (1938) ditunjukkan pada Gambar 12, dimana besaran C bergantung pada ratio panjang pelat beton (L) dengan I (*radius of relative stiffness*). Dari grafik terlihat bahwa semakin panjang pelat beton, maka faktor koreksi akan semakin besar pula. Semakin besar faktor koreksi C, maka semakin besar pula tegangan *curling* yang terjadi pada pelat beton.

Faktor lain yang mempengaruhi nilai C adalah besarnya kekakuan lapis pondasi, dimana semakin kaku lapis pondasi (semakin besar nilai k), akan menyebabkan besaran I (*radius of relative stiffness*) menjadi lebih kecil dan selanjutnya akan menyebabkan ratio L (panjang pelat beton) terhadap I yang semakin besar. Sebagai akibatnya faktor koreksi C meningkat, dan semakin besar nilai C maka tegangan *curling* akan semakin besar.

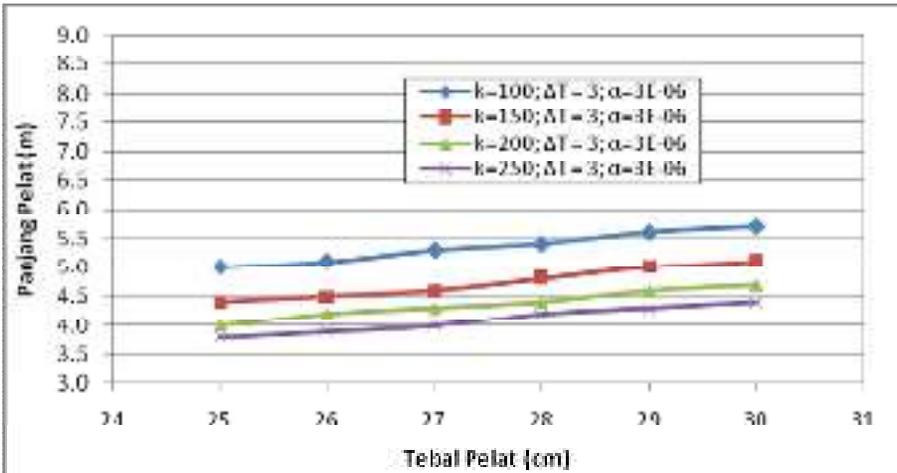


Gambar 12. Faktor koreksi tegangan curling pada pelat beton (Bradbury 1938)

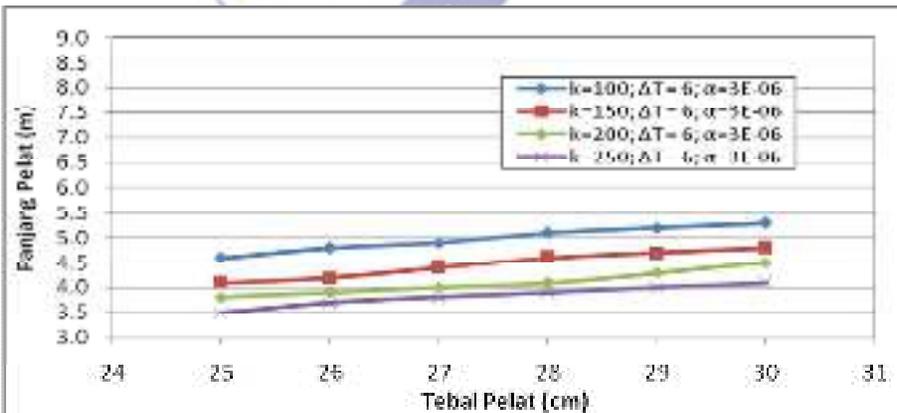
Hasil simulasi perhitungan jarak sambungan berdasarkan persamaan Huang (2004) dan grafik *Bradbury* digambarkan pada grafik - grafik di bawah ini (Gambar 13a,13b dan 13c). Dari grafik-grafik tersebut terlihat bahwa faktor k sangat mempengaruhi perubahan jarak sambungan, dimana semakin besar nilai k (semakin kaku lapisan pondasi) maka semakin pendek jarak sambungan.

Demikian pula jika semakin besar perbedaan temperature bagian atas dan bagian bawah pelat beton, semakin pendek jarak sambungan.

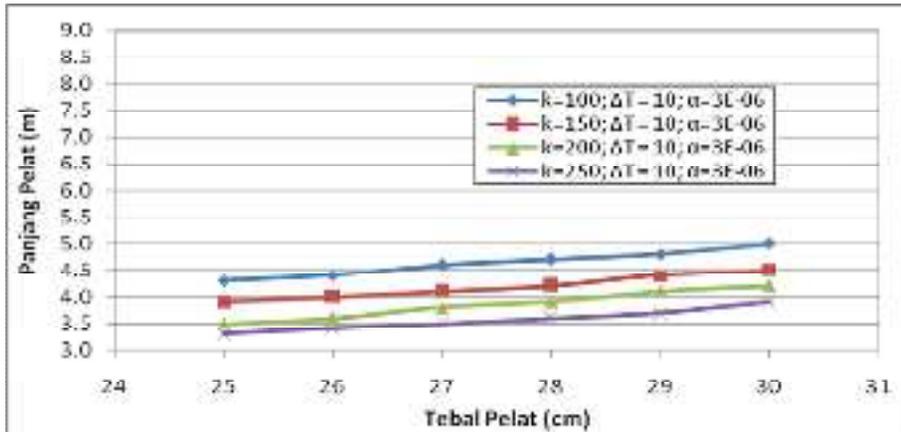
Sebenarnya faktor lain yang juga sangat mempengaruhi panjang jarak sambungan adalah koefisien termal beton, akan tetapi besarnya koefisien termal beton hanya dapat digunakan jika perbedaan temperatur minimal 60°C . Dikarenakan perbedaan temperatur di Indonesia $< 60^{\circ}\text{C}$ maka besaran koefisien termal pada simulasi ,digunakan nilai yang sama.



Gambar 13a. Hubungan tebal perkerasan dengan panjang perkerasan dengan berbagai nilai k.



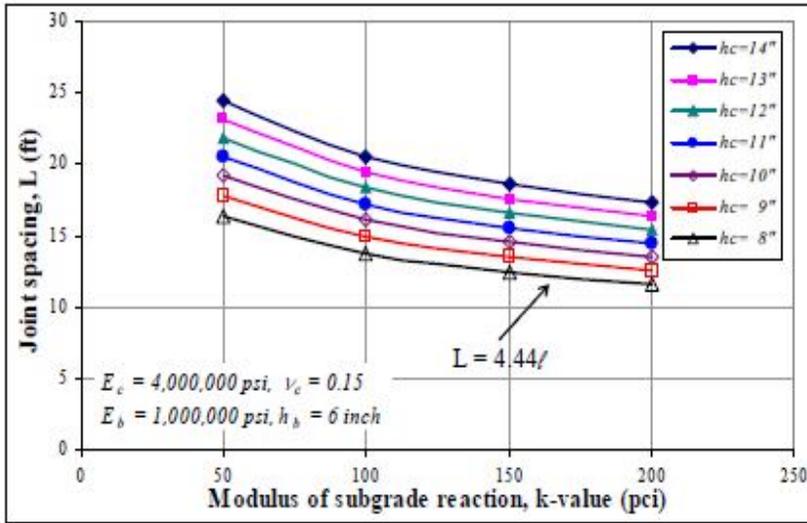
Gambar 13b. Hubungan tebal perkerasan dengan panjang perkerasan dengan berbagai nilai k.



Gambar 13c. Hubungan tebal perkerasan dengan panjang perkerasan dengan berbagai nilai k,

Beberapa institusi yang memberikan rekomendasi mengenai jarak sambungan adalah :

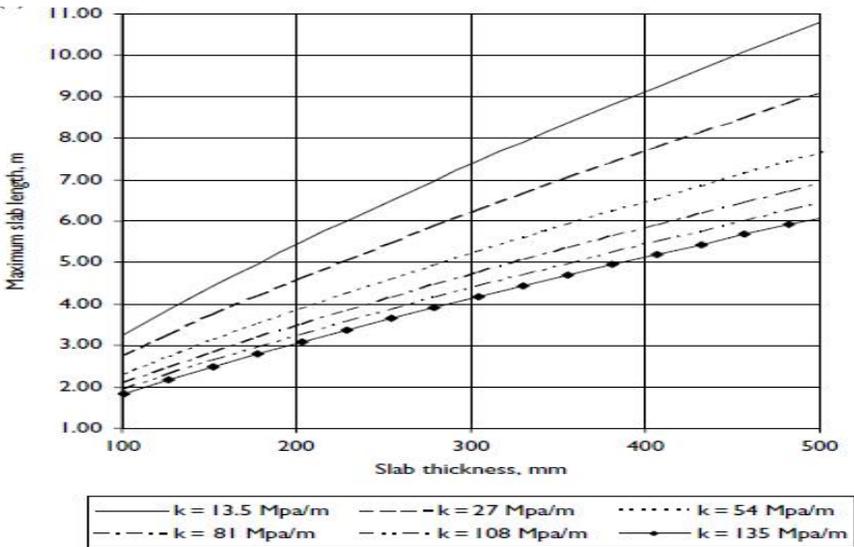
- **US Airfield** menyarankan panjang maksimum pelat beton 4 – 6 kali *radius relative stiffness* dari perkerasan beton. Hal ini didasarkan kajian serta pengalaman-pengalaman di lapangan yang menunjukkan bahwa terjadi peningkatan retak melintang jika rasio panjang perkerasan (L) dengan *radius relative stiffness* (*l*) lebih besar dari 4,44.
- **ACI (2002) dan FHWA (2007)** juga menggunakan dasar tersebut diatas, serta adanya pengaruh tebal perkerasan dan nilai k effective terhadap jarak sambungan. Hal ini digambarkan pada grafik hubungan jarak sambungan dengan nilai k dengan berbagai nilai tebal perkerasan beton. Pada Grafik terlihat bahwa semakin tebal perkerasan beton, maka jarak sambungan melintang semakin besar pula. Dan jarak sambungan akan semakin pendek jika nilai k semakin besar (lapis pondasi semakin kaku).



