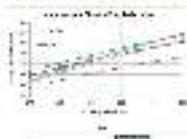


Ir. Ida Runkita, M.Sc.

TEKNOLOGI PEMELIHARAAN  
PERKERASAN KAKU



## KAJIAN SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui spesifikasi perkerasan kaku yang sesuai untuk kondisi lalu lintas dan iklim di Indonesia.

Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan penelitian di lapangan dan laboratorium. Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan penelitian di lapangan dan laboratorium. Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan penelitian di lapangan dan laboratorium.

Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan penelitian di lapangan dan laboratorium. Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan penelitian di lapangan dan laboratorium.

Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan penelitian di lapangan dan laboratorium. Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan penelitian di lapangan dan laboratorium.

TEKNOLOGI PEMELIHARAAN PERKERASAN KAKU

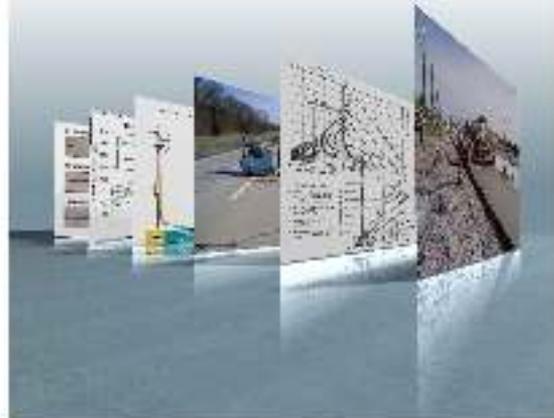
KAJIAN SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU



Ir. Ida Runkita, M.Sc.

PELAKSANAAN  
PERKERASAN KAKU

## KAJIAN SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU

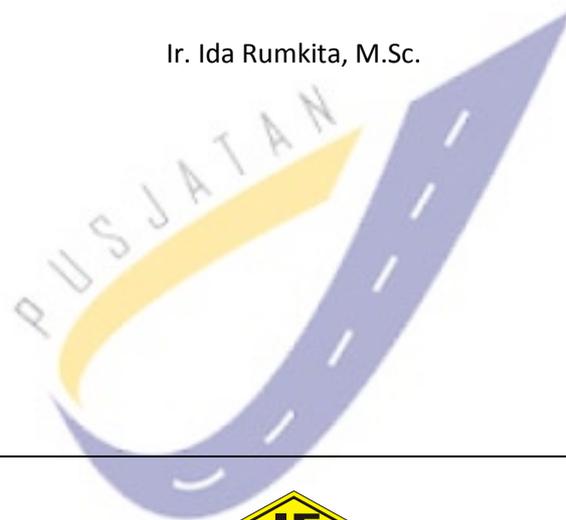




# PELAKSANAAN PERKERASAN KAKU

## KAJIAN SPESIFIKASI PERKERASAN KAKU

Ir. Ida Rumkita, M.Sc.



**INFORMATIKA**  
Bandung

**PELAKSANAAN PERKERASAN KAKU  
(Kajian Spesifikasi Perkerasan Kaku)**

(Desember 2011)

Cetakan Ke-1, Desember 2011 (xiv + 66 Halaman)

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

No. ISBN : 978-602-8758-69-7  
Kode Kegiatan : 03-PPK3-01-148-11  
Kode Publikasi : IRE-TR-050/ST/2011  
Kata Kunci : Hidrasi, Kuat Lentur, Kuat Tekan, *Workability*, *Durability*,  
*Agregat*, *Additive*, *Admixture*, *Curing*, *Joint*.

**Penulis:**

Ir. Ida Rumkita, M.Sc.

**Editor:**

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

Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc.

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2011, pada paket pekerjaan Kajian Spesifikasi Perkerasan Kaku.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun instruksi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

**Diterbitkan oleh:**

Penerbit Informatika - Bandung

**Pemesanan melalui:**

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

[info@pusjatan.pu.go.id](mailto:info@pusjatan.pu.go.id)

# TENTANG PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATAN

Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi dan nilai – nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

## KEANGGOTAAN TIM TEKNIS DAN SUBTIM TEKNIS

### TIM TEKNIS:

1. Prof (R) Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc.
2. Ir. Agus Bari Sailendra. MT
3. Ir. I. Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc.

4. Prof (R) Dr. Ir. Furqon Affandi, M.Sc.
5. Prof (R) Ir. Lanneke Tristante, APU
6. Ir. GJW Fernandez
7. Ir. Soedarmanto Darmonegoro
8. DR. Djoko Widayat, M.Sc.

**SUBTIM TEKNIS:**

1. Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc.
2. Prof (R) Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc.
3. Prof (R) Dr. Ir. Furqon Affandi, M.Sc.
4. Dr. Djoko Widayat, M.Sc.
5. Ir. Kurniadji, M.T.
6. Dr. Ir. Siegfried, M.Sc.
7. Dr. Ir. Anwar Yamin, M.Sc.



# Kata Pengantar

Naskah ilmiah Kajian Spesifikasi Perkerasan Kaku ini merupakan *output* dari kegiatan penelitian Tahun anggaran 2011 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, serta diskusi dengan pihak-pihak yang terkait dengan pengguna dan penyusun spesifikasi perkerasan kaku.

Adapun kajian dilakukan tidak terhadap seluruh aspek pada spesifikasi, tetapi hanya beberapa bagian yang terkait dengan aspek teknis saja.

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

Bandung, Desember 2011

**Penulis,**

**Ida Rumkita Sebayang**

NIP.196205141990032001



# Daftar Isi

<b>PENGANTAR .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan .....	2
1.3 Permasalahan Pokok pada Spesifikasi .....	2
1.4 Metodologi .....	3
<b>2. KAJIAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Bahan Perkerasan Beton .....	5
2.1.1 Semen dan Bahan Tambah .....	5
2.1.1.1 Semen .....	5

2.1.1.2	Bahan Tambah .....	8
2.1.2	Agregat .....	11
2.2	Campuran Beton .....	12
2.2.1	Kekuatan Beton .....	13
2.2.2	Ketahanan ( <i>Durability</i> ) .....	17
2.2.3	Kemudahan Pengerjaan ( <i>Workability</i> ) .....	18
2.3	Pelaksanaan.....	18
2.3.1	Perawatan ( <i>Curing</i> ).....	18
2.3.2	Penggergajian Sambungan .....	19
<b>3.</b>	<b>HASIL KAJIAN.....</b>	<b>21</b>
3.1	Hasil Tinjauan Spesifikasi Binamarga .....	21
3.2	Bahan .....	21
3.2.1	Agregat .....	21
3.2.1.1	Pengaruh Kemampuan Mekanis Agregat .	22
3.2.1.2	Pengaruh Bentuk Partikel Agregat .....	23
3.2.1.3	Pengaruh Penyerapan oleh Air .....	26
3.2.1.4	Ketahanan ( <i>Durability</i> ).....	29
3.2.2	Semen dan Bahan Tambah Mineral .....	31
3.2.3	Bahan Tambah Kimia .....	37
3.2.4	Membran Kedap Air/Pemecah Ikatan/ <i>Bond Breaker</i>	39
3.2.5	Bahan Penutup Sambungan .....	41
3.3	Beton.....	42
3.3.1	Bahan Pokok Campuran .....	42
3.3.2	Kekuatan.....	44
3.4	Sambungan .....	47
3.4.1	Jarak Sambungan .....	48
3.4.2	Kedalaman Lebar Penggergajian .....	48
3.4.3	Waktu Penggergajian Sambungan .....	49
3.5	Perawatan .....	54

<b>4. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>61</b>
4.1 Kesimpulan.....	61
4.2 Saran.....	62
 <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	 <b>63</b>





# Daftar Tabel

Tabel 1.	Tipe semen dan komposisi kimia .....	8
Tabel 2.	Jenis-jenis bahan tambah kimia .....	9
Tabel 3.	Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai bentuk dan ukuran benda uji.....	14
Tabel 4.	Metode Pengujian untuk mengetahui potensi ASR .....	30
Tabel 5.	Saran penggunaan kadar fly ash .....	34
Tabel 6.	Tipikal komposisi kimia PC dan Pozolan material .....	35
Tabel 7.	Pengaruh Bahan tambah mineral pada karakteristik beton Segar .....	36
Tabel 8.	Pengaruh bahan tambah mineral pada karakteristik beton Keras .....	36
Tabel 9.	Koefisien gesekan dari berbagai jenis <i>subbase</i> (ACPA,2002).....	39
Tabel 10.	Berbagai jenis bahan pemecah ikatan ( <i>bond breaker</i> ).....	41
Tabel 11.	Jenis-jenis bahan penutup sambungan pada perkerasan Beton .....	42
Tabel 12.	Kadar semen minimum dan faktor air semen minimum ...	43
Tabel 13.	Ketentuan beton minimum .....	45
Tabel 14.	Jarak sambungan berdasarkan jenis lapis pondasi .....	48
Tabel 15.	Kedalaman penggergajian pada sambungan berdasarkan jenis lapis pondasi (ACPA,2002) .....	48



# Daftar Gambar

Gambar 1.	Grafik Hubungan W/C ratio vs strength (Walker and Bloem,1962) .....	17
Gambar 2.	Tingkat raveling karena penggergajian sambungan....	19
Gambar 3.	Sawing Window (ACPA) .....	20
Gambar 4.	Hubungan kuat tekan dan kuat tarik beton .....	46
Gambar 5.	Karakteristik beton berdasarkan tingkat hidrasi (Taylor et al.,2006).....	52
Gambar 6.	Nomograph ACI 308 Tingkat Penguapan .....	56



# 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Spesifikasi jalan merupakan rambu-rambu yang harus diikuti dalam suatu tahap pembangunan jalan. Spesifikasi perkerasan beton yang ada di Indonesia adalah Spesifikasi Binamarga, Spesifikasi Jasamarga, Spesifikasi Balitbang, Spesifikasi Einrip dan Spesifikasi SRIP. Spesifikasi-spesifikasi ini meskipun latarbelakang penyusunan dan penggunaannya cukup berbeda, akan tetapi secara umum isinya hampir sama.

Spesifikasi Binamarga digunakan pada proyek-proyek pemerintah di bawah Kementerian Pekerjaan Umum, Spesifikasi Jasamarga disusun untuk proyek-proyek dalam wilayah kewenangan Jasamarga yang pada umumnya adalah jalan tol, sedangkan spesifikasi Balitbang pada awalnya disusun untuk memberikan masukan bagi spesifikasi Binamarga tetapi dalam perjalanannya spesifikasi ini berdiri sendiri. Spesifikasi Einrip (*The Eastern Indonesia National Road Improvement*), merupakan spesifikasi yang disusun untuk proyek-proyek di Kawasan Timur Indonesia yang menggunakan dana bantuan Aus-aid. Spesifikasi SRIP (*Strategic Roads Infrastructure Project*) merupakan spesifikasi yang disusun untuk proyek-proyek strategis di wilayah Indonesia, yang didanai dari pinjaman lunak (*loan*)

IBRD. Sampai saat ini spesifikasi ini telah digunakan pada proyek-proyek di wilayah Jawa dan Sumatera yang didanai dari pinjaman IBRD.

Spesifikasi perkerasan beton yang ada saat ini di Indonesia edisi terakhir disusun pada tahun 2010 oleh Binamarga. Meskipun spesifikasi yang ada tersebut baru saja mengalami revisi, ternyata masih terdapat beberapa ketentuan-ketentuan yang kurang tepat seperti; ketentuan mengenai persyaratan kekuatan beton, persyaratan bahan, ketentuan perawatan, dll. Salah satu contoh yang dapat menimbulkan permasalahan yaitu; ketentuan mengenai persyaratan minimum kekuatan beton. Pada spesifikasi tercantum untuk kuat tekan beton K 350 atau kuat tarik lentur pada umur 28 hari 4,5Mpa, yang berarti nilai kekuatan beton dapat dipilih salah satu dari nilai kuat tekan beton atau nilai kuat tarik lentur tersebut. Akan tetapi besaran dari nilai kuat tekan beton dan kuat tarik lentur yang disyaratkan tersebut tidaklah ekuivalen, karena pada umumnya nilai kuat tarik lentur 4,5 Mpa setara dengan nilai kuat tekan yang lebih besar dari K350. Sehingga jika persyaratan yang dipilih pelaksana adalah kuat tekan beton maka dapat terjadi kesalahpahaman dengan pihak direksi teknik proyek.

## 1.2 Tujuan

Naskah ilmiah ini diharapkan dapat memberikan informasi yang bermanfaat bagi para *stakeholder* spesifikasi perkerasan kaku, mengenai latarbelakang dari penetapan ketentuan-ketentuan yang terdapat pada spesifikasi.