Gambar 14. Hubungan Jarak maksimum sambungan dengan tebal perkerasan

- **AASHTO 1993** menyatakan jarak sambungan melintang dan longitudinal bergantung pada beberapa hal, yaitu :
 - Bahan dan temperatur dari kondisi lokal. Dimana jarak sambungan akan semakin pendek jika *coefficient thermal*, perubahan temperatur atau ketahanan gesek lapis pondasi meningkat.
 - Tebal perkerasan dan kualitas *joint sealant* mempengaruhi panjang jarak sambungan.
 - Secara garis besar jarak sambungan maksimum (feet) untuk beton tanpa tulangan adalah 2x tebal perkerasan (inchi).
 - Sangat menyarankan penggunaan jarak sambungan mempertimbangkan pada laporan - laporan dari hasil pelaksanaan sebelumnya.

- **ACPA (1992)** menyarankan jarak sambungan melintang untuk beton tanpa tulangan 25 – 30 kali tebal perkerasan, dengan jarak maksimum 4,6 m.



Gambar 15. Jarak maksimum sambungan dengan tebal perkerasan untuk lapis pondasi yang distabilisasi.

Gambar diatas menunjukkan maksimum jarak sambungan berdasarkan tebal perkerasan dan modulus reaksi tanah dasar (k) untuk lapis pondasi yang distabilisasi.

Pada Tabel 4 dibawah ini ditunjukkan rangkuman jarak sambungan untuk perkerasan beton tanpa tulangan dari sumber - sumber yang telah disebut diatas.

Tabel 4. Jarak sambungan melintang untuk beton tanpa tulangan

Tebal perkerasan (mm)	Jarak sambungan melintang (m)				
	ACPA	UK highways	UK airfield	AASHTO (1993)	ACI/ FHWA
150	3,7 – 4,6	4	3	3,5	-
200	4,6	4	3	4,7	3,6 – 5,1
250	4,6	5	5,26	5,9	4,2 – 5,4
300	-	5	6	7,3	4,8 – 6,6

Dari Tabel 4 terlihat, jika pemilihan jarak sambungan mengikuti ketentuan AASHTO (1993), maka untuk tebal perkerasan 30 cm jarak sambungan adalah 7,3 cm. Dari beberapa pengalaman di lapangan, jarak ini terlalu panjang dan sangat berpotensi mengalami relak melintang. Menyadari kelemahan cara penentuan jarak sambungan dengan metoda AASHTO 1993, maka saat ini kebanyakan Negara bagian di Amerika memilih menggunakan jarak sambungan 4,6 m tanpa memperhitungkan tebal perkerasan.

Pada perkerasan yang menggunakan tulangan, jarak maksimum yang disarankan ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekomendasi jarak sambungan untuk beton bertulang

Tebal perkerasan (mm)	Jarak sambungan melintang (m)	Jarak sambungan memanjang (m)
Sistem pelat pendek (Standard USA, ACPA)		
200	10	6
250	10	6
Sistem pelat panjang; penulangan 500mm² atau lebih/ m(Standard UK)		
200	30	6
250	25	6
300	23	6

Variasi Tipe Jarak Sambungan

Penggunaan jarak sambungan yang sama dapat menyebabkan harmoni pergerakan kendaraan pada kecepatan tertentu, dimana suaranya menimbulkan masalah. Seperti yang dilaporkan oleh ACPA (2006) permasalahan yang pernah terjadi terutama akibat kendaraan dengan ukuran besar dengan suspensi yang lembut di jalan bebas hambatan pada negara bagian California, yang menggunakan jarak sambungan yang sama 4,6 m. Namun demikian seiring dengan perkembangan di bidang otomotif permasalahan tersebut telah dapat diatasi, sehingga penggunaan jarak sambungan yang bervariasi tidak diperlukan lagi. Karena alasan tersebut, beberapa institusi jalan menggunakan beberapa variasi jarak sambungan.

3.1.1.2 Alat Transfer Beban Dowel

Pada spesifikasi Binamarga ketentuan mengenai dowel sebagai alat transfer beban, hanya menyatakan hal-hal sbb;

- *Dowel harus dipasang sejajar dengan permukaan dan garis sumbu perkerasan beton, dengan memakai penahan atau perlengkapan logam lainnya yang dibiarkan tertinggal dalam perkerasan.*
- *Ujung dowel harus dipotong dengan rapi agar permukaannya rata.*
- *Sebagai pengganti rakitan dowel pada sambungan kontraksi, batang dowel bisa diletakkan dalam seluruh ketebalan perkerasan dengan perlengkapan mekanik yang disetujui Direksi.*

Perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan biasanya menggunakan batang dowel dari bahan baja yang berbentuk bulat dengan permukaan polos dan licin sesuai AASHTO M31 atau ASTM A615, yang diletakkan sejajar garis sumbu perkerasan.

Bahan

Selama ini penggunaan batang dowel dari bahan baja yang dilapis dengan bahan antikorosi sudah dianggap cukup baik, akan tetapi akhir - akhir ini banyak penelitian yang melaporkan bahwa dowel ternyata tidak dapat mempertahankan lapisan tahan karatnya dalam waktu yang lama. Hal ini disebabkan karena proses gesekan yang terjadi pada waktu pemasangan, pembebanan ataupun pada waktu perubahan temperatur dapat menyebabkan lapis tahan karat tersebut terkikis. Jika batang dowel mengalami korosi, maka kinerja perkerasan akan terganggu dikarenakan sambungan mengalami "penguncian". Penguncian ini akan menyebabkan sambungan tidak mampu mengakomodasi pergerakan beton, yang menyebabkan perkerasan beton berpotensi mengalami kerusakan berupa retak atau *spalling* pada sambungan.

Proses korosi lainnya terutama terjadi di daerah bercuaca dingin yang sering menggunakan garam sebagai bahan untuk pencair es. Neville (1998) mengemukakan, walaupun batang dowel yang tertanam mendapat perlindungan dari selimut beton, tetapi kehadiran *ion klorida* dapat dengan mudah menghancurkan perlindungan tersebut. *Ion klorida* terutama terdapat pada garam sebagai bahan pencair es, pada air laut dan pada *aselerator* yang berupa kalsium klorida.

Dalam beberapa tahun mulai banyak bahan dowel alternatif yang digunakan untuk mengatasi permasalahan ini antara lain:

a. *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Dowel Bars* :

FRP adalah komposit dari bahan polimer yang diperkuat oleh serat atau bahan penguat lain (HITEC 1998). Keuntungan utama dari bahan FRP komposit adalah lebih tahan terhadap korosi, ringan, dan kekakuannya yang mendekati PCC.

Akan tetapi harga dowel FRP jauh lebih mahal dibanding dowel baja yang dilapis bahan anti karat. Dan karena ringan pada waktu pemadatan dengan alat penggetar, dowel FRP dapat mengapung ke permukaan jika tidak diikat dengan benar.

b. Tabung FRP berisi mortar (*Composite Tubes Filled with Cement Grout*)

Merupakan batang dowel yang terbuat dari bahan *polimer* yang diperkuat dengan serat, serta di bagian tengahnya diisi oleh mortar semen. Bahan ini anti karat, tetapi modulus elastisitasnya lebih rendah dibanding dowel dari bahan baja dan *Reinforced Polymer (FRP) Composite Dowel*.

c. *Solid stainless steel bar*

Dowel dari bahan *stainless steel* yang masih terbukti mempunyai kinerja yang sangat baik serta ketahanan yang lama, akan tetapi harganya jauh lebih mahal dari dowel baja yang dilapis bahan anti karat.

d. *Stainless steel berbentuk tabung dan pipa*

Penggunaan bahan ini sebagai dowel telah banyak digunakan, akan tetapi kinerjanya untuk jangka panjang masih belum banyak dilaporkan (ASCE 2004)

Dimensi dowel

• **Panjang batang dowel**

Panjang batang dowel mengalami perkembangan sejak tahun 1920-an, dimana umumnya pada masa itu panjang batang dowel adalah 90 cm. Sedangkan pada 1930-an panjang batang dowel yang umum digunakan adalah 60 cm. Pada tahun 1938, *Friberg* menunjukkan pengaruh

pemotongan panjang dowel, dan menyimpulkan bahwa penggunaan batang dowel dengan panjang kurang dari 60 cm sudah cukup memadai.

Sampai tahun 1958, penetapan ketentuan panjang batang dowel yang digunakan tidak didasarkan pada pengaruh panjang batang yang tertanam pada perkerasan beton. Dan sejak tahun 1959 mulai dilaporkan hasil-hasil penelitian mengenai pengaruh panjang batang dowel yang tertanam, terhadap kemampuan dowel dalam melakukan transfer beban, *Teller* dan *Cashel* (1959).

Hasil penelitian terakhir mengenai panjang minimum batang dowel tertanam untuk mencegah terjadinya *faulting* dan mempertahankan kemampuan dowel dalam melakukan transfer beban adalah 6,4 cm. Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan, bahwa panjang batang dowel yang digunakan dimungkinkan jauh lebih kecil dari 45 cm. Namun demikian untuk mengantisipasi kesalahan dalam pelaksanaan, disarankan tetap menggunakan dowel dengan panjang 45 cm, dengan panjang batang tertanam harus lebih dari 6,4 cm pada masing - masing sisi perkerasan beton.

- **Diameter dowel**

Besaran ukuran diameter dowel yang tepat diperlukan untuk menahan gaya geser yang ditransmisikan dari satu pelat ke pelat beton yang disebelahnya, serta untuk mengurangi *bearing stress* batang dowel terhadap beton. Pada perencanaan penentuan ukuran dowel, parameter yang paling menentukan adalah *bearing stress* dari beton. Secara teoritis *bearing stress* beton yang diijinkan ditentukan oleh besarnya kuat tekan beton, sehingga dimungkinkan untuk menggunakan batang dowel yang lebih kecil dengan beton yang memiliki kuat tekan yang lebih tinggi. Namun demikian, saat ini untuk kepraktisan pada umumnya pedoman - pedoman perkerasan beton telah menetapkan standar untuk ukuran diameter, panjang batang, jarak antar batang, serta kekuatan bahan dari batang dowel.

Perencanaan besaran diameter dowel bervariasi di beberapa negara, dimana Amerika (AASHTO) menetapkan diameter hanya berdasarkan tebal perkerasan. Sedangkan perencanaan diameter dowel menurut analisa *Friberg*, sangat dipengaruhi oleh banyak parameter seperti; modulus reaksi lapis pondasi, beban lalu lintas, tebal perkerasan beton, dan jarak antar

dowel. Dan penetapan besaran diameter ditentukan oleh ratio *bearing strength dengan bearing stress* > 1.

Dibawah ini ditunjukkan tabel perbandingan ukuran diameter hasil perhitungan dengan analisa *Friberg* dan AASHTO. Dari Tabel 5 terlihat besaran diameter hasil perhitungan AASHTO lebih besar dari analisa *Friberg*. Meskipun hasil analisa *Friberg* lebih kecil dari hasil perencanaan AASHTO, akan tetapi pada analisa *Friberg* telah diperhitungkan faktor – faktor yang mempengaruhi kinerja dowel dan perkerasan beton. Sehingga besaran diameter dowel hasil analisa *Friberg* aman untuk dipakai sebagai acuan.

Tabel 6. Perbandingan ukuran diameter dowel hasil perhitungan dengan analisa *Friberg* dan AASHTO

k Pci	P (Kg)	h (cm)	b (mm)	B (cm)	fb/σ susut	fb/σ muai	b (mm) AASHTO
320	4100	25	25	17.5	3.31	2.84	32
320	4100	25	25	20	2.95	2.53	32
320	4100	25	25	22.5	2.66	2.29	32
320	4100	25	25	27.5	2.25	1.93	32
320	4100	25	25	30	2.09	1.79	32
320	6500	25	30	30	1.71	1.49	32
320	6500	25	25	27.5	1.42	1.22	32
320	6500	25	25	25	1.53	1.32	32
320	6500	27	25	30	1.40	1.20	33
320	6500	27	25	25	1.63	1.40	33
320	6500	30	25	30	1.48	1.27	38
320	10000	25	30	30	1.11	0.97	32

k Pci	P (Kg)	h (cm)	b (mm)	B (cm)	fb/ σ susut	fb/ σ muai	b (mm) AASHTO
320	10000	25	30	25	1.30	1.13	32
320	10000	25	30	20	1.57	1.37	32
320	10000	27	30	30	1.16	1.02	33
320	10000	27	30	25	1.36	1.19	33
320	10000	30	30	30	1.25	1.09	38
320	10000	30	30	25	1.46	1.27	38

Keterangan tabel :

- k = modulus reaksi lapis pondasi
- P = beban lalu lintas
- h = tebal perkerasan beton
- b = diameter dowel
- B = jarak antar dowel

Catatan : tabel diatas dihitung berdasarkan 1 (satu) beban titik saja, belum memperhitungkan jika ada beban - beban lalu lintas lainnya.

- **Jarak antar dowel (*dowel spacing*)**

Sejak tahun 1950an jarak minimum antar dowel yang umum digunakan adalah 30 cm, dan telah terbukti memberikan kemampuan kapasitas geser yang baik pada setiap dowel. Pada jalur roda kendaraan, jarak antar dowel kadang - kadang direncanakan sedikit lebih kecil dari 30 cm, seperti yang disarankan oleh beberapa institusi jalan. Akan tetapi perlu diwaspadai jika jarak antar dowel terlalu dekat, dapat menyebabkan bidang perlemahan pada formasi barisan dowel, Mark B. Snyder (2011).

Variasi jarak antar dowel

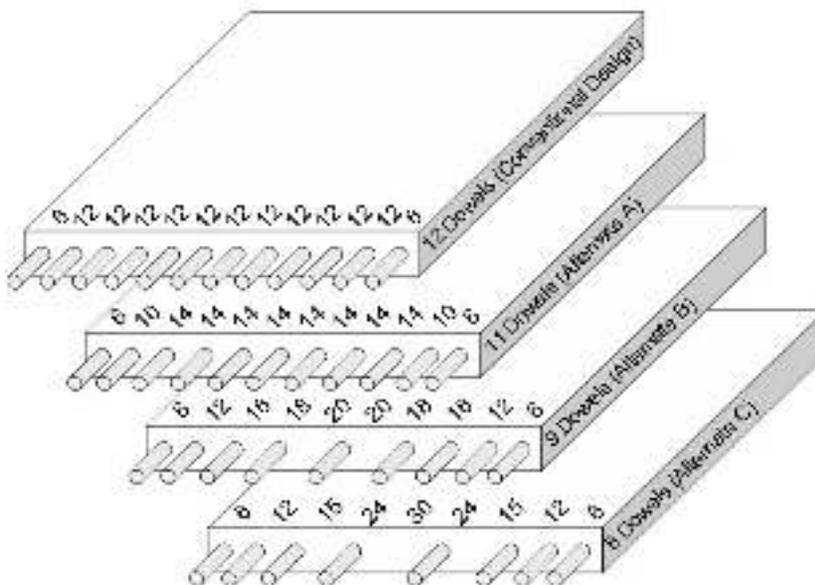
Semakin kecil jarak dowel, maka *bearing stress* dan lendutan juga akan semakin mengecil. Sebaliknya semakin besar jarak antar dowel, maka

bearing stress dan lendutan akan meningkat serta kekakuan sambungan menurun.

Pada struktur perkerasan beton bersambung yang menggunakan dowel, tegangan yang paling kritis terdapat pada tepi perkerasan.

Pada Gambar 16 di bawah ditunjukkan simulasi tiga alternatif rancangan jarak antar dowel, dan pengaruhnya terhadap kinerja perkerasan dibandingkan dengan rancangan jarak antar dowel yang seragam 30 cm (rancangan konvensional). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada rancangan dengan alternatif A, B dan C tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan rancangan konvensional. Kenaikan tegangan tepi hanya berkisar antara 1 – 7 %, dan penambahan lendutan berkisar 1 – 3% saja.

Hasil simulasi juga menunjukkan *bearing stress* beton pada masing-masing alternatif juga berubah dibandingkan dengan rancangan konvensional. Namun yang menarik adalah meskipun tegangan pada setiap dowel meningkat sekitar 2 – 7%, ternyata *bearing stress* beton pada dowel yang paling ujung cenderung berkurang dibandingkan pada rancangan konvensional sekitar 1 – 8%.

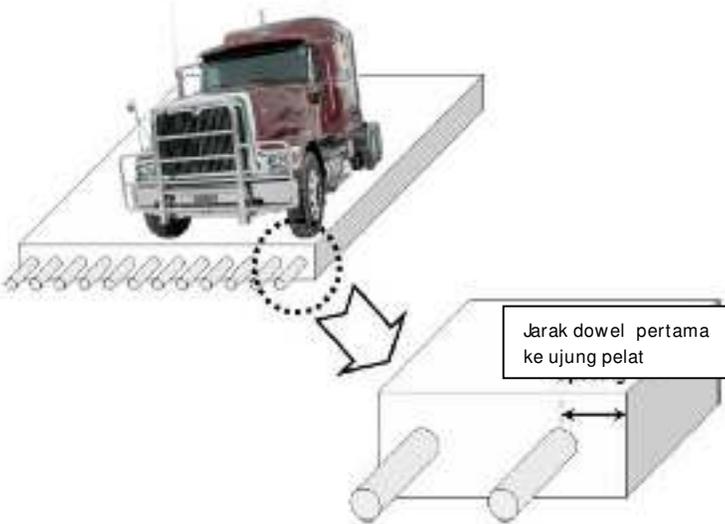


Gambar 16. Variasi jarak antar dowel

Dibeberapa Negara digunakan variasi jarak dowel, seperti di Jerman diterapkan jarak antar dowel yang lebih besar pada daerah di luar jalur roda yaitu 50 cm, sedangkan pada jalur roda 25 cm.

Jarak dowel terhadap tepi perkerasan

Posisi dowel yang paling ujung (dowel pertama) pada umumnya ditempatkan sedekat mungkin terhadap tepi perkerasan. Hal ini dilakukan untuk memaksimalkan dukungan terhadap sambungan pada titik yang paling kritis, dan jarak dowel tersebut umumnya sekitar 15 cm terhadap tepi perkerasan.



Gambar 17. Jarak dowel pertama terhadap tepi perkerasan

Jika jarak dowel pertama dibuat lebih besar dari 15 cm terhadap tepi perkerasan, ternyata tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap lendutan dan tegangan tepi. Akan tetapi penambahan jarak dapat meningkatkan *bearing stress* secara signifikan, dan peningkatan *bearing stress* akan semakin besar dengan semakin tebalnya perkerasan beton serta semakin besarnya ukuran diameter dowel.

Di beberapa Negara bagian di Amerika, saat ini jarak dowel terhadap tepi perkerasan dibuat lebih jauh antara 22,5 sampai 30 cm. Alasan menggunakan jarak yang lebih besar tersebut dikarenakan di Amerika penghamparan campuran beton umumnya menggunakan system acuan gelincir, dan penempatan dowel menggunakan rakitan dan seringkali peralatan

penghampar tersebut menyentuh ujung rakitan, sehingga menyebabkan penyimpangan posisi dowel yang cukup serius. Sampai saat ini di Indonesia penghamparan campuran beton di lapangan pada umumnya menggunakan metode acuan tetap, oleh karena itu jarak dowel pertama terhadap ujung perkerasan sebaiknya adalah 15 cm.

Penyimpangan posisi dan letak dowel

Idealnya batang dowel diletakkan tegak lurus sambungan melintang, dan pada posisi ditengah - tengah tebal perkerasan beton. Jika letak dan posisi dowel tersebut telah berubah pada waktu perkerasan beton telah mengeras, maka dikatakan dowel telah mengalami penyimpangan (*misaligned*).

Faktor – faktor pelaksanaan yang dapat menyebabkan penyimpangan letak dan posisi dowel, adalah :

- Kekakuan rakitan dowel
- Pengawasan (*Quality control*) yang kurang memadai selama pelaksanaan
- Penanganan pada waktu penghantaran dan penempatan rakitan dowel
- Penyematan rakitan dowel terhadap lapis pondasi
- Adanya getaran selama pergerakan alat acuan gelincir
- Letak penggergajian
- Pelaksanaan penghamparan bahan beton
- Kurangnya pengawasan selama pelaksanaan

Quality control

Untuk mendeteksi penyimpangan letak dan posisi dowel pada perkerasan beton yang telah mengeras di lapangan, dapat dilakukan dengan cara destruktif dan non-destruktif. Cara yang tidak merusak dapat menggunakan alat *Ground Penetrating Radar* (GPR), dan MIT Scan-2, namun demikian kedua alat ini mempunyai keterbatasan dalam mengukur ketepatan besaran penyimpangan.