## 1.3 Permasalahan Pokok pada Spesifikasi

Spesifikasi yang ada saat ini masih belum sempurna, dan masih ditemukan berbagai masalah pada beberapa bagian dari persyaratan bahan, peralatan, sambungan, pelaksanaan, panjang percobaan, perlindungan terhadap

perkerasan, pembukaan terhadap lalu lintas, dan toleransi ketebalan perkerasan,

Pada naskah ilmiah ini, permasalahan yang dikaji adalah ketentuan untuk beton tanpa tulangan, yaitu:

- Bagaimana persyaratan agregat halus dan agregat kasar untuk perkerasan kaku
- Bahan apa yang tepat digunakan sebagai pemecah ikatan antara pelat beton dengan lapis pondasi
- Bagaimana penggunaan bahan tambah pada campuran beton
- Bagaimana persyaratan bahan pengisi celah sambungan perkerasan beton
- Bagaimana bahan dan metode pelaksanaan perawatan perkerasan beton
- Bagaimana ketentuan mengenai kekuatan minimum perkerasan beton

## 1.4 Metodologi

Kajian ini dilakukan dengan menggunakan metode deskriptif, tahapan kegiatan pengkajian yang dilakukan adalah:

- a. Melakukan bahasan terhadap hasil kajian pustaka dan spesifikasi-spesifikasi perkerasan beton semen yang ada di Indonesia.
- b. Melakukan diskusi dengan berbagai instansi yang terkait penyusunan spesifikasi.
- c. Melakukan diskusi dengan pihak perencana dan pelaksana
- d. Pengamatan lapangan terhadap aspek-aspek spesifikasi yang diterapkan dalam pelaksanaan.
- e. Melakukan analisis dan evaluasi dari hasil telaahan kajian pustaka, pengamatan lapangan, masukan dari narasumber.



# 2

## KAJI AN PUSTAKA

Pada naskah ilmiah ini yang akan ditinjau adalah spesifikasi teknis, dimana yang dikaji adalah ketentuan mengenai bahan; agregat kasar, agregat halus, bahan tambah, membran kedap air, bahan penutup sambungan, bahan pokok campuran, persyaratan kekuatan beton dan pelaksanaan perkerasan beton semen.

### 2.1 Bahan Perkerasan Beton

Beton pada umumnya terbentuk dari semen, air dan agregat, akan tetapi saat ini telah banyak digunakan bahan-bahan tambah yang dimaksudkan untuk menaikkan kinerja beton.

#### 2.1.1 Semen dan Bahan Tambah

##### 2.1.1.1 Semen

Semen Portland adalah material halus yang bahan dasar pembentuknya terdiri dari kapur, silika, alumina, besi dan gypsum. Semen merupakan bahan pengikat hidrolis, karena jika ditambahkan air akan terjadi reaksi kimia

antara unsur-unsur yang terdapat pada semen dengan air. Reaksi-reaksi ini menghasilkan bermacam-macam senyawa kimia yang menyebabkan ikatan dan pengerasan, proses ini disebut proses hidrasi. Pada waktu proses hidrasi berlangsung sejumlah panas dilepaskan. Adapun jumlah panas yang dihasilkan tergantung pada jenis semen yang digunakan dan kehalusan butir semen.

Semen portland ini merupakan bahan yang dihasilkan dengan jalan menghaluskan terak yang mengandung senyawa-senyawa kalsium silikat dan biasanya juga mengandung satu atau lebih senyawa-senyawa kalsium sulphat yang ditambahkan pada penggilingan akhir.

Meskipun proporsi semen dalam beton hanya sekitar 10%, tetapi karena fungsinya sebagai pengikat semua unsur dalam beton maka peranan semen menjadi sangat penting. Semen yang digunakan untuk pekerjaan beton harus disesuaikan dengan rencana kekuatan dan spesifikasi teknik.

Secara garis besar semen Portland terbentuk oleh empat senyawa kimia utama, yaitu Trikalsium silikat ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) yang biasa dikenal sebagai  $\text{C}_3\text{S}$ , Dikalsium Silikat ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) yang biasa dikenal sebagai  $\text{C}_2\text{S}$ , Trikalsium Aluminat ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) yang dikenal sebagai  $\text{C}_3\text{A}$  dan Tetrakalsium Aluminoforit ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) yang dikenal sebagai  $\text{C}_4\text{AF}$ .

$\text{C}_3\text{S}$  bersifat mengeras dalam waktu beberapa jam, dengan melepaskan sejumlah panas.

$\text{C}_2\text{S}$  melepaskan panas secara perlahan, dan senyawa ini mempunyai pengaruh terhadap peningkatan kekuatan pada umur 14 sampai 28 hari. Semen yang mengandung  $\text{C}_2\text{S}$  dalam jumlah banyak akan mempunyai ketahanan terhadap agresi kimia yang relatif tinggi dengan penyusutan kering relatif rendah

C<sub>3</sub>A mengalami proses hidrasi sangat cepat dengan disertai pelepasan panas yang menyebabkan pengerasan awal, sehingga dapat merugikan terhadap kekuatan dan ketahanan terhadap agresi kimia terutama sulfat. Dan mempunyai kecenderungan akan terjadi retak-retak yang disebabkan perubahan volume.

Sedangkan senyawa C<sub>4</sub>AF kurang mempunyai pengaruh terhadap kekuatan dan sifat-sifat semen lainnya.

Tingkat panas hidrasi yang dihasilkan oleh senyawa kimia diatas secara berurutan adalah : C<sub>3</sub>A > C<sub>3</sub>S > C<sub>4</sub>AF > C<sub>2</sub>S

Tipe-tipe semen portland:

- a. Tipe I (*Ordinary Portland Cement*)  
Semen Portland tipe ini adalah semen yang paling umum digunakan untuk segala macam konstruksi apabila tidak diperlukan sifat-sifat khusus.
- b. Tipe II (*Moderate Heat Portland Cement*)  
Semen ini digunakan untuk bahan konstruksi yang memerlukan sifat khusus tahan terhadap sulfat dan panas hidrasi yang sedang, biasanya digunakan untuk daerah pelabuhan dan bangunan sekitar pantai.
- c. Tipe III (*High Early Strength Portland Cement*)  
Semen ini merupakan semen yang digunakan biasanya dalam keadaan-keadaan darurat dan musim dingin. Digunakan juga pada pembuatan beton tekan.
- d. Tipe IV (*Low Heat Portland Cement*)  
Semen tipe ini digunakan pada bangunan dengan tingkat panas hidrasi yang rendah misalnya pada bangunan beton yang besar dan tebal.
- e. Tipe V (*Super Sulphated Cement*) Semen yang sangat tahan terhadap pengaruh sulphat misalnya pada tempat pengeboran lepas pantai, pelabuhan, dan terowongan.

Tabel1 di bawah ini menunjukkan tipe semen dan komposisi senyawa kimia yang terkandung di dalamnya.

**Tabel 1. Tipe semen dan komposisi kimia**

Tipe Semen	Komposisi kimia (%)						
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	CaO	MgO
Tipe I	49	25	12	8	2,9	0,8	2,4
Tipe II	46	29	6	12	2,8	0,6	3
Tipe III	56	15	12	8	3,9	1,4	2,6
Tipe IV	30	46	5	13	2,9	0,3	2,7
Tipe V	43	36	4	12	2,7	0,4	1,6

### 2.1.1.2 Bahan Tambah

Bahan tambah digunakan untuk meningkatkan kinerja beton segar dan beton keras.

Pada tahap beton segar, sifat yang diinginkan dengan penggunaan bahan tambah antara lain:

- Menambah sifat kemudahan pekerjaan
- Mengurangi segregasi
- Mengurangi kehilangan konsistensi adukan
- Menghambat atau mempercepat waktu pengikatan awal

Sedangkan sifat-sifat beton keras yang diinginkan dengan penggunaan bahan tambah antara lain:

- Menambah kekuatan beton
- Menghambat atau mengurangi panas hidrasi
- Mempercepat laju pencapaian kekuatan beton
- Mengurangi permeabilitas beton
- Menambah sifat ketahanan beton terhadap serangan sulfat ,reaksi *silica* alkali dll.
- Mencegah korosi yang terjadi pada baja,dll

Bahan tambah yang biasa digunakan dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu bahan tambah kimia (*admixture*) dan bahan tambah mineral (*additive*).

- **Bahan Tambahan Kimia**

Bahan tambah kimia (*admixture*) digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat beton, akan tetapi bukan sebagai bahan pengganti, Taylor P.C et.al (2008). Ada beberapa tipe bahan tambah kimia seperti ditunjukkan pada tabel 2, yaitu:

**Tabel 2. Jenis-Jenis Bahan Tambah Kimia**

Jenis	Fungsi
<i>Water reducing admixture</i>	Mengurangi kadar air, dengan tetap mempertahankan slump yang diinginkan
<i>Retarder</i>	Memperlambat waktu pengikatan
<i>Accelerator</i>	Mempercepat waktu pengikatan

- **Bahan Tambah Mineral**

Bahan tambah mineral dapat digunakan sebagai substitusi bahan (*additive*) semen, karena semen merupakan bahan beton yang paling mahal. Bahan tambah mineral yang paling banyak digunakan adalah *fly ash, slag, silica fume dan rice husk*. Adapun bahan tambah mineral yang paling sering digunakan pada beton untuk perkerasan kaku adalah : *fly ash*(abu terbang) dan *slag*. Hal ini selain karena ketersediaan bahan-bahan ini cukup melimpah sehingga harganya jauh lebih murah dari semen, juga penambahan bahan ini pada campuran beton dapat memperbaiki karakteristik beton. Penggunaan bahan tambah mineral dalam beton berpengaruh terhadap kinerja beton baik pada waktu masih dalam tahap plastis (beton segar) maupun setelah beton mengeras.

Penjelasan di bawah ini menunjukkan bagaimana bahan tambah mineral (pozolan) dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen :

**Air + semen = Calcium silicate hydrate (C-S-H) + calcium hydroxide (CH)**

**Calcium hydroxide (CH)+pozolan + air = Calcium silicate hydrate (C-S-H)**

**Catatan:**

C-S-H (*Calcium silicate hydrate*) dan C-H (*calcium hydroxide*) adalah senyawa hasil hidrasi yang memberikan kontribusi utama sehingga pasta semen berbentuk padat, impermeable dan mempunyai kekuatan.

**Fly ash**

Fly ash merupakan bahan pozolan yaitu bahan yang mengandung silika dan alumina, dan bahan ini memiliki sifat mengikat seperti semen baik secara sendiri ataupun dengan penambahan unsur kimia lainnya.

ASTM C618-89 mengelompokkan fly ash pada 3 kategori yaitu;

Klas N : merupakan pozolan alami, seperti abu gunung merapi, clay, opaline cherts, laterit, dll.

Klas F : merupakan bahan sisa hasil pembakaran batubara

Klas C : bahan sisa hasil pembakaran batubara yang masih muda

Fly ash klas N tidak umum digunakan sebagai bahan tambah pada perkerasan beton, karena bentuk partikelnya yang bulat dan sangat berpori.

Fly ash yang umum digunakan adalah klas C dan klas F. Fly ash klas C umumnya mengandung kadar calcium tinggi (18 – 30 %), dan sebagian dari fly ash ini bersifat hidrolis, sehingga mempunyai sifat mengikat sendiri. Sedangkan klas F merupakan pozzolan dengan kadar calcium rendah (kurang dari 10%).

Penambahan fly ash pada campuran beton dapat berfungsi antara lain:

- Menurunkan panas hidrasi
- Memperlambat waktu pengikatan
- Mengurangi porositas
- Meningkatkan ketahanan terhadap klorida
- Meningkatkan ketahanan terhadap reaksi alkali silika dan sulfat
- Meningkatkan *workability*

*Fly ash* klas F dapat menggantikan semen 15 – 25%, sedangkan *fly ash* klas C bahkan 15 – 40% untuk klas C. Kadar *fly ash* yang ditambahkan pada campuran beton haruslah berdasarkan dampak yang ingin dicapai pada beton, bukan karena pertimbangan ekonomi semata (Helmuth 1987, ACI 232 2003).

### **Slag**

Slag merupakan bahan hasil sisa pembakaran bijih besi, dan mempunyai fungsi yang hampir sama dengan *fly ash* klas C. Slag dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen sampai 35%.

Pada waktu proses pembuatan *slag*, jika tidak segera didinginkan akan berbentuk butiran dan tidak dapat digunakan sebagai bahan tambah, tetapi dapat dimanfaatkan sebagai *agregat* kasar, Taylor et al.(2006).