Keterbatasan alat MIT Scan-2; meskipun hasil pengukuran merupakan interpretasi langsung, tetapi MIT Scan-2 hanya dapat mendeteksi sampai kedalaman 15 – 19 cm, dan pengukuran penyimpangan arah horizontal dan vertikal hanya sampai dengan 4 cm. Dan jika pada waktu pengukuran terdapat benda - benda keras lain disekitar dowel, maka dapat juga mengganggu ketelitian pengukuran.

Keterbatasan alat GPR; hasil evaluasi sangat tergantung pada sifat - sifat bahan yang digunakan dalam mengevaluasi data, sehingga adanya perbedaan sifat bahan dari yang diukur dapat menyebabkan kesalahan interpretasi. Pengambilan contoh langsung di lapangan (*coring*) merupakan cara yang merusak, namun sejauh ini diakui merupakan metode yang paling akurat.



Gambar 18. Pendeteksian dengan GPR



Gambar 19. Tipikal pendeteksian MIT Scan-2 di lapangan

Toleransi penyimpangan letak dan posisi dowel

Pada spesifikasi Binamarga disebutkan ketentuan mengenai toleransi penyimpangan dowel : Sebelum menghampar beton, toleransi alinyemen dari masing-masing dowel pada lokasi manapun sebagaimana diukur pada rakitan

dowel haruslah ± 2 mm untuk dua per tiga bagian dowel dalam sambungan. Pada pelat yang telah selesai, toleransi alinyemen pada lokasi dowel haruslah ± 3 mm.

Toleransi yang diijinkan pada Spesifikasi Binamarga sangat kecil dibandingkan toleransi penyimpangan dari spesifikasi Negara - negara lain. Pada Tabel 7 ditunjukkan toleransi penyimpangan beberapa spesifikasi dari berbagai Negara. Dari Tabel 7 tersebut terlihat bahwa ketentuan mengenai toleransi penyimpangan dowel pada berbagai Negara tidak sama. Bahkan antar Negara bagian di Amerika Serikat sendiri tidak terlihat adanya konsensus mengenai ketentuan batasan toleransi penyimpangan dowel.

Batasan-batasan dalam penentuan spesifikasi besaran toleransi penyimpangan dowel :

- Meskipun banyak institusi jalan yang telah menyampaikan spesifikasi mengenai batasan toleransi penyimpangan dowel, tetapi harus diketahui ketentuan tersebut dibuat berdasarkan data yang masih sangat terbatas.
- Metode untuk mengukur efek penyimpangan dowel terhadap kinerja perkerasan belum ada yang standar dan diterima secara umum.
- Kajian yang selama ini dilakukan pada umumnya terfokus pada dowel tunggal, tidak sepenuhnya mempertimbangkan pengaruhnya pada kinerja perkerasan.

Tabel 7. Spesifikasi ketentuan toleransi penyimpangan dowel

Negara	Kemiringan Vertikal (inch)	Kemiringan horizontal (inch)	Pergeseran Longitudinal (inch)	Pergeseran Vertikal (inch)
Arkansas	0.25	0.25	N/A	N/A
Connecticut				
Federal Aviation Administration				
Hawaii				
Idaho				
Kentucky				
Minnesota				

Negara	Kemiringan Vertikal (inch)	Kemiringan horizontal (inch)	Pergeseran Longitudinal (inch)	Pergeseran Vertical (inch)
Texas				
Utah				
Wisconsin				
Nebraska				
Iowa				
Michigan				
Montana	0.25	0.25	0.50	0.50
North Dakota				
Tennessee	0.25	0.25	0.25	0.25
Ontario	0.24	0.24	0.59	0.59
Nevada	0.50	0.50	N/A	N/A
Missouri	0.50	0.50	0.50	1.00
Kansas	0.38	0.38	N/A	1/10 Pav.depth
Indiana				
North Carolina	0.38	0.38	N/A	N/A
Illinois				
Delaware	0.19	0.19	N/A	N/A
South Carolina	0.56	0.56	3.00	0.75
Georgia	0.562	0.562	N/A	N/A
Germany	0.75	0.75	2.00	N/A
Alabama	0.25	0.69	N/A	N/A
Great Britain	0.39	0.39	N/A	N/A
New York	N/A	0.16	0.25	0.26
Ohio	N/A	N/A	0.50	0.50
Pennsylvania	0.23	0.23	1.00	1.00

Pengaruh penyimpangan letak dan posisi dowel

Tabel 8 dibawah ini menunjukkan pengaruh penyimpangan letak dan posisi dowel terhadap terjadinya *spalling*, retak dan efisiensi transfer beban (LTE), yaitu;

Tabel 8. Pengaruh penyimpangan letak dan posisi dowel, Tayabji (1986)

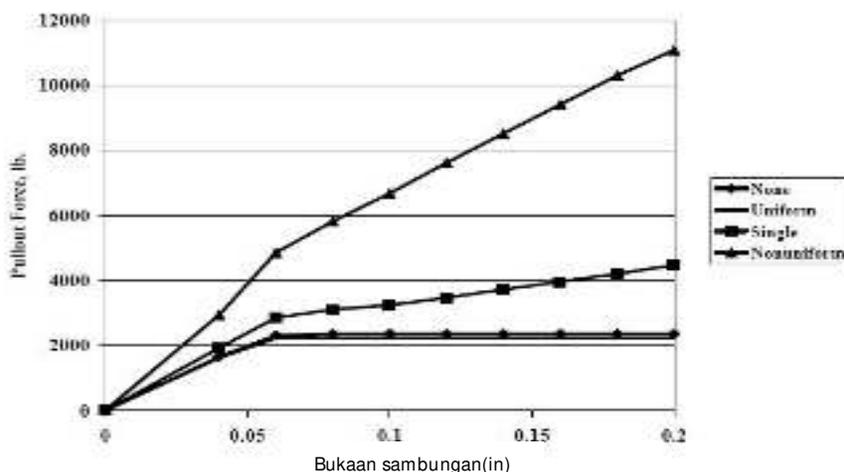
Jenis penyimpangan	Pengaruh penyimpangan		
	<i>spalling</i>	retak	LTE
Pergeseran horizontal	x	x	✓
Pergeseran longitudinal	x	x	✓
Pergeseran vertikal	✓	x	✓
Kemiringan horizontal	✓	✓	✓
Kemiringan vertikal	✓	✓	✓

Penyimpangan letak dan posisi dowel selama ini dipercaya dapat mengakibatkan berkurangnya efektifitas dan kemampuan batang dowel sebagai alat transfer beban, *spalling*, dan terkuncinya sambungan (*joint locking*) yang berpotensi menyebabkan terjadinya retak arah melintang.

Hasil kajian laboratorium yang ditunjukkan pada Gambar 20, menggambarkan hubungan antara bukaan sambungan dengan besarnya usaha untuk menarik pelat beton (*pullout force*) terhadap berbagai jenis penyimpangan dowel. Pada gambar terlihat bahwa penyimpangan dowel yang seragam pada suatu pelat beton ternyata tidak menyebabkan sambungan terkunci, karena usaha yang diperlukan untuk membuka bukaan sambungan sama dengan kondisi tidak adanya penyimpangan. Penyimpangan dowel yang tidak seragam dapat menyebabkan bukaan sambungan terkunci. Karena untuk membuka bukaan sambungan diperlukan usaha yang sangat besar.

Meskipun penyimpangan letak dan posisi dowel dipercaya dapat menyebabkan kerusakan pada perkerasan dan didukung juga oleh hasil percobaan laboratorium serta analisa *finite element*, akan tetapi hasil pengamatan dilapangan menunjukkan kenyataan yang berbeda. Kajian lapangan menunjukkan bahwa, penyimpangan letak dan posisi dowel tidak selalu menyebabkan kerusakan pada perkerasan. Hanya jenis penyimpangan pergeseran longitudinal yang sangat jelas menyebabkan

kerusakan perkerasan (*faulting*), dimana *faulting* selalu terjadi pada sambungan melintang dengan panjang batang dowel tertanam pada perkerasan kurang dari 6,4 cm.



Gambar 20. Hubungan bukaan sambungan dengan usaha yang diperlukan untuk menariknya.

Rakitan dowel (*Dowel basket*)

Sebagai salah satu upaya untuk mencegah atau mengurangi terjadinya penyimpangan letak dan posisi dowel, dapat dilakukan dengan penempatan dowel pada rakitan secara tepat.

Ketentuan yang terdapat pada rakitan dowel adalah :

- kawat pengikat rakitan dapat berbentuk U, V atau R. Bentuk J sebaiknya dihindari karena tingkat penyimpangannya sangat tinggi.
- rel rakitan dowel harus di pasak pada lapisan pondasi, untuk mencegah pergeseran. Pasak yang digunakan harus disesuaikan dengan jenis lapis pondasi.
- kawat pengikat yang berfungsi menjaga jarak dan kekakuan rakitan (*spacer wire*) harus di las pada rel rakitan.



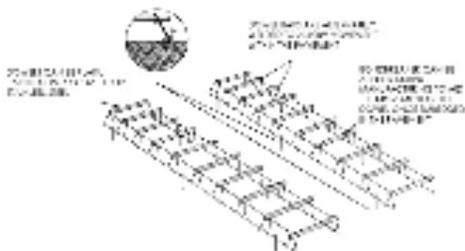
Tipe V



Tipe U



Tipe J



Gambar 21 . Tipikal kawat pengikat pada rakitan dowel

3.1.2 Sambungan Memanjang

Sambungan memanjang dibuat untuk mengendalikan retak memanjang, dan digunakan jika lebar pelat beton lebih dari 4,6 m. Untuk mempertahankan sambungan memanjang tetap menyatu, maka digunakan ruji atau batang pengikat (*tie bar*) untuk mengikat pelat beton pada sambungan memanjang. Berbeda dari dowel, ruji tidak diijinkan untuk mengalami pergerakan, dimana sambungan tidak diperbolehkan untuk membuka dan menutup. Kendaraan umumnya tidak melintas pada sambungan memanjang, kecuali pada waktu berpindah lajur (seperti yang sering terjadi pada daerah perkotaan) sehingga ruji pada kasus seperti ini juga harus mampu berperan sebagai alat transfer beban. Jika pada sambungan memanjang kemampuan geser tidak memadai, maka sambungan memanjang berpotensi terjadi *faulting*.