#### ▪ **Bahan Tambah *Polymer***

Meski belum terlalu populer, bahan tambah *polymer* saat ini mulai digunakan untuk mendapatkan sifat-sifat beton tertentu yang diinginkan, yaitu:

- *latex*
- resin cair
- serbuk *polymer*

### **2.1.2 Agregat**

Menurut Mindess et al (2003) agregat merupakan bahan pembentuk volume beton terbesar sekitar 70–80%, sehingga karakteristik agregat memberikan pengaruh yang sangat penting bagi beton. Agregat yang digunakan harus bersih, keras, kuat, bebas dari bahan kimia, bersih dari lempung dan material-material halus yang dapat menghalangi ikatan agregat dengan pasta semen.

**Persyaratan Agregat :**

- Gradasi
- Bentuk partikel
- *Textur* agregat
- Penyerapan air
- *Coefficient of Thermal Expansion* (CTE)
- Durabilitas
  - Reaksi Alkali silika
  - Ketahanan terhadap Sulfat
  - Ketahanan Abrasi

## 2.2 Campuran Beton

Untuk mendapatkan kualitas beton selalu terkait dengan ketahanan (*durability*), kekuatan dan kemudahan pengerjaan (*workability*), dan ketiga aspek ini harus dipenuhi secara optimal. Campuran beton direncanakan berdasarkan sifat-sifat beton setelah mengeras yang ingin dicapai.

Beton merupakan campuran 2 komponen, yaitu agregat dan pasta semen. Dimana bahan yang berbentuk pasta terdiri dari bahan semen, air dan udara.

Kualitas beton sangat dipengaruhi oleh agregat, pasta dan ikatan antar kedua bahan tersebut. Kualitas dari pasta sendiri sangat dipengaruhi oleh air yang digunakan, dimana semakin sedikit air yang digunakan semakin baik kualitas beton. Perbandingan kadar air dengan semen biasa dikenal dengan istilah *water-cement ratio* (w/c), dimana batasan maksimum w/c antara lain dimaksudkan untuk menjaga kelebihan air dan menjamin tercapainya kualitas pasta yang baik.

## 2.2.1 Kekuatan Beton

Kekuatan beton merupakan salah satu unsur utama yang menggambarkan ukuran kualitas beton keras. Besarnya kekuatan beton akan meningkat seiring dengan penambahan waktu, akan tetapi kekuatan perkerasan beton sulit diukur di tempat (in situ) dengan metoda pengujian yang ada saat ini. Meskipun demikian beberapa metoda pengujian di laboratorium dapat digunakan untuk mengukur kekuatan beton.

Kekuatan beton ditentukan dengan cara menghitung beban maksimum yang dapat dipikul oleh benda uji, di mana benda uji yang dapat digunakan tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran.

Untuk mengukur kekuatan beton dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu:

- Kuat tekan beton
- Kuat tarik lentur
- Kuat tarik belah

- **Kuat tekan beton (*Compressive strength*)**

Kuat tekan beton dapat diukur dengan menggunakan benda uji silinder atau benda uji kubus. Benda uji silinder berukuran diameter 150 mm dan panjang 300 mm, dan benda uji dapat dibuat di laboratorium atau diambil dari lapangan dengan melakukan pengeboran pada perkerasan.

Benda uji kubus dapat berukuran 100mm x 100mm x 100mm atau 150mm x 150mm x 150mm.

Pada umumnya kuat tekan beton yang menggunakan benda uji kubus lebih besar daripada yang menggunakan silinder, yaitu kuat tekan benda uji silinder berkisar 80% dari benda uji berbentuk kubus.

Oleh karena terdapat benda uji dan ukurannya juga berbeda, maka dapat digunakan nilai-nilai kekuatan beton seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3. Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai bentuk dan ukuran benda uji**

Bentuk dan ukuran benda Uji (mm)	Perbandingan nilai kuat tekan
Kubus 150 x 150 x 150	1,00
Kubus 100 x 100 x 100	1,07
Kubus 200 x 200 x 200	0,95
Silinder dia.150, tinggi 300	0,83

Kekuatan tekan beton dapat diketahui dari nilai tegangan maksimum yang mampu dipikul oleh benda uji, yaitu:

$$f_c = P/A$$

di mana:

$f_c$  = kuat tekan

P = beban aksial tekan

A = luas penampang benda uji

▪ **Kuat tarik lentur beton (*Flexural strength*)**

Pengujian kuat lentur beton (*flexural beam test*) merupakan metoda yang sering digunakan untuk mengevaluasi *tensile strength* pada perencanaan perkerasan beton. Menurut Griffiths and Thorn (2007) metode ini merupakan pengujian yang paling diterima untuk menentukan kapasitas tegangan tarik dari material perkerasan beton. Pengujian kuat tarik lentur beton harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

- Tebal *beam* (d) sama dengan lebar *beam* (b)
- Panjang *beam* berkisar antara 4 - 5 kali tebalnya.
- Ukuran *agregat* maksimum  $\frac{1}{3}$  tebal (d) atau (b).
- Benda uji dalam keadaan basah
- Benda uji dapat dibuat di laboratorium atau diambil dari lapangan.

$$f_{t,fl} = \frac{FL}{bd^2}$$

di mana:

$$f_{t,fl} = \text{flexural strength}$$

L = jarak antara kaki pendukung beam

d = tebal beam

b = lebar beam

❖ **Hubungan Kuat tekan dengan Kuat tarik lentur:**

Sampai saat ini telah banyak sekali dilakukan penelitian mengenai hubungan kuat tekan beton dengan kuat tarik beton, dan hubungan dari dua jenis kekuatan tersebut telah dinyatakan dalam berbagai formula, yang antara lain:

1. Persamaan menurut ACI-89 :

$$f_r = 7,5 \sqrt{f_c}$$

Di mana:

$f_r$  = *flexural strength* (kuat lentur) =  $S_c$ , dalam psi

$f_c$  = kuat tekan beton (benda uji silinder) umur 28 hari =  $S_c$ , dalam psi

2. Persamaan menurut SNI 1991 :

$$f_r = K \sqrt{f_c}$$

Di mana:

$f_r$  = *flexural strength* (kuat lentur), dalam MPa

$f_c$  = kuat tekan beton (benda uji silinder) umur 28 hari, dalam MPa

K = 0,7 untuk agregat tidak pecah

= 0,75 untuk agregat pecah

3. Persamaan umum menurut TRRL,1987

$$f_{t,fl} = 0,393 f_{c,cube}^{0.66}$$

Di mana:

$f_{t,fl}$  = *flexural strength* (kuat lentur), dalam MPa

$f_{c,cube}$  = kuat tekan beton (benda uji kubus) umur 28 hari, dalam MPa

4. *Persamaan menurut Croney, D. dan Croney, P. The Design and Performance of Road Pavements.*

$f_{t,fl}$  =  $0,49 f_{c,cube}^{0.55}$  (untuk gravel)

$f_{t,fl}$  =  $0,36 f_{c,cube}^{0.70}$  (untuk batuan pecah)

$f_{t,fl}$  = flexural strength (kuat lentur), dalam MPa

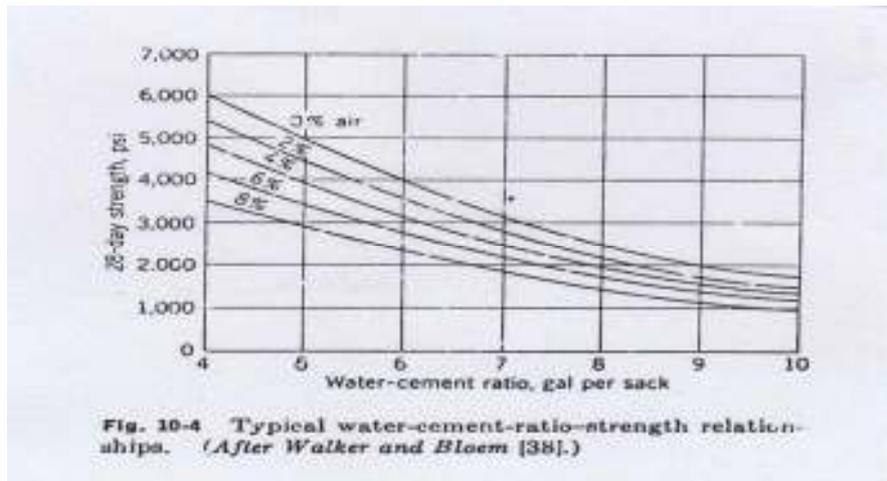
$f_{c,cube}$  = kuat tekan beton (benda uji kubus) umur 28 hari, dalam MPa

#### **Faktor air semen (*Water- cement ratio*)**

Kerbs and Walker (1971) menyatakan bahwa *water-cement ratio* merupakan aspek yang paling penting dalam memberikan pengaruh terhadap kekuatan beton. Grafik 1. menggambarkan hubungan *water-cement ratio* terhadap kekuatan beton umur 28 hari. Grafik ini menggambarkan jika w/c semakin besar maka kekuatan beton semakin rendah. Pada grafik ini juga terlihat pengaruh kadar udara dalam campuran, dimana semakin rendah kandungan udara dalam beton, maka semakin tinggi kekuatan beton.

Tetapi harus juga diketahui bahwa nilai w/c yang semakin rendah tidak selalu berarti bahwa kekuatan beton semakin tinggi. Nilai w/c yang terlalu rendah akan membuat adukan beton sulit dipadatkan sehingga kepadatannya tidak maksimal, yang pada akhirnya akan menghasilkan beton yang kekuatannya kurang.

Pada umumnya nilai w/c yang digunakan untuk beton adalah 0,40 – 0,65. Sedangkan pada beton mutu tinggi nilai w/c biasanya lebih rendah dari nilai tersebut di atas.



Gambar 1. Grafik Hubungan W/C ratio vs strength (Walker and Bloem,1962)

## 2.2.2 Ketahanan (*Durability*)

Ukuran kualitas beton yang penting lainnya adalah ketahanan (*durability*) beton. *Durability* merupakan kemampuan beton untuk tetap bertahan dalam kondisi lingkungan yang korosif, perbedaan temperatur, serangan sulfat, air laut, kimia dan pengaruh abrasi akibat lalu lintas selama umur layannya. *Durability* merupakan faktor yang sangat penting untuk diperhatikan, bahkan dianggap lebih penting daripada factor kekuatan (Delatte N., 2008).

Untuk mendapatkan beton dengan durabilitas yang tinggi, dapat dilakukan dengan:

- Beton harus kedap air
- Mencapai kekuatan minimum yang ditentukan
- Menggunakan kadar semen minimum yang ditetapkan
- Menggunakan tipe semen yang tepat
- Menggunakan bahan tambah yang diperlukan
- Mendapatkan perawatan yang memadai

## 2.2.3 Kemudahan Pengerjaan (*Workability*)

*Workability* merupakan kemudahan beton segar pada waktu diangkut, dihampar dan dipadatkan tanpa mengalami segregasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi *workability* adalah:

- kadar air,
- kadar semen,
- penggunaan bahan tambah,
- ukuran dan bentuk agregat,
- umur beton segar.

*Workability* biasanya diukur dari *slump test*, akan tetapi metode pengujian yang sederhana ini belum menjamin *workability* yang memuaskan. *Slump* beton adalah besaran kekentalan (*viscosity*)/plastisitas dan kohesif dari beton segar. Nilai *slump* digunakan sebagai petunjuk ketepatan jumlah pemakaian air dalam hubungannya dengan faktor air semen (*fas*) yang ingin dicapai.

## 2.3 Pelaksanaan

### 2.3.1 Perawatan (*Curing*)

Karena perkerasan beton terhampar di tempat terbuka menyebabkan lapisan permukaan perkerasan mengalami proses penguapan yang cepat, sedangkan proses hidrasi merupakan proses kimia yang lambat. Jika permukaan tidak segera dilindungi setelah penghamparan dan proses peneksturan, maka pada temperatur yang tinggi dan berangin dapat terjadi beton mengalami pengeringan awal sehingga proses hidrasi berhenti. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya kerusakan dini, sehingga tidak tercapainya kekuatan dan *durability* beton yang diinginkan, Taylor P.C et al (2006).

Jenis perawatan (*curing*) yang umum digunakan berbentuk cairan yang disemprotkan ke permukaan dan membentuk selaput (*membrane*).

Jenis perawatan lain yang dapat digunakan menurut AASHTO T 155 dan ASTM C 156 adalah lembaran plastik dan kertas kedap air.

### 2.3.2 Penggergajian Sambungan

Sambungan diperlukan untuk mengendalikan retak pada sambungan pada perkerasan beton.

Waktu penggergajian yang tepat merupakan faktor yang sangat penting, karena jika penggergajian dilakukan terlalu awal dapat menyebabkan *raveling*, sedangkan jika terlambat dapat menimbulkan retak yang tidak terkendali (Taylor et al.,2006). Gambar 2. di bawah ini menunjukkan jika penggergajian dilakukan terlalu awal.