Sebagai kelengkapan perkerasan penyalur beban, ruji harus mempunyai ciri-ciri sebagai berikut :

- a. Mempunyai rancangan yang sederhana, mudah dipasang, dan benar-benar terbungkus beton.
- b. Mampu menyebarkan tegangan pada beton tanpa menimbulkan tegangan berlebih.
- c. Tidak menahan pergerakan pelat beton dalam arah longitudinal.
- d. Mempunyai stabilitas mekanis akibat besar dan repetisi beban roda kendaraan.
- e. Tahan karat.

Beberapa kegagalan yang biasanya terjadi pada sambungan memanjang antara lain adalah :

- bukaan sambungan memanjang yang berlebihan
- terjadinya *faulting*
- penyimpangan alinyemen

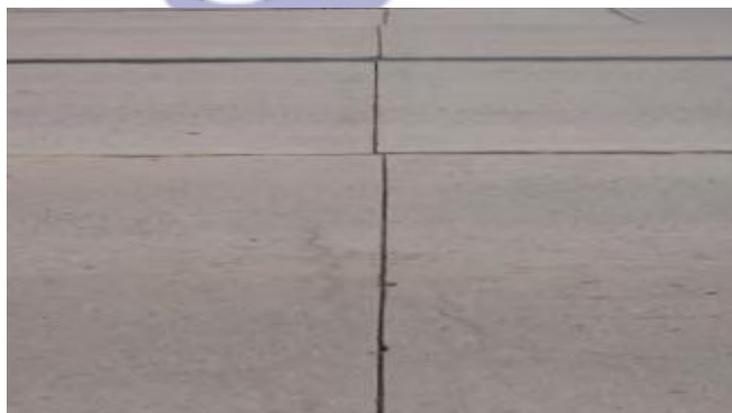
Kegagalan - kegagalan tersebut ditunjukkan pada Gambar 22 sampai Gambar 24 di bawah ini.



Gambar 22. Bukaannya sambungan yang berlebihan



Gambar 23. *Faulting* pada sambungan memanjang



Gambar 24. Penyimpangan alinyemen pada sambungan memanjang

Faktor yang paling mempengaruhi kinerja sambungan memanjang terutama adalah perencanaan yang tepat dari ruji sebagai bagian dari sambungan memanjang. Perencanaan ruji tersebut terkait dengan diameter ruji, jarak antar ruji, panjang batang tertanam, dan sifat mekanis material ruji.

Beberapa pendapat mengenai perencanaan ruji, yaitu;

- Pedoman AASHTO 1993 :

Metode AASHTO 1993 menentukan perencanaan ruji berdasarkan konsep *subgrade drag theory (SDT)*, dimana teori ini didasarkan atas tebal perkerasan, gaya gesekan antara perkerasan dengan lapisan dibawahnya (tipe lapis pondasi), berat beton dan jarak terdekat terhadap tepi bebas pelat beton. Dari faktor - faktor tersebut, tebal perkerasan beton adalah faktor yang paling menentukan dalam perencanaan ruji. Berdasarkan konsep diatas, AASHTO 1993 menyediakan grafik-grafik untuk memudahkan memperkirakan ukuran dan jarak antar ruji.

Konsep ini dapat juga dilihat dari persamaan sebagai berikut:

$$A_s = \frac{\gamma_c h L f_a}{f_s}$$

Keterangan :

A_s = luas batang penyalur beban yang diperlukan untuk satu satuan panjang pelat (mm^2/m).

γ_c = berat isi beton (N/mm^3)

h = tebal pelat (mm).

L = jarak dari sambungan memanjang ke tepi bebas (m).

f_a = koefisien gesekan antara pelat dengan lapis pondasi.

f_s = tegangan ijin bahan ruji (MPa)

$$t = \frac{f_s d}{2 \mu}$$

Keterangan :

t = panjang batang pengikat (mm).

d = diameter batang pengikat (mm).

f_s = tegangan ijin bahan *tie bar*(MPa)

μ = tegangan lekatan

Jarak antar ruji = A/A_s

Keterangan ;

A = luas penampang ruji (mm^2)

A_s = luas batang penyalur beban yang diperlukan untuk satu satuan panjang pelat (mm^2/m).

Dari metode yang disarankan AASHTO 1993 tersebut, tidak ada diperhitungkan pengaruh temperatur dan pengaruh pembebanan yang merupakan faktor penting pada sistem perkerasan beton.

Seperti telah disebutkan sebelumnya, fungsi utama ruji adalah untuk mempertahankan agar bukaan sambungan memanjang tetap pada waktu mengalami perubahan temperatur dan beban, sehingga *interlocking agregat* tetap terjaga. Akan tetapi pada kondisi tertentu dimana *interlocking agregat* tidak memadai, mungkin karena aus atau bukaan sambungan terlalu besar, maka ruji harus berperan juga sebagai alat yang mentransfer beban pada sambungan. Jika ruji tidak mempunyai kapasitas geser yang memadai (disertai pula dengan kondisi lapis pondasi yang kurang memadai) dapat mengakibatkan terjadinya *faulting* pada sambungan memanjang.

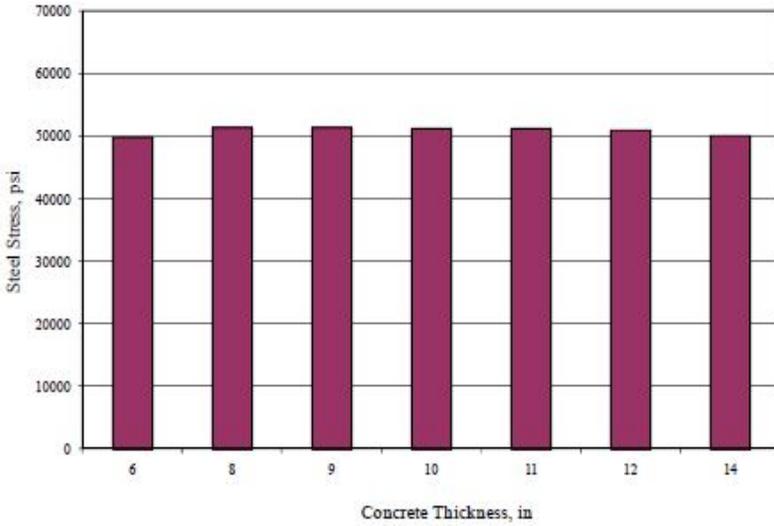
Oleh karena itu perencanaan ruji yang hanya didasarkan oleh tebal perkerasan saja tidak tepat, dan dikhawatirkan tidak mampu mengakomodir perannya sebagai penyalur beban.

▪ Konsep *Mechanistic-empirical* (M-E) :

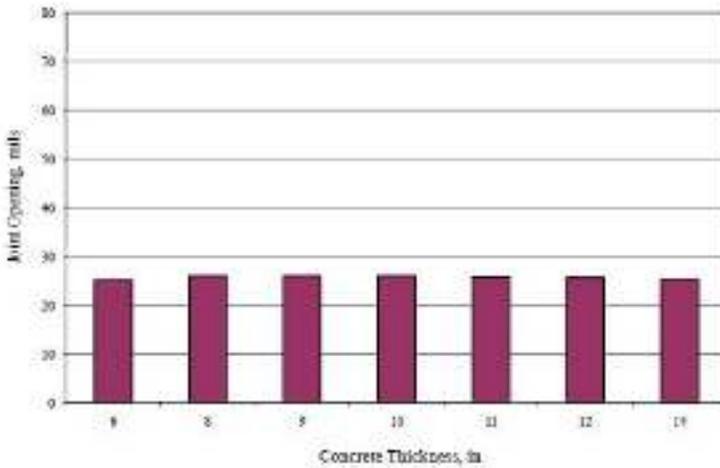
Pedoman yang menggunakan konsep Mekanistik – empiric (M-E) lebih rasional dalam menentukan prosedur perencanaan ruji pada perkerasan kaku, dengan memperhitungkan pengaruh temperatur dan juga pembebanan dalam prosedur perencanaan.

Hasil kajian dengan menggunakan konsep M-E, seperti yang dilaporkan oleh Malela dkk. (2011); bahwa tebal perkerasan ternyata tidak berpengaruh terhadap tegangan pada ruji, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

Demikian juga dengan lebar bukaan sambungan, tidak dipengaruhi oleh tebal perkerasan.



Gambar 25. Pengaruh tebal perkerasan terhadap tegangan pada ruji

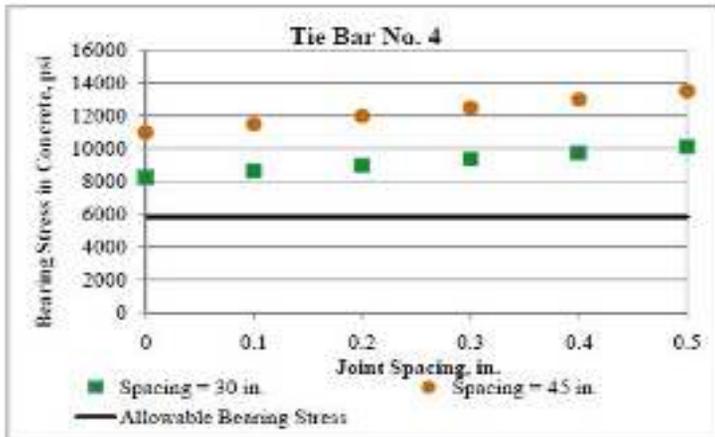


Gambar 26. Pengaruh tebal perkerasan terhadap lebar bukaan sambungan

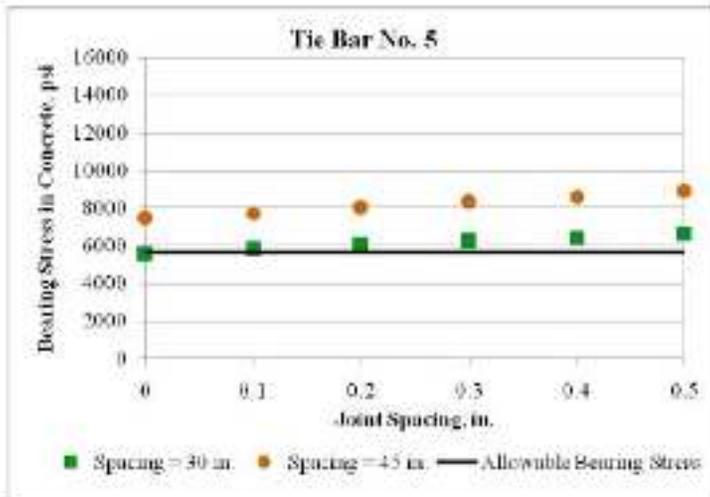
Kajian tersebut didasarkan pada persamaan *Friberg*, yang digunakan untuk menganalisa tegangan dan mengevaluasi kemampuan transfer beban ruji.

Seperti pada analisa dowel, perencanaan ruji juga dapat didasarkan pada *bearing stress* antara beton dan ruji. Dimana *actual bearing stress* antara beton dan ruji harus lebih kecil dari *bearing stress* yang diijinkan.

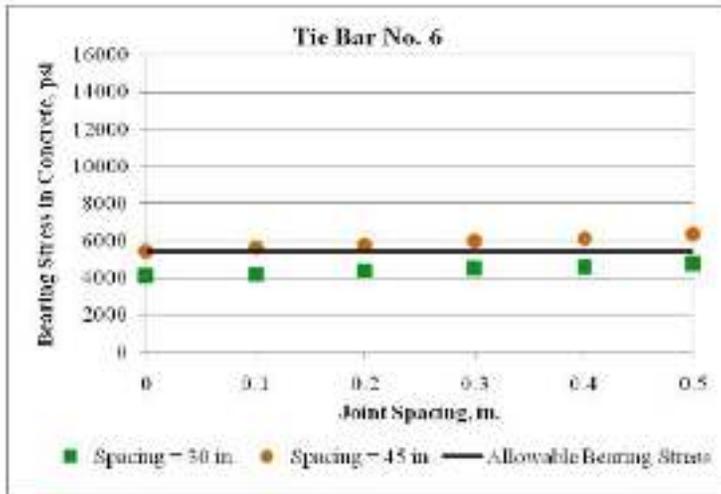
Gambar - gambar 27a - 27c dibawah ini memperlihatkan hasil simulasi yang menggunakan perhitungan dengan analisis *Friberg*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa hanya ruji No.6 (1,9 cm) yang menghasilkan *bearing stress* lebih kecil dari *bearing stress* yang diijinkan.



Gambar 27a. Hubungan *bearing stress* beton dengan jarak antar ruji



Gambar 27b. Hubungan *bearing stress* beton dengan jarak antar ruji



Gambar 27c. Hubungan *bearing stress* beton dengan jarak antar ruji

Oleh karena itu pada perkerasan kaku yang diperkirakan sambungan memanjangnya akan banyak berperan sebagai alat transfer beban, serta dilalui lalu lintas berat sangat disarankan untuk menggunakan ruji no.6 (19 mm), tentu saja setelah memperhitungkan lapisan pondasi yang digunakan.

3.2 Pembukaan Perkerasan untuk lalu lintas

3.2.1 Kriteria pembukaan perkerasan

Dibawah ini beberapa kriteria yang umumnya digunakan sebagai dasar ketentuan dibukanya perkerasan untuk lalu lintas, yaitu:

1. Waktu
2. Kekuatan
3. Kematangan (*maturity*)

1. Waktu

Sama seperti spesifikasi Binamarga, *Federal Aviation Administration* (FAA) juga menyarankan ketentuan pembukaan perkerasan kaku untuk lalu lintas jika kuat lentur beton telah mencapai 550 psi (atau jika perkerasan telah berumur 14-hari) tanpa mempertimbangkan tebal perkerasan, lapis pondasi dan jenis kendaraan yang melalui perkerasan.

Kriteria pembukaan perkerasan untuk lalu lintas yang berdasarkan waktu memiliki keterbatasan, dan kriteria ini hanyadapat digunakan untuk perkerasan yang menggunakan campuran beton yang kinerjanya sudah sangat dipahami dari pengalaman sebelumnya serta digunakan pada kondisi lingkungan yang sama.

Pada saat ini semen yang beredar di pasaran adalah semen yang dicampur (*blended cement*) dengan pozolan, dan unsur-unsur yang terdapat pada pozolan cenderung lebih lambat mencapai kekuatan rencana dibandingkan semen tanpa pozolan.

Oleh karena itu, ketentuan berdasarkan waktu tidak dianjurkan sebagai dasar untuk pembukaan perkerasan bagi lalu lintas, karena karakteristik beton berbeda untuk proyek yang berbeda dan juga kondisi lingkungan yang berbeda.

2. Kekuatan

Kekuatan dianggap sebagai kriteria yang dapat diandalkan untuk membuka perkerasan beton untuk lalu lintas, karena merupakan indikator kemampuan perkerasan untuk menahan beban lalu lintas, dan biasanya kekuatan beton dinyatakan dalam besaran kuat tekan atau kuat lentur beton. Kekuatan perkerasan di lapangan diperoleh berdasarkan benda- benda uji yang dibuat dari campuran yang sama dengan perkerasan beton dilapangan, dan diuji sesuai ketentuan SNI 03-4810-1998.

Beberapa kelemahan konsep kriteria kekuatan sebagai dasar pembukaan untuk lalu lintas :

- Perbedaan kekuatan hasil pengujian laboratorium dengan kekuatan perkerasan sebenarnya di lapangan. Hal ini harus disadari bahwa seringkali kekuatan perkerasan beton tidak sama, meskipun perencanaan campuran adalah sama. Perbedaan ini dapat terjadi karena pengembangan kekuatan beton bergantung pada banyak faktor antara lain; perawatan beton, pengangkutan ke tempat pengujian, lingkungan, dll.
- Jumlah benda uji yang dibutuhkan cukup banyak, dan membutuhkan penanganan yang tepat. Seperti benda uji balok untuk pengujian kuat tekan lentur cukup sensitif dengan adanya guncangan - guncangan selama pengangkutan.
- Tidak praktis, misalnya pengujian kekuatan perkerasan dengan kuat awal tinggi (*high early strength*) dimana pembukaan untuk lalu lintas hanya dalam

waktu beberapa jam setelah dihampar. Pengangkutan benda - benda uji ke laboratorium untuk diuji sangatlah tidak praktis, dan dapat saja selama pengangkutan mengalami kendala - kendala sehingga waktu pengujian tertunda.

Jika memungkinkan pengujian kekuatan beton dilakukan ditempat, karena memberikan indikasi yang terbaik dari kemampuan perkerasan untuk menahan beban.

Beberapa pengujian kekuatan beton di tempat yang dapat digunakan yaitu :

- *Pulse velocity method* (ASTM C 597)
- *Pull out method* (ASTM C 900)
- *Break Off method* (ASTM C 1150)

Akan tetapi pengujian - pengujian diatas belum populer digunakan di Indonesia, serta hasilnya juga ternyata belum secara langsung menggambarkan kekuatan perkerasan di tempat.

Meskipun kekuatan merupakan kriteria yang tepat untuk menentukan pembukaan perkerasan untuk lalu lintas, tetapi masih diperlukan suatu metode yang praktis serta dapat menggambarkan kekuatan perkerasan yang sebenarnya di lapangan.

3. Maturity

Metode maturity merupakan suatu alat yang sudah sangat populer di luar negeri untuk mengestimasi kekuatan beton di lapangan dengan cara yang tidak merusak. Metode ini memperhitungkan efek dari temperature beton dengan waktu, pada masa pengembangan kekuatan beton.

Pendekatan yang dilakukan metode ini relative sederhana dalam melakukan estimasi kekuatan perkerasan yaitu dengan pengukuran temperatur internal beton yang berkaitan dengan proses hidrasi dan tahap pencapaian kekuatan beton. Temperatur di dalam beton akan meningkat seiring dengan terjadinya proses hidrasi.

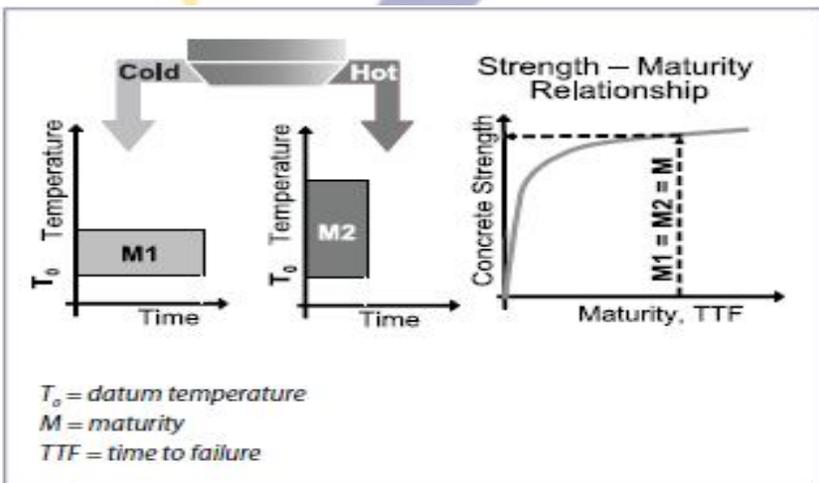
Penggunaan metode ini belum cukup dikenal di Indonesia, meskipun metode ini sudah ada standarnya yaitu Tata Cara Estimasi kekuatan Beton dengan metode *Maturity* (SNI 03-6809-2002).

Metode *maturity* ini menggambarkan korelasi kekuatan beton dengan faktor waktu - temperatur. Karena memiliki akurasi yang tinggi, maka metode ini dapat digunakan sebagai dasar pembukaan perkerasan untuk lalu lintas.