**a) No raveling—sawed later in the window**



**b) Moderate raveling—sawed early in the window**

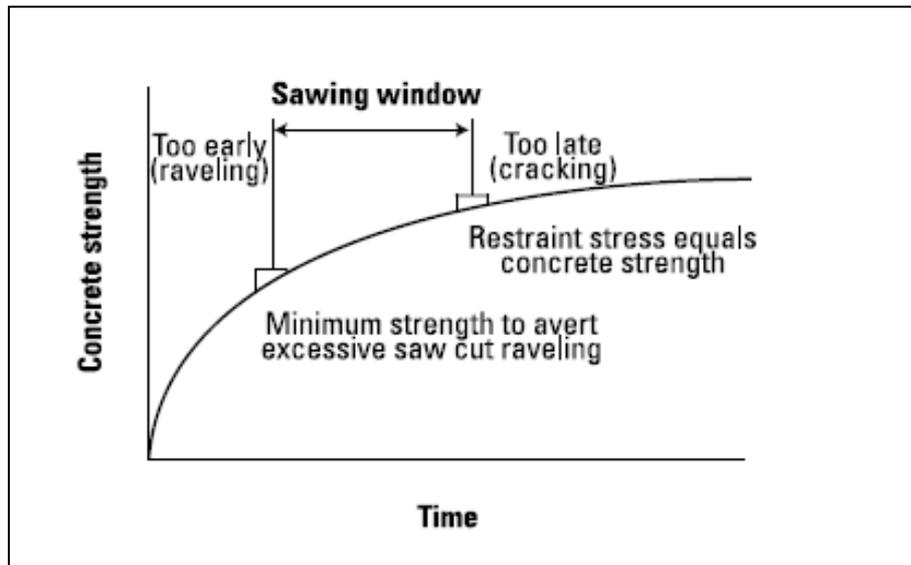


**c) Unacceptable raveling—sawed too early**



Gambar 2. Tingkat *raveling* karena penggergajian sambungan

Menurut Okamoto et al.(1994) untuk melakukan penggergajian sambungan pada perkerasan yang baru haruslah pada waktu yang tepat, yaitu dalam koridor penggergajian (*sawing window*) seperti ditunjukkan oleh grafik 3. di bawah ini.



Gambar 3. *Sawing Window* (ACPA)

# 3

## HASIL KAJIAN

### 3.1 Hasil Tinjauan Spesifikasi Binamarga

Dari tinjauan terhadap spesifikasi Binamarga ditemukan beberapa ketentuan-ketentuan yang masih dianggap kurang tepat, dan yang selanjutnya menjadi bahan yang dikaji pada studi ini yaitu;

- Persyaratan agregat halus dan agregat kasar untuk perkerasan kaku
- Persyaratan maksimum penggunaan abu terbang dalam campuran
- Bahan pemecah ikatan antara pelat beton dengan lapis pondasi
- Penggunaan bahan tambah pada campuran beton
- Persyaratan bahan pengisi celah sambungan perkerasan beton
- Bahan dan metode pelaksanaan perawatan perkerasan beton
- Ketentuan mengenai kekuatan minimum perkerasan beton

### 3.2 Bahan

#### 3.2.1 Agregat

Karakteristik dari agregat halus dan kasar dapat mempengaruhi sifat beton baik dalam keadaan plastis maupun setelah mengeras.

### 3.2.1.1 Pengaruh Kemampuan Mekanis Agregat

Kemampuan mekanis agregat pada spesifikasi Binamarga ditentukan dari ketahanan abrasinya berdasarkan pengujian dengan alat Los Angeles. *Spesifikasi Binamarga tahun 2006 menetapkan kehilangan akibat abrasi agregat untuk perkerasan beton maksimal 40%, dan setelah direvisi pada tahun 2010 ditetapkan menjadi 25%.*

Kemampuan mekanis agregat ditunjukkan dari ketahanan perkerasan dalam menahan gesekan akibat beban lalu lintas, dan agregat yang lebih berperan terhadap kemampuan ketahanan gesekan perkerasan adalah agregat halus. Jika digunakan agregat halus yang tidak mempunyai ketahanan yang baik, maka permukaan perkerasan akan cepat tergilas dan ketahanan gesek perkerasan menurun.

Adapun agregat kasar lebih berperan pada *interlocking* agregat, baik pada sambungan maupun pada tempat di mana terjadi retakan.

Hasil-hasil penelitian mengemukakan untuk agregat dengan nilai kehilangan abrasi dengan pengujian Los Angeles antara 18 – 39 % ternyata tidak menunjukkan adanya korelasi antara ketahanan abrasi beton dengan ketahanan abrasi agregat. Akan tetapi untuk agregat yang lunak (nilai kehilangan abrasi > 40%) seperti *limestone* dilaporkan adanya korelasi yang cukup baik antara kehilangan abrasi agregat dengan beton, yaitu ketahanan abrasi beton menurun dengan penggunaan agregat tersebut.

Oleh karena itu, spesifikasi-spesifikasi di luar negeri menetapkan syarat yang cukup longgar untuk nilai kehilangan akibat abrasi agregat seperti ditunjukkan oleh spesifikasi di Inggris kehilangan akibat abrasi agregat untuk pelat beton sebesar 35%. dan 40% untuk lapis pondasi beton dan *lean concrete*. Sedangkan spesifikasi perkerasan beton di Wisconsin bahkan menetapkan kehilangan akibat abrasi agregat maksimal 50%.

Besarnya ketentuan nilai kehilangan abrasi agregat yang dipersyaratkan pada spesifikasi Binamarga maksimal 25 % mungkin tidak terlalu menjadi masalah di beberapa daerah di wilayah Indonesia, akan tetapi di daerah tertentu seperti Nusa Tenggara Timur cukup sulit mendapatkan agregat dengan nilai kehilangan abrasi < 25%.

Oleh karena itu, ketentuan pada spesifikasi perlu untuk ditinjau lagi. Untuk mendukung penetapan persyaratan ini, perlu dilakukan pengujian-pengujian dengan menggunakan agregat dengan rentang variasi nilai kehilangan abrasi yang terdapat di berbagai wilayah di Indonesia.

### **3.2.1.2 Pengaruh Bentuk Partikel Agregat**

#### **Pengaruh partikel agregat kasar**

Pengaruh bentuk partikel terhadap kemudahan pengerjaan campuran beton sudah jelas dipahami dan disepakati. Akan tetapi, pengaruh bentuk partikel terhadap kekuatan beton masih menjadi perdebatan, di mana beberapa peneliti menganggap bentuk partikel agregat tidak mempunyai pengaruh terhadap kekuatan beton, dan di sisi lain banyak pula peneliti yang menganggap bentuk partikel mempunyai pengaruh terhadap kekuatan beton.

Perdebatan ini terjadi karena hasil pengujian dari para peneliti tersebut tidak mengarah kepada kesimpulan yang sama, dan secara teoritis pengaruh bentuk partikel dalam membangun kekuatan beton juga belum sepenuhnya diketahui atau disepakati.

Meskipun perbedaan pendapat dari para ahli mengenai pengaruh bentuk partikel terhadap kekuatan beton belum mendapatkan kesimpulan, adalah lebih aman untuk mengikuti pendapat yang menganggap bentuk partikel agregat berpengaruh baik pada kekuatan beton.

Pandangan yang menyatakan bentuk partikel agregat berpengaruh terhadap kekuatan beton mengemukakan teori sebagai berikut; yaitu agregat dengan bentuk partikel yang pipih dan lonjong mempunyai rongga yang tinggi sehingga membutuhkan agregat halus atau bahan lainnya termasuk semen untuk mengisi rongga dan akan berpengaruh terhadap meningkatnya kebutuhan air untuk menghasilkan campuran yang mudah pengerjaannya. Selanjutnya berdampak pada penurunan kekuatan beton, terutama kuat lentur beton akan cenderung menurun jika jumlah agregat kasar yang berbentuk pipih meningkat. Bentuk partikel agregat juga memiliki pengaruh langsung pada kekuatan beton keras, di mana tegangan yang dialami di sekitar material komposit beton mungkin tidak mampu ditahan oleh partikel yang pipih, yang dapat menyebabkan retak halus di dalam beton. Hal ini, akan berulang dan selanjutnya mengakibatkan retak yang terlihat sampai ke permukaan beton.

Untuk menghindari permasalahan ini penggunaan agregat kasar dengan bentuk pipih dan lonjong harus dibatasi.

Beberapa spesifikasi dari institusi jalan di beberapa negara mencantumkan batasan jumlah bentuk partikel antara lain; *British* standar menentukan batasan jumlah agregat dengan bentuk partikel yang pipih dan lonjong maksimal 35 – 40%. Sedangkan standar beton di Spanyol menetapkan penggunaan agregat dengan bentuk pipih dan lonjong maksimal 35% berat. Agensi jalan di beberapa negara bagian di Amerika menetapkan batasan untuk rasio 3 : 1 adalah 8 – 20%. Sedangkan Mehta (1993) menyarankan maksimal adalah 15% dari berat total agregat.

*Pada spesifikasi Binamarga batasan penggunaan agregat kasar berdasarkan bentuk partikel dengan rasio 3:1 maksimal 25% dan rasio 5:1 maksimal 10%.*

Sebaiknya pada Spesifikasi Binamarga tersebut di atas ditetapkan satu nilai saja untuk persyaratan maksimum penggunaan agregat dengan bentuk

partikel yang pipih dan lonjong dengan rasio 3 : 1 yaitu 25%, karena dengan adanya ketentuan rasio 5 : 1 maksimum 10% seolah-olah memberi peluang untuk menambah penggunaan agregat yang lebih buruk dan yang tidak mendukung kekuatan beton.

#### **Pengaruh bentuk partikel agregat halus**

*Pada spesifikasi Binamarga ditetapkan bahwa agregat halus sekurang-kurangnya terdiri dari 50% (terhadap berat) pasir alam.*

Bentuk partikel agregat halus mempunyai pengaruh lebih besar terhadap *workability*, *durability* dan kekuatan beton dibandingkan agregat kasar (Quiroga dan Fowler, 2003).

Spesifikasi yang ada saat ini tidak mencantumkan persyaratan bentuk partikel dari agregat halus, meskipun telah diketahui besarnya pengaruhnya terhadap kinerja beton. Seperti pada penjelasan bentuk partikel agregat kasar diatas, bentuk yang kubikal dari partikel agregat halus serta tekstur permukaan yang tidak kasar akan menghasilkan beton yang mempunyai ketahanan serta kekuatan yang lebih baik daripada bentuk partikel yang pipih dan lonjong.

Bentuk partikel agregat halus tidak umum dipersyaratkan, dan hal ini mungkin disebabkan karena metode pengujian bentuk partikel agregat halus masih sangat terbatas. Adalah ASTM D 3398 yang merupakan salah satu dari sedikit pedoman pengujian bentuk partikel agregat halus yang ada, akan tetapi prosedur pengujiannya membutuhkan waktu yang sangat lama untuk mendapatkan hasil, sehingga menyebabkan keengganan untuk menggunakan metode ini.

Agregat halus dapat diperoleh dari agregat alam ataupun dari hasil pemecah batu, di mana perbedaan yang umum dari kedua sumber ini adalah:

- Agregat alam: berbentuk bulat dan tekstur permukaannya cenderung licin.
- Agregat hasil pemecah batu: berbentuk angular dan tekstur permukaannya kasar.

Agregat hasil pemecah batu dengan bentuk partikel yang angular dan mempunyai tekstur permukaan yang kasar cenderung meningkatkan kebutuhan air pada campuran beton, sedangkan agregat alam membutuhkan air yang lebih sedikit untuk menghasilkan *workability* yang sama. Namun demikian, kelekatan agregat halus hasil pemecah batu dengan semen tentu saja lebih baik dibandingkan jika menggunakan agregat alam.

Keterangan di atas menunjukkan bahwa agregat halus alam dan agregat hasil pemecah batu masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kombinasi dari kedua agregat mungkin dapat menghasilkan beton yang lebih baik. Akan tetapi, proporsi dari kedua agregat untuk menghasilkan campuran dengan *workability* yang ditentukan serta kinerja beton yang baik, tentu hanya dapat diperoleh dari perhitungan rancangan campuran.

Oleh karena itu, ketentuan penggunaan agregat alam sebanyak-banyaknya tidaklah tepat dan disarankan jumlah agregat alam ataupun agregat hasil pemecah batu yang digunakan merupakan kombinasi yang tepat untuk menghasilkan *workability* campuran dan kekuatan beton yang memadai.