Konsep Maturity :

Menurut Nurse Saul (1951) kekuatan dari campuran beton yang telah dihampar, dipadatkan, dan dirawat adalah fungsi dari umur dan temperatur campuran (Saul 1951). Perawatan yang lebih lama dan peningkatan temperatur perawatan menyebabkan kenaikan dalam pengembangan kekuatan beton. Metode pengujian maturity menggunakan prinsip ini dalam memperkirakan kekuatan perkerasan beton di tempat. Pada pekerjaan pembangunan jalan beton, metoda ini dapat membantu para pelaksana untuk menentukan waktu yang tepat untuk penggantian sambungan, menghentikan perawatan serta membuka perkerasan untuk lalu lintas.

Metode maturity meyakini prinsip bahwa dua benda uji beton dengan kematangan yang sama akan memiliki kekuatan yang sama, meskipun masing-masing benda uji mungkin mengalami kondisi perawatan yang berbeda. Konsep ini diilustrasikan dalam Gambar 28 (Nelson 2003), yang menunjukkan bahwa benda uji yang mengalami temperatur yang lebih dingin akan mencapai kematangan dalam waktu yang lebih lama (M1), sedangkan benda uji yang mengalami temperatur yang lebih panas akan mencapai kematangan yang lebih cepat (M2). Jika $M1=M2$, maka kedua benda uji memiliki kekuatan yang sama meskipun kondisi perawatan (waktu dan temperatur) berbeda.



Gambar 28. Konsep Maturity

Kelebihan dan keterbatasan metode maturity

Kelebihan penggunaan metode *maturity*, yaitu :

- Metode *maturity* merupakan metode pengujian untuk mengetahui kekuatan beton dengan cara tidak merusak.
- Metode *maturity* menggunakan pendekatan yang sederhana serta dapat digunakan untuk memperkirakan kekuatan beton pada usia dini (umumnya kurang dari 14 hari) (Crawford 1997).
- Pada pekerjaan pembangunan jalan beton, metoda ini dapat membantu para pelaksana untuk menentukan waktu yang tepat untuk penggantian sambungan, menghentikan perawatan serta membuka perkerasan untuk lalu lintas.
- Lebih ekonomis karena jumlah benda uji yang digunakan lebih sedikit dari metode lain.

Keterbatasan metode *maturity* yaitu :

Kurva kalibrasi harus dikembangkan berdasarkan campuran beton yang spesifik. Setiap perubahan (agregat, semen, air, w/c dll) dalam desain campuran beton akan membutuhkan kurva kalibrasi baru.

- Penanganan tertentu pada umur awal beton, efek jangka panjangnya terhadap kekuatan tidak sepenuhnya dikarakterisasi (Contohnya dalam beberapa kasus, ketika beton di rawat pada temperatur yang tinggi, memang pada awal umur beton dapat mencapai kekuatan yang lebih tinggi tetapi kekuatan jangka panjang berkurang)
- Beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan beton, misalnya; pemadatan, tidak tercermin dalam pengukuran dengan metode maturity.

Proses hidrasi dari semen serta pencapaian kekuatan beton bergantung pada waktu dan temperatur.

Maturity beton dapat dihitung dengandua (2) macam persamaan yaitu:

1. Persamaan Nurse-Saul :

$$M = \Sigma(T_a - T_o) \Delta t$$

Dimana;

$$M = \text{Maturity beton pada waktu } t, \text{ } ^\circ\text{C(jam)}$$

$$T_a = \text{Temperatur beton rata-rata selama interval waktu } t \text{ (jam), } ^\circ\text{C}$$

T_0 = Temperatur datum, °C

Δt = interval waktu

2. Persamaan Arrhenius :

$$t_e = \sum \exp \left\{ -\frac{E}{R} \left[\frac{1}{273 + T_a} - \frac{1}{273 + T_r} \right] \right\} \Delta t$$

Dimana;

t_e = umur ekuivalen pada suatu suhu perawatan yang disyaratkan,

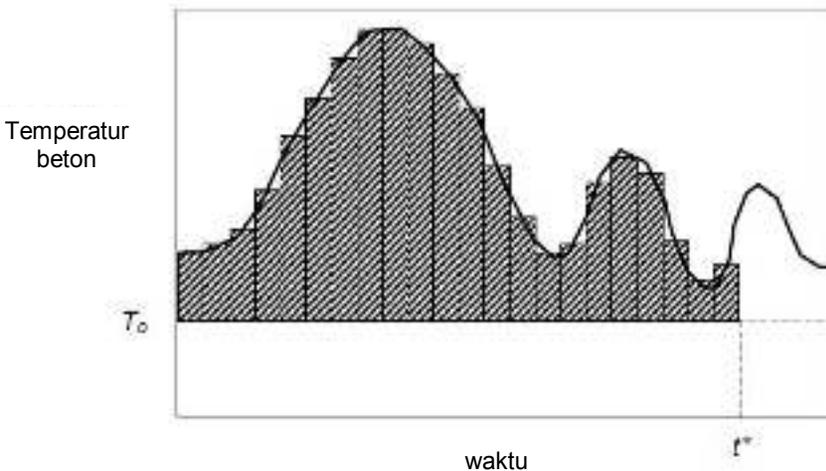
E = energy pengaktifan dibagi dengan konstanta gas, J/mol

R = konstanta gas, 8.3144 J/(mol K)

T_a = temperatur rata-rata beton selama interval waktu Δt , °C

T_r = temperatur yang disyaratkan, °C

Δt = interval waktu



Gambar 29. Grafik Maturity atau faktor temperatur – waktu beton

Dari Gambar 29 diatas yang menunjukkan hubungan temperatur dengan waktu dari suatu campuran beton, maka maturity adalah luas wilayah yang berada dibawah grafik dan diatas garis datum.

Perbedaan persamaan *Nurse Saul* dengan *Arrhenius* adalah sbb.:

Persamaan *Nurse Saul* memperhitungkan temperatur datum, yaitu temperatur dimana beton sesaat mulai bereaksi untuk mengembangkan kekuatannya serta perkiraan kecepatan semen berhidrasi secara linier. Sedangkan pada persamaan *Arhenius*, kecepatan semen berhidrasi diperhitungkan secara tidak non linier.

Menurut *Carino* (2004) persamaan *Arhenius* mempresentasikan hubungan waktu – temperatur lebih baik dibandingkan persamaan *Nurse Saul*. Meskipun demikian metode *Nurse Saul* lebih umum digunakan karena lebih sederhana dan praktis.

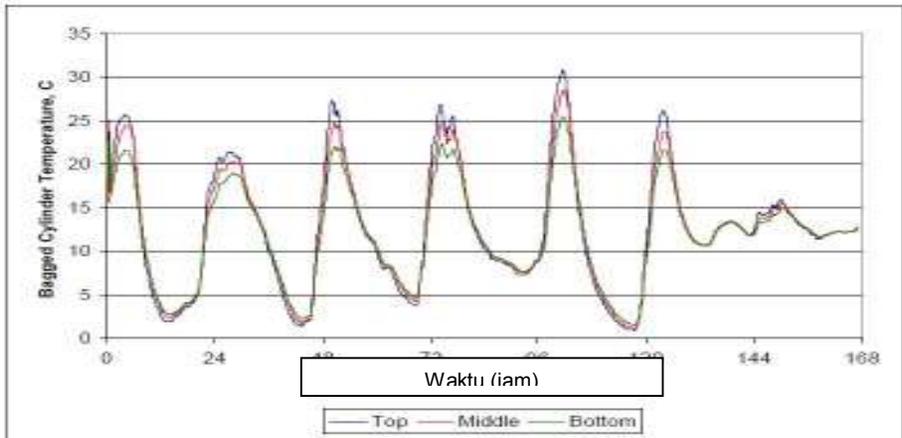
Dikarenakan konsep *maturity* hanya didasarkan pada hubungan waktu – temperatur dari beton, maka peralatan dasar yang dibutuhkan adalah alat pengukur waktu dan pengukur temperatur. Sesuai kemajuan teknologi, saat ini peralatan pengukur waktu dan temperatur telah dikembangkan dalam suatu alat yang dilengkapi dengan komputer untuk menghitung besaran *maturity*. Peralatan tersebut disebut *maturity meter*.

Langkah-langkah penggunaan metode maturity untuk pembukaan perkerasan untuk lalu lintas :

a. Pengujian di laboratorium

Pengujian di laboratorium dilakukan untuk mendapatkan kurva kalibrasi beton, yang akan digunakan sebagai pegangan dalam menetapkan *maturity* beton di lapangan

- Buat benda uji silinder atau balok dengan bahan dan desain campuran beton yang sama dengan yang akan dihampar di lapangan.
- Tempatkan sensor pengukur waktu dan temperatur di dalam benda uji, dan monitor hubungan waktu – temperatur beton
- Lakukan perawatan benda uji sesuai ketentuan yang berlaku
- Lakukan pengujian kekuatan beton umur 1, 3, 7, 14 dan 28 hari.
- Dari hubungan waktu – temperatur hitung *maturity index* dengan menggunakan persamaan *Nurse-Paul* atau *Arhenius*.
- Buat hubungan kekuatan beton dengan *maturity index* yang merupakan kurva kalibrasi beton. Kurva kalibrasi ini yang akan digunakan sebagai referensi untuk pengukuran kekuatan beton di lapangan.

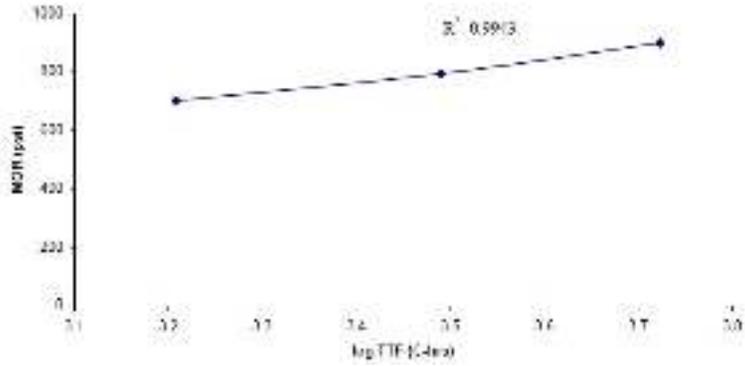


Gambar 30. Tipikal hubungan waktu - temperatur beton dari benda uji

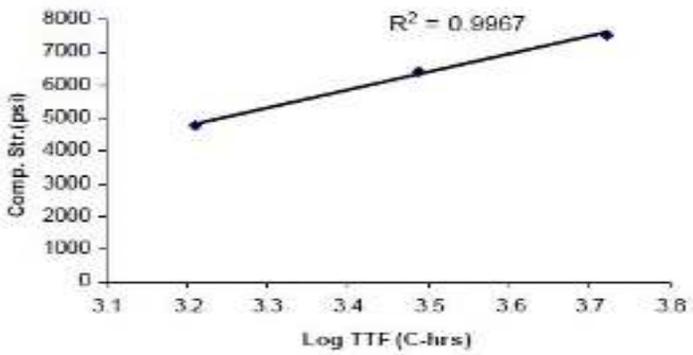
Pada Tabel 9 di bawah ini diperoleh contoh hasil dari penggunaan metode maturity dalam pengujian sampel beton di laboratorium

Tabel 9. Contoh maturity, kuat tekan, kuat lentur beton pada umur 3, 5 dan 7 hari

	waktu (menit)	waktu (jam)	TTF (°C-menit)	TTF (°C-jam)	Log TTF (°C-jam)	M OR (kuat tarik lentur) M Pa (psi)
3 hari	2920	48.66	96963	1616.0	3.20	4.8 (701)
5 hari	6400	106.66	186332	3105.5	3.49	5.5 (794)
7 hari	10300	171.66	316308	5271.8	3.72	6.2 (899)
	waktu (menit)	waktu (jam)	TTF (°C-menit)	TTF (°C-jam)	Log TTF (°C-jam)	Kuat tekan beton M pa (psi)
3 hari	2920	48.66	97214	1620.2	3.21	33.0 (4794)
5 hari	6400	106.66	185023	3083.7	3.49	44.3 (6430)
7 hari	10300	171.66	316739	5278.9	3.72	52.0 (7542)



Gambar 31. Grafik hubungan maturity – kuat tarik lentur (laboratorium)



Gambar 32. Grafik hubungan maturity – kuat tekan (laboratorium)



Gambar 33. Benda uji silinder yang telah di beri sensor di dalamnya

b. Pengujian di lapangan

Campuran beton yang dihampar harus menggunakan bahan dan desain yang sama dengan pengujian di laboratorium. Setelah campuran beton di hampar tempatkan sensor di tengah tebal pelat bagian tepi perkerasan, untuk memudahkan pemantauan.

Dalam menentukan pembukaan perkerasan untuk lalu lintas, terlebih dahulu harus ditetapkan besaran kekuatan beton yang harus dicapai perkerasan. Dari kurva kalibrasi dapat diketahui berapa *maturity index* yang harus dicapai perkerasan beton untuk kekuatan yang diinginkan.

Kemudian sewaktu-waktu lakukan pantauan melalui sensor menggunakan komputer dari alat *maturity* meter, dari alat tersebut akan ditunjukkan *maturity index* dari perkerasan beton. Dari besaran yang ditunjukkan *maturity* meter, dapat diketahui apakah perkerasan sudah mencapai *maturity index* atau kekuatan beton yang diinginkan, sehingga dapat segera diputuskan untuk membuka perkerasan untuk lalu lintas.



Gambar 34. Pemantauan maturity perkerasan beton di lapangan



Gambar 35. Alat maturity meter yang berukuran kecil

Dalam menggunakan metode *maturity* pada pembukaan perkerasan untuk lalu lintas perlu faktor keamanan, dimana faktor keamanan dapat dilakukan dalam beberapa cara, yaitu:

1. Pilih faktor *maturity* pada kekuatan beton yang lebih besar dari yang diperlukan.
2. Pada waktu membuat kurva kalibrasi di laboratorium, campuran beton dibuat dengan w/c yang sedikit lebih tinggi.
3. Penempatan alat pengukur temperatur di lapangan, diletakkan dekat ujung pelat beton.

Pertimbangan-pertimbangan dalam menetapkan besaran kekuatan beton pada waktu dibuka bagi lalu lintas :

Tipikal mengenai ketentuan pembukaan perkerasan untuk lalu lintas pada spesifikasi beberapa institusi jalan dari luar negeri dan spesifikasi Binamarga adalah : *“Perkerasan beton tidak boleh dibuka untuk lalu lintas sebelum hasil pengujian terhadap benda uji yang dicetak dan dirawat sesuai dengan SNI 03-4810-1998 mencapai kuat tekan silinder minimum atau kuat lentur minimum pada umur 28 hari masing-masing sebesar K 350 (f’c 30 MPa) dan f’s 4 MPa. Bilamana pengujian belum dilakukan perkerasan beton tidak boleh dibuka untuk lalu lintas sebelum 14 hari saat beton dihamparkan”*.

Ketentuan diatas dapat menimbulkan pengertian ganda, karena persyaratan pertama berarti perkerasan boleh dibuka untuk lalu lintas jika telah mencapai 90% kekuatan rencana. Akan tetapi persyaratan kedua dapat diartikan perkerasan juga diijinkan untuk dibuka pada saat perkerasan telah berumur 14 hari, dimana besarnya kekuatan perkerasan mungkin saja masih jauh lebih rendah dari 90 %. Terlebih lagi jika campuran beton menggunakan semen dengan bahan tambah mineral seperti *fly ash* dalam proporsi yang cukup tinggi, yang dapat menghambat pencapaian kekuatan awal beton.

- Penetapan kekuatan minimum perkerasan beton berdasarkan analisa fatik:

Analisa fatik merupakan analisa mengenai berapa jumlah repetisi beban lalu lintas yang mampu ditahan oleh perkerasan sebelum mengalami retak terhadap *stress ratio* perkerasan (tegangan yang terjadi pada perkerasan beton terhadap kekuatan beton) (PCA 1984).

Pada analisa fatik, tegangan beton yang diperhitungkan adalah yang paling kritis yaitu tegangan pada tepi perkerasan. Pada saat ini telah banyak program komputer yang mampu menghitung tegangan pada beton.

Pemilihan *stress ratio*, akan menggambarkan repetisi beban lalu lintas yang diijinkan sejak perkerasan dibuka untuk lalu lintas sebelum mengalami retak yang signifikan.

<u>Stress ratio (SR)</u>	<u>Repetisi beban lalu lintas (N)</u>
> 0,55	$\text{Log}_{10} N = (0,9718 - \text{SR}) / 0,0828$
0,45 - 0,55	$N = [4,2577 / (\text{SR} - 0,4325)]^{3,628}$
< 0,45	N = tidak terbatas

- Salah satu dampak negatif dari pembukaan perkerasan untuk lalu lintas yang terlalu awal adalah terjadinya pengembangan tegangan yang berlebihan (*bearing stress*) di bawah dowel pada sambungan melintang. Tegangan yang berlebihan ini dapat memicu terjadinya retak pada perkerasan disekitar dowel. Dan meskipun mungkin tanda-tanda retak tersebut tidak terlihat di permukaan, namun kapasitas transfer beban pada sambungan dapat berkurang dan selanjutnya akan berdampak pengurangan umur layanan perkerasan. Oleh karena itu, dalam

mempertimbangkan pembukaan perkerasan untuk lalu lintas perlu memperkirakan tegangan yang terjadi untuk memastikan tidak melebihi batas tegangan yang diijinkan.

Perhitungan *dowel bearing stress* dapat dilakukan dengan *program finite element* seperti ISLAB 2000 atau program-program lainnya, atau dengan menggunakan langkah-langkah pada analisa *Friberg* dalam memperkirakan tegangan - tegangan disekitar dowel.

Dari ketentuan diatas kekuatan beton minimum untuk pembukaan lalu lintas, bergantung pada tebal perkerasan, nilai *k* tanah dasar dan diameter dowel. Dimana semakin besar diameter dowel, maka kekuatan minimum perkerasan untuk pembukaan lalu lintas akan semakin kecil. Demikian pula dengan tebal perkerasan, semakin tebal perkerasan beton maka kekuatan minimum perkerasan untuk pembukaan lalu lintas akan semakin kecil.

Contoh hasil perhitungan kekuatan perkerasan minimum untuk pembukaan lalu lintas dengan menggunakan analisa *Friberg*, adalah seperti ditunjukkan tabel dibawah. Dimana perhitungan bergantung pada tebal perkerasan, diameter dowel dan beban lalu lintas.

Tabel 10. Contoh hasil perhitungan kekuatan perkerasan minimum untuk pembukaan lalu lintas dengan menggunakan analisa *Friberg*

t mm	Dowel Dia., mm	71 kN SAL		80 kN SAL		88 kN SAL		98 kN SAL	
		No Shoulder fc, MPa	Shoulders fc, MPa						
152	19	45.4	34.8	> 44.0	40.0	> 44.8	> 44.8	> 44.8	> 44.8
203	25	25.9	19.3	26.1	21.8	31.7	24.5	34.0	27.3
254	32	14.8	11.8	17.0	12.8	19.3	14.8	21.9	17.0
305	38	10.0	7.5	11.0	8.3	12.8	10.0	13.0	10.9

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, F. 2004. *Pengaruh penyimpangan ketebalan dan mutu pelat beton pada perkerasan beton semen (perkerasan kaku)*; Jurnal Litbang Jalan. Volume 21 No 1
- Day Ken D., 2006, *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*, Taylor and Francis.
- Delatte N., 2008, *Concrete Pavement Design, Construction and Performance*, Taylor and Francis.
- Griffiths, G. And Thom N., 2007, *Concrete Pavement Design Guidance Notes*, Taylor and Francis.
- Kementerian Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Bina Marga; 2010, *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan*
- Taylor P.C, Kosmatka S.H, Voigt G.F, et al, *Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement*, 2006, FHWA Report.
- Seong-Min Kim and B. Frank McCullough, *Reconsideration of thickness tolerance for concrete pavement*, 2002, FHWA Report.
- Olek, J., M.D. Cohen, Charles F. Scholer dan Deepak R. Mandrekar, *Use of Modulus of Rupture, Fatigue Resistance and Maturity in Determining Opening to Traffic Time for Concrete Pavements*, 2003, FHWA Report.
- Mallela J., Gotlif A., Littleton P., et al, *Evaluation of Longitudinal Tie Bar System*, 2011, CDOT Report.