### **3.2.1.3 Pengaruh Penyerapan oleh Air (*water absorption*)**

Penyerapan air merupakan gambaran tidak langsung dari permeabilitas agregat yang terkait dengan sifat-sifat fisik lainnya seperti; kekuatan mekanis, keawetan dan potensi terhadap *durability* (khususnya kondisi beku dan cair pada musim dingin). Sampai saat ini belum sepenuhnya

dapat disimpulkan hubungan antara penyerapan air agregat dengan kekuatan beton, namun demikian pori-pori yang terdapat pada permukaan butir agregat mempengaruhi ikatan antara agregat dengan pasta semen, dan secara tidak langsung tentunya memberikan pengaruh juga terhadap kekuatan beton.

Pada campuran beton, pasta semen yang karena kekentalannya sulit memasuki pori-pori yang terdalam dari butir agregat. Yang dapat memasuki pori-pori agregat adalah air. Penyerapan air oleh agregat dapat berpengaruh pada kemudahan pengerjaan (*workability*), khususnya untuk daerah yang beriklim panas seperti di Indonesia.

Meskipun pengaruh penyerapan air oleh agregat tidak sepenting bentuk partikel agregat terhadap kekuatan beton, akan tetapi penggunaan agregat dengan penyerapan air yang relatif tinggi dapat menyebabkan kualitas beton yang tidak seragam. Besaran penyerapan air agregat 2 % - 7% merupakan nilai yang cukup baik untuk agregat yang digunakan pada campuran beton, seperti ketentuan yang terdapat pada spesifikasi Binamarga .

*Pada spesifikasi Binamarga ditentukan penyerapan air agregat kasar maksimal 2,5% dan untuk agregat halus 5%.*

Standar spesifikasi di Inggris tidak umum mencantumkan batasan penyerapan air agregat, kecuali untuk proyek besar dan pekerjaan-pekerjaan di luar negeri. BS 8007 :1987 merekomendasikan maksimal penyerapan air agregat 3%, dan maksimal 2,5% untuk pekerjaan di luar negeri, dan tidak disebutkan perbedaan besaran penyerapan air untuk agregat kasar dan halus.

Spesifikasi di Jerman menetapkan syarat penyerapan air agregat > 1%, karena jika penyerapan air < 1% maka agregat tidak tahan terhadap cuaca dingin. Sedangkan spesifikasi di Irlandia menetapkan penyerapan air

agregat kasar minimal 2%, akan tetapi jika digunakan agregat dengan penyerapan air > 2% maka harus dilakukan pengujian tambahan terhadap keawetan agregat tersebut.

### **Penggunaan ampas besi (*slag*) sebagai agregat kasar**

*Pada spesifikasi Binamarga ampas besi diijinkan digunakan sebagai agregat kasar dengan ketentuan penyerapan oleh airnya maksimal 6%.*

Ampas besi yang digunakan sebagai agregat kasar pada campuran beton berbeda dengan slag semen. Pada waktu kedua bahan tersebut masih dalam bentuk cair merupakan bahan yang sama, akan tetapi setelah melalui tahap pendinginan sifat kedua bahan tersebut menjadi berbeda. Sebagai agregat, slag didinginkan secara perlahan untuk mendapatkan tahap kristalisasi, dan selanjutnya dipecah seperti memecah batu alam. Bahan ini mempunyai rongga untuk membuatnya cukup ringan. Bahan ini mempunyai kelebihan dibandingkan dengan agregat alam yaitu ikatannya yang kuat karena sifatnya yang berongga, komposisi kimia serta bentuk partikelnya yang lebih baik.

Sebagai agregat halus bahan ini memang telah terbukti menunjukkan kinerja yang memuaskan dari segi kekuatan beton dan *workability* dibandingkan dengan pasir alam.

Akan tetapi, penggunaan ampas besi sebagai agregat kasar harus benar-benar dipertimbangkan karena bahan ini berongga dan bergelembung sehingga partikelnya bersifat rapuh, dan pada waktu pencampuran dikhawatirkan akan pecah dan sebagian besar dapat menjadi partikel-partikel halus serta tidak mempunyai ketahanan abrasi dan interlocking antar agregat yang kuat.

Sebaiknya pada jalan yang menggunakan perkerasan kaku yang dilalui oleh lalulintas berat, penggunaan material ini sebagai agregat kasar tidak diizinkan.

Sedangkan ampas baja (*slag steel*) tidak disarankan digunakan sebagai bahan pengganti agregat karena ampas baja sangat *abrasive* dan dapat merusak alat pencampur (bin dan conveyor beltnya) dan dpt menyebabkan masalah *durability* terutama jika digunakan agregat yg mengandung kapur.

### 3.2.1.4 Ketahanan (*Durability*)

#### Ketahanan kimia

Pada umumnya beton tidak tahan terhadap serangan kimia, dimana yang biasa menyerang beton adalah alkali dan sulfat. Dampak dari serangan alkali dan sulfat pada beton baru dapat terlihat pada jangka waktu yang lama, sehingga kadang-kadang agak diabaikan pada waktu perencanaannya.

#### Ketahanan terhadap Alkali

Reaktivitas alkali agregat dapat terjadi dalam dua bentuk yaitu *Alkali silica reactivity* (ASR) dan *alkali carbonate reactivity* (ACR). *Alkali silica reactivity* merupakan bentuk yang paling umum terjadi.

Agregat mengandung mineral-mineral silika yang dapat bereaksi dengan alkali yang terdapat pada Portland semen dan membentuk gel pada permukaan agregat, pada kondisi lembab gel tersebut akan mengembang. Jika kondisi lembab masih ada, maka reaksi akan terus terjadi dan gel akan semakin mengembang dan menimbulkan tegangan-tegangan pada beton, sehingga pada tahap tertentu beton akan mengalami retak.

Mineral yang reaktif dapat dijumpai pada beberapa jenis batuan yaitu; *Opaline silica, volcanic glass, chert/chalcedony*, dan semen *silica/cryptocrystalline quartz*.

Untuk mencegah reaksi *alkali silica* ini, maka harus dilakukan pengujian-pengujian terlebih dahulu. Pada umumnya pengujian untuk mengetahui potensi reaksi *alkali silica* membutuhkan waktu yang lama. Saat ini sudah

banyak metode pengujian untuk mengetahui potensi reaksi *alkali silica* (ASR), akan tetapi banyak pula metode pengujian yang menunjukkan hasil yang tidak tepat. Tabel 4 di bawah ini merupakan metode pengujian yang disarankan untuk digunakan.

**Tabel 4. Metode Pengujian untuk mengetahui potensi ASR**

Metode pengujian	Lama pengujian	Keterangan
ASTM C 295	Sangat singkat	Pengujian visual, microscopis, dan komposisi mineral agregat.
ASTM C 1260/ AASHTO T 303	16 hari	Untuk mengetahui potensi ASR agregat, di mana metode ini dikenal sebagai metode batang mortar
ASTM C 1567	16 hari	Untuk mengetahui potensi ASR agregat dengan bahan pengikat yang digunakan
ASTM C 1293	91 hari	Pengujian ini untuk melengkapi metode pengujian ASTM C 1260, yang tujuannya untuk mengetahui potensi ASR agregat dan bahan pengikat.

Jika penggunaan agregat yang reaktif tidak dapat dihindarkan, beberapa tindakan yang dapat dilakukan untuk mengatasinya adalah dengan:

- Penambahan bahan tambah mineral, dalam hal ini *fly ash* klas F yang terbaik. *Fly ash* klas C dapat juga digunakan pada dosis yang optimum, akan tetapi penggunaannya pada dosis yang rendah justru akan memperburuk ASR.
- Penggunaan semen dengan kadar alkali yang rendah untuk agregat dengan tingkat reaktifitas rendah sampai sedang.

Tindakan dengan menambahkan bahan tambah harus dilakukan dengan pengujian-pengujian terlebih dahulu. Hal ini harus dilakukan untuk mengetahui kadar bahan tambah yang tepat untuk mengatasi reaksi alkali-silika. Demikian pula dengan penggunaan semen yang rendah alkali harus diuji efektifitasnya, karena penggunaan semen ini ternyata tidak selalu efektif mengatasi permasalahan ini.

### **Ketahanan terhadap Sulfat**

Keberadaan sulfat dalam jumlah yang cukup besar di dalam tanah ataupun air, akan menyerang dan merusak perkerasan beton dalam jangka waktu yang lama. Sulfat merusak beton dengan cara bereaksi dengan senyawa kimia  $C_3A$  yang terdapat pada beton yang telah mengeras dengan menyusupkan dan meninggalkan kristal garam. Kristal garam ini memberikan tekanan dan merusak pasta semen, yang selanjutnya dapat menyebabkan retak pada beton.

Permasalahan akibat serangan sulfat ini tidak dapat dihindari karena penyebabnya adalah faktor lingkungan, akan tetapi dapat dicegah dengan beberapa cara yaitu:

- Rencanakan beton dengan faktor air semen yang rendah (maksimum 0,4)
- Gunakan semen yang tahan terhadap sulfat, semen tipe II atau V.
- Gunakan bahan tambah *fly ash* atau *slag*

Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui ketahanan semen terhadap sulfat, dilakukan terhadap benda uji mortar dengan menggunakan ASTM C 452 dan ASTM C 1012.

### **3.2.2 Semen dan Bahan Tambah Mineral**

#### **Semen:**

Saat ini di Amerika telah dikenal berbagai tipe semen, dan di Eropa semen dibagi dalam berbagai klasifikasi. Demikian pula dengan Indonesia semen dikenal dalam berbagai tipe, ada tipe semen tanpa campuran bahan tambah ada juga yang yang dicampur dengan berbagai bahan tambah seperti ditunjukkan tabel 7 di bawah.

Seperti ditentukan dalam spesifikasi: semen harus memenuhi spesifikasi pasal 7.1.2.1, seperti yang tertera di bawah ini:

- a) Semen yang digunakan untuk pekerjaan beton harus jenis Portland tipe I, II, III, IV, dan V yang memenuhi SNI 15-2049-2004 tentang Semen Portland.
- b) Semen tipe IA (Semen Portland tipe I dengan *air-entraining agent*), IIA (Semen Portland tipe II dengan *air-entraining agent*), IIIA (Semen Portland tipe III dengan *air-entraining agent*), PPC (*Portland Pozzolan Cement*), dan PCC (*Portland Composite Cement*) dapat digunakan apabila diizinkan oleh Direksi Pekerjaan. Apabila hal tersebut diizinkan, maka Penyedia Jasa harus mengajukan kembali rancangan campuran beton sesuai dengan merek semen yang digunakan.

Semen yang paling banyak ditemui ada di pasaran di Indonesia saat ini pada umumnya adalah semen tipe IIIA PPC (*Portland Pozzolan Cement*) dan PCC (*Portland Composite Cement*). Akan tetapi, pada kemasan semen tidak dicantumkan komposisi bahan tambah mineral yang terkandung dalam kemasan tersebut. Oleh karena itu, para pengguna harus teliti dan mendapatkan informasi mengenai kandungan bahan tambah, dan harus melakukan percobaan sebelum digunakan.

***Fly ash (Abu terbang):***

*Pada spesifikasi ditentukan abu terbang maksimum yang dapat digunakan adalah 25% dari berat bahan pengikat.*

Pada awal digunakannya *fly ash* pada campuran beton sekitar tahun 1970-an, jumlah *fly ash* yang dipakai memang dibatasi. Akan tetapi pada masa ini batasan tersebut tidak lagi berlaku setelah melalui banyak penelitian dan percobaan yang berhasil, dan saat ini penggunaan *fly ash* dalam semen bahkan ada yang mencapai 55%.

Pada ACI 318-08 *Building Code* terdapat ketentuan batasan-batasan kadar bahan tambah dari total bahan pengikat sebagai berikut:

- *fly ash* atau pozzolan lainnya: max 25%

- kombinasi *fly ash*, pozzolan dan *silica fume*: max 50% dengan *fly ash* atau max 25% dengan pozzolan dan max 10 % dengan *silica fume*.
- *slag*: max 50%

Ternyata batasan-batasan tersebut tidak berlaku umum, melainkan dimaksudkan untuk daerah yang mengalami musim dingin, dimana biasanya dilakukan kegiatan pencairan es yang menggunakan garam atau bahan kimia tertentu yang dapat memicu terjadinya korosi pada tulangan beton.

Secara teknis penggunaan *fly ash* pada campuran dalam jumlah > 25% tidak memberikan peningkatan kinerja beton, akan tetapi untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap silika (ASR) dan ketahanan terhadap sulfat diperlukan *fly ash* > 25%.

Hal-hal yang harus diperhatikan jika kadar *fly ash* semakin besar adalah terjadinya perlambatan waktu pengikatan dan lamanya pencapaian kekuatan rencana, karena senyawa kimia yang terdapat pada *fly ash* dapat memperlambat proses awal hidrasi.

Namun demikian, hal ini dapat diatasi dengan penambahan bahan tambah kimia (*admixture*) yang sesuai.

Penambahan *fly ash* tidak akan mengurangi besarnya kekuatan rencana beton, meskipun untuk mencapainya akan membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan campuran beton yang tidak menggunakan *fly ash*. Ada laporan suatu penelitian yang menggunakan kadar *fly ash* dengan kadar yang tinggi dan tanpa penambahan bahan kimia yang berfungsi sebagai aselerator, dan kekuatan rencana beton dicapai pada umur 56 hari.

Oleh karena alasan-alasan yang telah disebutkan tadi, maka penggunaan *fly ash* disarankan memperhatikan ketentuan seperti ditunjukkan pada tabel 5. berikut ini.

**Tabel 5. Saran penggunaan kadar fly ash dalam campuran**

Perkerasan beton	Kadar fly ash
Untuk perkerasan beton dengan tulangan	< 25%
Untuk meningkatkan ketahanan terhadap ASR dan sulfat	> 25%

Pada Spesifikasi Binamarga terdapat ketentuan lain yang terkait dengan penggunaan *fly ash*, yaitu: *Pada campuran dengan fly ash kurang dari 50 kg/m<sup>3</sup> kontribusi alkali total (dinyatakan dalam Na<sub>2</sub>O ekuivalen) dari semua bahan tambah yang digunakan pada campuran tidak boleh melebihi 0,2 kg/m<sup>3</sup> pada campuran.*

Ketentuan diatas menunjukkan batasan kadar alkali total dari semua bahan tambah maksimal 0,4% dari kadar *fly ash* yang digunakan dalam campuran.

Laporan hasil penelitian dari berbagai negara telah menunjukkan hasil yang bertentangan mengenai penggunaan *fly ash* dalam memitigasi ASR.

Obla Karthik, 2008 mengemukakan bahwa tidak ada korelasi antara kadar alkali dengan kinerja *fly ash* untuk memitigasi ASR. Sejalan dengan hasil penelitian tersebut ASTM C 618 telah menghilangkan ketentuan batasan kadar alkali .

Namun demikian, ada pula laporan yang mengatakan jika total alkali dalam *fly ash* tinggi ( > 5% Na<sub>2</sub>O ekuivalen), maka *fly ash* tidak efektif lagi dalam mengendalikan ASR. Beberapa jenis pozolan mengandung alkali dengan kadar yang sangat bervariasi, akan tetapi harus diketahui pula bahwa alkali yang terdapat pada pozolan tidak mudah beraksi terhadap agregat yang reaktif, tidak seperti alkali yang terdapat pada semen. Sehingga meskipun *fly ash* yang digunakan mengandung alkali, fungsi *fly ash* dalam campuran beton untuk memitigasi ASR tetap dapat berjalan baik.

Ada 2 karakteristik utama dari *fly ash* yang dapat mempengaruhi efektifitasnya dalam memitigasi ASR,yaitu:

- Kehalusan, di mana semakin halus butir *fly ash* menunjukkan semakin efektif dalam mengurangi dampak ASR
- Mineralogi, karakter setiap *fly ash* ditentukan oleh komponen dari mineral pembentuknya, dan jika dari sumber yang berbeda akan menunjukkan reaksi yang berbeda pula.

Kedua hal di atas mungkin dapat menjelaskan mengenai perbedaan hasil-hasil penelitian dari berbagai sumber, yang tentu saja setiap penelitian menggunakan *fly ash* dari sumber dan tingkat kehalusan yang berbeda.

Oleh karena itu, jika agregat yang reaktif digunakan dan dalam campuran tersebut akan ditambahkan *fly ash*, maka harus dilakukan pengujian untuk mengetahui efektifitas dari penambahan *fly ash* tersebut meskipun untuk mendapatkan hasilnya dibutuhkan waktu yang cukup lama. *Fly ash* yang akan digunakan harus dari satu sumber.

### **Slag**

*Slag* biasa disebut sebagai semen *slag*, yang mempunyai sifat seperti semen yang dapat mengalami hidrasi meskipun tidak terdapat *activator* pada waktu bereaksi. Akan tetapi tanpa adanya unsur *activator* maka proses hidrasi akan berlangsung sangat lambat. Komposisi kimia slag lebih mendekati Portland semen dibandingkan dari pozolan yang lain, seperti terlihat pada tabel 6.

**Tabel 6. Tipikal komposisi kimia PC dan Pozolan material**

Tipikal komposisi kimia PC dan Pozolan material				
	PC	Slag	Fly ash C	Fly Ash F
CaO	65	45	25	3
SiO <sub>2</sub>	20	33	37	55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	10	16	28
MgO	9	1	7	18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	6	7	1

Bahan tambah mineral memberikan pengaruh yang cukup luas pada beton baik pada tahap plastis maupun pada tahap setelah mengeras, dan secara umum pengaruh penggunaan bahan tambah mineral *slag* dan *fly ash* ditunjukkan pada tabel 7 dan tabel 8 (Thomas dan Wilson,2002); Kosmatka et.al(2003).

**Tabel 7. Pengaruh Bahan tambah mineral pada karakteristik beton segar (Thomas dan Wilson,2002); Kosmatka et.al(2003)**

	Fly ash klas F	Fly Ash klasC	Slag
<b>Kebutuhan air</b>	Menurun secara signifikan	Menurun secara signifikan	menurun
<b>Workability</b>	meningkat	meningkat	meningkat
<b>Bleeding dan segregasi</b>	menurun	menurun	Efek bervariasi
<b>Panas hidrasi</b>	menurun	Efek bervariasi	menurun
<b>Setting time</b>	meningkat	Efek bervariasi	meningkat

**Tabel 8. Pengaruh bahan tambah mineral pada karakteristik beton keras (Thomas dan Wilson,2002); Kosmatka et.al(2003)**

	Fly ash klas F	Fly Ash klasC	Slag
<b>Kuat awal</b>	Menurun	Efek bervariasi	menurun
<b>Workability</b>	meningkat	meningkat	meningkat
<b>permeability</b>	menurun	menurun	menurun
<b>ASR</b>	Menurun secara signifikan	Efek bervariasi	Menurun secara signifikan
<b>Sulfat resistance</b>	Meningkat secara signifikan	Efek bervariasi	Meningkat secara signifikan

Dari kedua tabel di atas terlihat pengaruh penggunaan bahan tambah *slag*, *fly ash* klas C dan *fly ash* klas F pada beton secara umum hampir sama, namun penggunaan bahan tambah harus melalui percobaan laboratorium dan lapangan sebelum digunakan pada pekerjaan di lapangan.

Pada spesifikasi Binamarga tidak ada disebutkan ketentuan penggunaan *slag* sebagai bahan tambah, mungkin karena bahan ini tidak umum digunakan, meskipun demikian perlu ditambahkan ketentuannya berdampingan dengan ketentuan bahan tambah mineral lainnya.

### 3.2.3 Bahan Tambah Kimia

Pada spesifikasi disebutkan bahwa *Calcium chloride*, *Triethanolamine* dan *Calcium formate* tidak boleh digunakan sebagai bahan tambah.

#### **Accelerators**

*Accelerators* adalah bahan tambah yang berfungsi untuk mempercepat pengikatan, pada umumnya merupakan bahan kimia. Selama ini bahan-bahan yang dikenal sebagai *accelerator* adalah:

- *Calcium chloride*
- *Triethanolamine*
- *Calcium formate*
- *Sodium silicate, aluminat* dan *potasium carbonate*
- Air panas

**Kalsium klorida** merupakan bahan kimia yang paling sering digunakan untuk mempercepat pengikatan (aselerator), karena terbukti sangat efektif dan juga ekonomis. Akan tetapi, penggunaan kalsium klorida dapat menyebabkan karat pada beton bertulang dan mengurangi ketahanan beton terhadap agresi sulfat.

Oleh karena itu, kalsium klorida dapat digunakan untuk beton tanpa tulangan dan juga pada lingkungan yang tidak beresiko menghadapi serangan sulfat.

Perlu diperhatikan apakah korosi akan terjadi atau tidak sangat tergantung pada kualitas beton yang dihasilkan dan lingkungan yang mempengaruhinya. Korosi pada tulangan tidak akan terjadi bila tidak dibantu oleh oksigen, maka untuk mencegah terjadinya korosi dapat dilakukan dengan;

- Gunakan kalsium klorida < 1,5%
- Buatlah beton yang dipadatkan dengan baik
- Jangan gunakan aselerator kalsium klorida untuk beton bertulang

**Triethanolamine** tidak disebutkan sebagai bahan yang berbahaya, hanya merupakan aselerator yang bersifat sedang dan tidak dapat digunakan sendiri. Demikian pula dengan **Calcium format** tidak terlalu mempunyai pengaruh terhadap waktu pengikatan dan harganya juga mahal. Sedangkan **sodium silicate** merupakan aselerator yang sangat kuat, tetapi setelah beberapa waktu dapat mengurangi kekuatan beton.

**Air panas** dapat berfungsi sebagai aselerator dan pencapaian kekuatan beton, dan sebagai aselerator lebih ekonomis dibandingkan bahan tambah kimia ataupun extra semen.

### **Water reducers**

ASTM C 494 telah mempublikasikan water reducers versi terbaru yaitu *high-range water-reducing admixtures* pada edisi July 1980. Bahan tambah kimiawi ini terdiri dari Type F *water-reducing, high range admixtures* dan Type G *water-reducing, high-range, and retarding admixtures*. Bahan tambah *water-reducing, high range admixtures* dikenal dengan nama superplasticizers.

Tujuan penggunaan superplasticizers adalah:

- Menghasilkan *flowing beton* dengan *slump* yang sangat tinggi 175 – 225 mm.
- Menghasilkan beton mutu tinggi pada fas antara 0,3 – 0,4.

Permasalahan dengan penggunaan *superplasticizers* pada beton adalah kehilangan *slump*. Penggunaan *water-reducing, high range dalam campuran beton dapat* mengalami kehilangan *slump* yang sangat cepat dibandingkan *water reducers* versi konvensional. Untuk mengatasi permasalahan ini adalah penambahan bahan tambah ini dilakukan sesaat sebelum beton dihampar.

Pada saat ini selain penambahan bahan tambah sebagai *retarder, water reducers* dan *accelerators* telah mulai dikenal pula:

- *Waterproofer/permeability reducers*
- *Pumping aids/Viscosity Modifying agents (VMA)*
- *Shrinkage compensators*

### 3.2.4 Membran Kedap Air /Pemecah Ikatan/*Bond Breaker*

*Ketentuan pada spesifikasi menyatakan membran kedap air yang ditempatkan di bawah perkerasan kaku harus berupa lembaran plastik (polyethene) dengan tebal 125 mikron.*

Retak yang terjadi pada pelat beton disebabkan oleh beberapa faktor, dan penyebabnya antara lain kekakuan lapis pondasi dan kekasaran antara pelat beton dan lapis pondasi. Kekakuan lapis pondasi dan kekasaran antara pelat beton–dengan lapis pondasi menyebabkan gesekan/friksi yang memicu terjadinya retak pada pelat beton. Lapisan pondasi yang terdapat di bawah pelat beton mempunyai kekasaran dan kekakuan tertentu, dan pada waktu pelat beton dalam bentuk pasta semen berubah fase dari keadaan plastis ke padat maka akan terjadi gesekan/friksi dengan permukaan lapis pondasi.

Menurut ACPA (2002), besarnya koefisien gesekan bergantung pada jenis lapis pondasi yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 9. di bawah ini.

**Tabel 9. Koefisien gesekan dari berbagai jenis *subbase* (ACPA,2002)**

Jenis Lapis Pondasi	Koefisien Gesekan
<i>Natural Subgrade</i>	1,0
<i>Lime-treated clay soil</i>	1,5
<i>Dense-graded granular</i>	1,5
<i>Crushed stone</i>	6,0
<i>Bituminous surface treatment</i>	3,0
<i>Asphalt stabilized (rough)</i>	15,0
<i>Asphalt stabilized (smooth)</i>	6,0
<i>Asphalt-treated, open graded</i>	15,0

Jenis Lapis Pondasi	Koefisien Gesekan
<i>Cement-treated, open graded</i>	15,0
<i>Cement-stabilized</i>	10,0
LCB	15,0

Dari tabel diatas terlihat jelas jenis-jenis lapis pondasi yang menunjukkan nilai koefisien gesek yang tertinggi, di mana penggunaan jenis lapis pondasi tersebut membutuhkan perhatian khusus untuk mencegah terjadinya retak yang tidak diinginkan. Solusi yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak gesekan adalah dengan penggunaan *bond breaker* (pemecah ikatan), yang pada spesifikasi disebutkan sebagai membrane kedap air. Selanjutnya disebut sebagai pemecah ikatan.

*Pemecah ikatan (Bond breaker atau slip membrane)* yang umum digunakan di Indonesia adalah lembaran plastik sesuai ketentuan yang terdapat pada spesifikasi. Sedangkan di Amerika dan Eropa material yang paling banyak digunakan sebagai pemecah ikatan untuk lapis pondasi LCB dan CTB adalah geotekstil atau *curing membrane* yang berbahan dasar wax yang dilapiskan sebanyak dua kali (*double-coat of wax-based curing membrane*). Ada juga lapisan aspal emulsi yang telah terbukti dapat berfungsi secara efektif sebagai pemecah ikatan pada CTB.

Penggunaan *tack coat* dari bahan beraspal ternyata terbukti lebih baik daripada lembaran plastik ada perkerasan beton yang bersambung dengan dan tanpa tulangan yang menggunakan *crack inducer*. Spesifikasi bidang jalan di Inggris yang semula menentukan pemecah ikatan adalah plastik telah direvisi pada tahun 2001, dan menetapkan bahwa lembaran plastik dan *tack coat* dari bahan beraspal dapat digunakan sebagai pemecah ikatan.

ACPA (2002) menyampaikan beberapa jenis bahan yang dapat digunakan sebagai pemecah ikatan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 10.

**Tabel 10. Berbagai jenis bahan pemecah ikatan (*bond breaker*)**

<b>Material</b>	<b>Keterangan</b>
<i>Curing Compound</i>	Dua lapis <i>white-pigmented</i> yang berbahan dasar <i>wax</i> , terbukti dapat bekerja baik.
Aspal emulsi	Bekerja baik pada base yang mempunyai permukaan yang halus.
Plastik	Bekerja baik, tetapi agak sulit dikendalikan jika keadaan berangin. Disarankan untuk proyek yang berskala kecil.
<i>Tar paper</i>	Tidak disarankan digunakan pada seluruh permukaan base. Bekerja baik pada daerah yang mengalami retak karena susut pada base.
<i>Choker stone</i>	Disarankan hanya pada <i>stabilized open-graded base</i> .

Persyaratan bahan pemecah ikatan pada spesifikasi sebaiknya juga disarankan penggunaan bahan lain selain plastik, seperti *tack-coat* dari bahan beraspal dan *curing compound* yang tidak mahal dan terbukti telah banyak digunakan serta bekerja dengan baik di beberapa negara.

### **3.2.5 Bahan Penutup Sambungan**

Perkerasan beton akan mengalami retak karena penyusutan dan peristiwa perbedaan temperatur yang terjadi. Salah satu langkah yang dilakukan untuk mengatasi hal tersebut adalah melakukan pemotongan pada sambungan, sehingga perbedaan temperatur yang mengakibatkan menyusut dan mengembangnya perkerasan diakomodasi pada sambungan. Sambungan harus ditutup untuk mencegah air masuk ke lapisan perkerasan dan mencegah kotoran atau material yang dapat menyumbat sambungan. Untuk membuat dan memelihara sambungan yang benar-benar tidak dapat dilalui air tentu saja tidak mudah, meskipun demikian bahan penutup sambungan harus mampu meminimalisasi air yang masuk ke lapisan perkerasan dan mengurangi kemungkinan terjadinya *pumping* dan *faulting*. Demikian pula dengan bahan-bahan yang keras harus dicegah masuk ke sambungan, karena dapat mengganggu menutup dan membukanya sambungan agar tidak terjadi *spalling* dan *blow up* pelat 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 11 menunjukkan jenis bahan penutup yang dapat digunakan serta deskripsi singkat dari bahan tersebut.

**Tabel 11. Jenis-jenis bahan penutup sambungan pada perkerasan beton**

Jenis bahan penutup	Deskripsi	Spesifikasi
<i>Cair, diterapkan panas</i> Aspal karet Terbuat dari polimer elastomer	Termoplastis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Meratakan sendiri</li> <li>▪ Meratakan sendiri</li> </ul>	ASTM D 6690 ASTM D 3406
<i>Cair, diterapkan dingin</i> Silicon 1 Silicon 2 Silicon 3 Polisufida Poliuretan	Modulus rendah <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tidak melendut</li> <li>▪ Meratakan sendiri</li> <li>▪ Meratakan sendiri</li> <li>▪ Meratakan sendiri</li> <li>▪ Meratakan sendiri</li> </ul>	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"> <li>▪ Beraspal tidak menekan dan elastis.</li> <li>▪ Busa karet, bersifat menyumbat dan PVC daur ulang</li> <li>▪ Beraspal</li> </ul>	ASTM D 1751 / AASHTO M 213 ASTM D 1752/ AASHTO M 213 ASTM D 994 / AASHTO M 33

### 3.3 Beton

#### 3.3.1 Bahan Pokok Campuran

Dalam menentukan proporsi bahan pokok untuk campuran beton, dilakukan langkah-langkah perhitungan sesuai ketentuan pada Rancangan Campuran Beton dari SNI 03 2834 2002 , seperti berikut:

- Tentukan *slump* yang dibutuhkan
- Tentukan ukuran agregat maksimum
- Estimasi kadar air dan kadar udara
- Dapatkan faktor air semen (fas).
- Hitung jumlah semen yang diperlukan
- Estimasi jumlah agregat kasar
- Estimasi jumlah agregat halus

Berdasarkan langkah-langkah yang disebutkan di atas, untuk mendapatkan jumlah semen yang dibutuhkan harus terlebih dahulu mendapatkan nilai fas. Untuk hal itu dapat mengacu pada grafik hubungan fas dengan kuat tekan beton, sehingga diperoleh nilai fas berdasarkan kekuatan beton yang direncanakan. Akan tetapi, jika perkerasan akan dibangun pada lingkungan yang rentan (misalnya pada lingkungan yang korosif), maka fas lebih ditentukan oleh faktor *durability* yang mengacu pada Tabel 12. *Persyaratan Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum untuk Berbagai Macam Pembetonan dan Lingkungan Khusus*. Dengan demikian, jumlah semen diperoleh dari faktor air semen (fas) yang sesuai.

Pada spesifikasi Binamarga ditetapkan berat semen minimal dalam setiap meter kubik beton. Sebaiknya ketentuan ini mengacu pada Rancangan Campuran Beton yang berlaku. Jika hal ini diterapkan pada spesifikasi dikhawatirkan pengguna spesifikasi dapat memilih kadar semen yang tidak tepat.

**Tabel 12. Kadar semen minimum dan faktor air semen minimum**

Kondisi lingkungan	Jumlah semen minimum per m <sup>3</sup> beton(kg)	Nilai faktor air semen minimum
Beton di dalam ruang bangunan		
a. Keadaan keliling non korosif	275	0,60
b. Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325	0,52
Beton di luar ruang bangunan		
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60

Kondisi lingkungan	Jumlah semen minimum per m <sup>3</sup> beton(kg)	Nilai faktor air semen minimum
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung Beton yang masuk ke dalam tanah	275	0,60
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat alkali dari tanah atau air tanah Beton yang kontinyu berhubungan dengan air.	375	0,52
a. Air tawar	275	0,57
b. Air laut	375	0,52

*Pada spesifikasi Binamarga dikemukakan pada waktu menentukan rasio agregat kasar dan agregat halus, maka proporsi agregat halus harus seminimal mungkin. Akan tetapi sekurang-kurangnya 40% agregat dalam campuran beton terhadap berat adalah agregat halus.*

Sebagaimana langkah-langkah perhitungan yang terdapat pada rancangan campuran beton, proporsi agregat halus sebaiknya tidak ditetapkan dalam spesifikasi. Karena proporsi agregat halus dari hasil perhitungan telah mengakomodasi ketentuan-ketentuan untuk menghasilkan kinerja beton segar dan beton keras yang diharapkan.

### 3.3.2 Kekuatan

- Spesifikasi 2006: Beton harus mempunyai kekuatan lentur karakteristik minimal 45 kg/cm<sup>2</sup> pada umur 28 hari. Bila pengujian dilakukan pada kubus 15 cm, kekuatan beton karakteristik minimal harus sebesar 350 kg/cm<sup>2</sup> pada umur 28 hari.
- Spesifikasi tahun 2010 ketentuan beton minimum untuk perkerasan beton semen ditunjukkan pada tabel 13 mengenai ketentuan beton minimum:

Tabel 13.. Ketentuan Beton Minimum

<i>Uraian</i>	<i>Syarat kuat tekan</i>	<i>Syarat kuat lentur</i>
Beton percobaan campuran	K400 (fc' 35) @28 hari	K47 (fc' 4) @ 28 hari
Perkerasan beton semen (pengendalian produksi)	K350 (fc' 30) @28 hari	K45 (fc' 4) @ 28 hari
Metoda pengujian	SNI 03-1974-1990	SNI 03-4431-1997
Ukuran benda uji	Silinder dia.150mm	Balok 500x150x150 mm

Pada spesifikasi 2010 penulisan simbol kuat lentur sama seperti kuat tekan beton **K**, **f<sub>c</sub>** dan juga satuan kekuatan beton tidak dicantumkan. Tidak jelas apakah ini merupakan kesalahan penulisan saja, karena dapat menimbulkan kebingungan dan dikhawatirkan dapat terjadi kesalahan yang fatal. Simbol yang umum digunakan untuk kuat tarik lentur adalah **f<sub>s</sub>**.

Hubungan kuat tekan dengan kuat tarik lentur dari berbagai sumber digambarkan pada grafik di bawah ini. Pada spesifikasi 2010 ketentuan persyaratan kekuatan beton minimum tercantum pada tabel 13 di atas yaitu; kuat tekan K350 ekuivalen dengan kuat lentur 4,5 MPa. Sedangkan pada grafik 4 terlihat bahwa untuk kuat tarik lentur sebesar 4,5 MPa, maka besarnya nilai kuat tekan >350kg/cm<sup>2</sup>. Hal ini telah sering menyebabkan terjadinya kesalahpahaman antara pelaksana dan Direksi teknis .



Gambar 4. Hubungan kuat tekan dan kuat tarik beton

Beton lebih mampu menahan tekanan dibandingkan tarik lentur. Oleh karena itu, yang paling tepat menggambarkan kualitas dari perkerasan beton adalah kemampuannya untuk menahan tegangan tarik lentur. Maka ketentuan persyaratan yang dicantumkan pada spesifikasi seharusnya adalah persyaratan kekuatan tarik lentur minimum pelat beton saja. Dan hal ini juga sekaligus dapat mencegah kesalahpahaman karena adanya pilihan lain yang tidak ekuivalen seperti telah dijelaskan di atas.

Alternatif lain disarankan, yaitu persyaratan kekuatan beton minimum tidak ditetapkan pada spesifikasi, tetapi tercantum pada gambar rencana. Karena setiap proyek mempunyai kriteria sendiri dalam menetapkan tebal perkerasan maupun kekuatannya, tergantung pada kondisi lalu lintas, lingkungan maupun umur rencana.

#### **Kekuatan Lapis Pondasi Bawah Beton Kurus (LPBBK)**

*Pada spesifikasi ditentukan besarnya kuat tekan rata-rata Lapis Pondasi Bawah Beton Kurus pada umur 28 hari dari produksi harian tidak boleh kurang dari 5 Mpa.*

Seperti laporan hasil kajian perencanaan perkerasan kaku tahun 2010, batasan maksimum kuat tekan LPBBK pada masa lalu disarankan 1500 psi (10,3 MPa), akan tetapi saat ini batasan tersebut diturunkan menjadi 1200 psi (8,3 MPa). Hal ini, dilakukan untuk mencegah terjadinya tegangan yang besar pada pelat beton dikarenakan *curling* dan *warping*. Namun jika batasan maksimum kuat tekan tersebut terlampaui, maka disarankan dibuat sambungan pada LPBBK. Penggergajian dilakukan pada lokasi yang sama dengan rencana letak sambungan perkerasan beton di atasnya.

Ketentuan kuat tekan LPBBK pada umur 7 hari minimum 5,2 MPa dan pada umur 28 hari maksimum 8,3 MPa. Jika kuat tekan pada umur 28 hari hanya berkisar 5 MPa, maka lapis pondasi terlalu lemah dan tidak sesuai peruntukannya sebagai lapis pondasi yang diharapkan kinerjanya lebih kuat dibanding jenis lapis pondasi yang lain. Oleh karena itu, persyaratan kuat tekan LPBBK sebaiknya ditetapkan sesuai ketentuan di atas.

### 3.4 Sambungan

Retak terjadi karena tegangan yang terjadi pada perkerasan lebih besar daripada kekuatan yang terbentuk seiring dengan proses pengerasan pada perkerasan beton. Untuk mengendalikan terjadinya retak, dilakukan penggergajian untuk membentuk sambungan pada perkerasan beton yang berfungsi sebagai tempat disalurkan tegangan yang timbul pada perkerasan beton. Agar sambungan dapat berfungsi sebagai pengendali retak yang optimal, maka sambungan harus memenuhi ketentuan-ketentuan sebagai berikut:

- Jarak antar sambungan
- Kedalaman penggergajian sambungan
- Lebar penggergajian sambungan
- Waktu penggergajian
- Penutup sambungan

### 3.4.1 Jarak Sambungan

Jarak antarsambungan bergantung pada tebal pelat beton, kekakuan lapis pondasi dan kekuatan pelat beton itu sendiri. Jarak antarsambungan yang paling optimal untuk perkerasan beton tanpa tulangan adalah antara 4,5 m – 6,1m. ACPA menyarankan jarak sambungan berdasarkan lapis pondasi yang digunakan, seperti ditunjukkan pada tabel 14 dibawah ini.

Tabel 14. Jarak Sambungan Berdasarkan Jenis Lapis Pondasi

Jenis lapis pondasi	Jarak sambungan maksimum
Pondasi berbutir ( <i>granular bases</i> )	24 x tebal perkerasan
Pondasi dengan bahan pengikat ( <i>stabilized bases</i> )	21 x tebal perkerasan

### 3.4.2 Kedalaman dan Lebar Penggergajian Sambungan

Kedalaman penggergajian untuk membentuk sambungan, merupakan kedalaman minimum agar sambungan dapat berfungsi optimal. Jika penggergajian terlalu dangkal, tegangan yang terjadi pada perkerasan tidak sepenuhnya dapat tersalurkan sehingga retak tetap terjadi. Sedangkan penggergajian yang terlalu dalam hanya membuang-buang energi dan bahkan dapat mengurangi *interlocking* agregat pada sambungan.

ACPA menyarankan kedalaman penggergajian pada sambungan berdasarkan jenis lapis pondasi seperti ditunjukkan pada tabel 15.

Tabel 15. Kedalaman penggergajian pada sambungan berdasarkan jenis lapis pondasi (ACPA,2002)

Jenis lapis pondasi	Kedalaman penggergajian /tebal pelat beton	
	Sambungan melintang	Sambungan longitudinal
Pondasi berbutir dengan gradasi rapat ( <i>low friction</i> )	1/4	1/3
Pondasi dengan gradasi terbuka dan pondasi dengan bahan pengikat ( <i>high friction</i> )	1/3	1/3

Kedalaman penggergajian dapat juga ditentukan berdasarkan metode waktu penggergajian. Di mana untuk metode konvensional kedalaman penggergajian adalah 1/3 tebal perkerasan beton, dan untuk metode penggergajian sambungan dengan waktu yang lebih awal (*early sawing window*) kedalaman penggergajian sekitar 25mm tanpa memperhitungkan tebal perkerasan beton.

Lebarnya penggergajian disarankan sekitar 3 - 6mm, dan merupakan tempat untuk bahan penutup sambungan (*joint sealant*).

### 3.4.3 Waktu Penggergajian Sambungan

*Pada spesifikasi dinyatakan: Penggergajian untuk membentuk sambungan harus dilakukan sesegera mungkin setelah beton cukup mengeras agar penggergajian dapat dilakukan tanpa menimbulkan keretakan dan umumnya tidak kurang dari 4 jam tetapi dalam segala hal tidak lebih dari 12 jam setelah pematatan akhir beton.*

Grafik di bawah ini menggambarkan tahap hidrasi yang terjadi sejak dari proses pencampuran sampai tahap beton mengeras, serta panas hidrasi yang dihasilkannya. Tahap-tahap tersebut adalah;

- Tahap *mixing*
- Tahap *dormancy*
- Tahap *hardening*
- Tahap *cooling*
- Tahap *densification*

- **Tahap *mixing***

Pada tahap ini semen, agregat dan air dicampur, dan proses hidrasi mulai terjadi. Selama periode ini panas hidrasi yang cukup tinggi dilepaskan dalam waktu yang sangat singkat, dan segera setelah itu temperatur campuran kembali menurun.

- **Tahap *dormancy***

Periode ini berlangsung sekitar 2 sampai 4 jam setelah proses pencampuran terjadi. Pada tahap ini beton masih dalam kondisi plastis, dan perubahan fisik campuran sangat sedikit terjadi. Panas hidrasi yang dilepaskan selama periode ini sangat kecil, karena proses hidrasi berlangsung sangat perlahan.

Pada tahap ini proses pengangkutan, penghamparan dan penyelesaian harus diselesaikan.

- **Tahap *hardening***

Pada periode awal di tahap ini beberapa hal terjadi, yaitu:

- Periode ini dimulai dengan proses pengikatan awal (*initial set*), yang ditandai dengan mulai meningkatnya panas hidrasi dan dimulainya proses pengerasan. Peningkatan panas ini merupakan ciri-ciri dari proses pengerasan dan mulai dikembangkannya kekuatan beton.
- Proses pengikatan akhir (*final set*) terjadi sebelum panas hidrasi yang tertinggi dilepaskan, dan pada tahap ini beton sudah cukup keras untuk dapat diinjak.
- Setelah tahap pengikatan akhir, tegangan pada beton mulai terjadi seiring dengan kondisi temperatur dan efek berkurangnya kelembaban di dalam beton. Pada periode ini pelat perkerasan beton mulai mengalami gesekan dengan lapis pondasi yang berada di bawahnya.
- Jika pada campuran beton digunakan bahan tambah mineral, maka proses kimia dengan bahan tambah mineral tersebut akan terjadi pada periode ini. Waktu pengikatan mungkin menjadi lebih lambat, panas hidrasi menurun dan dampaknya kekuatan awal beton naiknya terhambat khususnya jika tidak digunakan bahan tambah kimia.
- Periode ini diperkirakan berlangsung selama 2-4 jam, jika tidak digunakan bahan tambah.
- Pada periode ini kegiatan perawatan harus dilakukan.

- **Tahap *cooling***

Setelah proses pengikatan akhir (*final set*) terjadi dan panas hidrasi mencapai puncaknya, kemudian panas mulai menurun secara perlahan memasuki tahap pendinginan. Kekuatan beton terus meningkat, akan tetapi permukaan beton masih berpori dan hanya mampu dilalui oleh lalu lintas ringan. Pada periode ini tegangan yang terjadi dapat saja lebih besar dari kekuatan beton yang telah terbentuk, sehingga retak akan terjadi. Oleh karena itu, kegiatan penggergajian harus dilakukan selama periode ini.

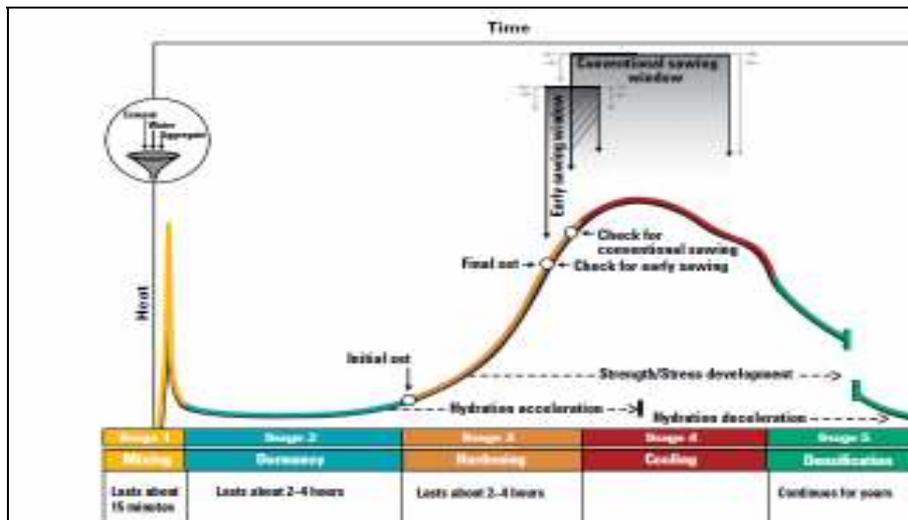
Lamanya periode ini berlangsung sulit untuk diperkirakan

- **Tahap *densification***

Tahap ini sangat penting untuk pencapaian kekuatan beton dan pengurangan *permeability* beton. Proses hidrasi dan pencapaian karakteristik beton yang direncanakan akan terus berlangsung secara perlahan selama senyawa kimia dan air masih tersedia.

Penggergajian sambungan pada perkerasan yang baru haruslah pada waktu yang tepat, yaitu dalam koridor penggergajian (*sawing window*) seperti ditunjukkan oleh pada grafik 5 dibawah ini.

Pada grafik 5 terlihat adanya 2 metoda penggergajian berdasarkan waktu, yaitu cara konvensional (*conventional sawing window*) dan cara penggergajian yang lebih awal (*early sawing window*). Pada cara penggergajian yang lebih awal (*early sawing window*) ,titik awal penggergajian tepat setelah masa pengikatan akhir dan berakhir beberapa waktu sebelum tercapainya puncak panas hidrasi (pada tahap *cooling*). Sedangkan cara konvensional (*conventional sawing window*) dimulai pada titik pengikatan akhir dan berakhir pada periode *cooling*. Akan tetapi, tidak mudah untuk mengetahui kapan periode *cooling* berakhir.



Gambar 5. Karakteristik beton berdasarkan tingkat hidrasi (Taylor et al.,2006)

Masa pengeringan bergantung pada banyak faktor dan berbeda pada tiap proyek, bahkan pada tiap hari pelaksanaan. Faktor-faktor yang mempengaruhi masa pengeringan yaitu:

- Campuran beton (faktor air semen, bahan tambah yang digunakan, agregat)
- Cuaca (angin, temperatur)
- Lapis pondasi (faktor friksi, bond breaker, tingkat kekeringan permukaan)
- Lain-lain (masalah *curing*, dll)

Berdasarkan penjelasan diatas, penetapan masa pengeringan yang menyebutkan tidak kurang dari 4 jam dan tidak lebih dari 12 jam adalah kurang tepat karena banyak faktor yang mempengaruhi proses hidrasi di dalam beton, baik faktor internal maupun faktor eksternal. Sebaiknya persyaratan yang ditetapkan adalah kriteria kondisi beton yang telah cukup mengeras dimana telah terjadi pengikatan akhir (*final set*), dan jika

periode penggergajian akan dicantumkan disarankan hanya sebagai catatan saja.

Beberapa cara yang dapat digunakan untuk membantu menentukan waktu penggergajian, yaitu :

- *Scratch Test* (Saraf 1985)
- Indikasi akhir waktu penggergajian dapat ditandai dari temperatur beton yang mulai menurun.
- Concrete maturity testing
- *Menggunakan program HIPERPAV dari FHWA.*

### ***Scratch Test***

Cara ini merupakan panduan praktis di lapangan untuk mengetahui apakah perkerasan sudah tepat waktunya untuk mulai di gergaji. Gores permukaan perkerasan dengan menggunakan paku atau pisau, jika permukaan beton telah cukup keras maka goresan tidak akan dalam dan sambungan dapat digergaji. Akan tetapi, jika goresan masih dapat membuat permukaan bergerak, maka penggergajian belum boleh dilakukan.

### **Indikasi menurunnya temperatur beton**

Menurunnya temperatur beton menunjukkan bahwa proses pengikatan akhir terjadi. Untuk mengetahui menurunnya temperatur perkerasan beton, hanya diperlukan pemantauan secara kontinu terhadap temperatur beton.

### ***Concrete maturity testing***

Metode ini digunakan untuk mengetahui kekuatan beton ditempat dengan cara tidak merusak, yang dapat dijadikan dasar untuk memperkirakan waktu penggergajian, lamanya masa perawatan dan juga pembukaan untuk lalu lintas. Prosedur pengujian dilakukan sesuai ASTM C 1074, dasar dari metode ini adalah tingkat hidrasi pada campuran beton merupakan fungsi dari waktu dan temperatur.

- Untuk mendapatkan grafik *maturity*, diperlukan sekitar 15 buah benda uji yang diambil dari campuran di lapangan. Benda uji tersebut harus tetap dirawat, dan lakukan pengujian pada umur 1, 3, 5 dan 7 hari. Temperatur pelat beton diukur dipantau dengan menggunakan sensor yang disisipkan pada pelat beton. Temperatur beton harus dicatat bersamaan dengan waktu pengujian benda uji. Kemudian buat grafik hubungan kekuatan beton (sumbu y) dengan temperatur (sumbu x).
- Prakiraan kekuatan beton di tempat; untuk mengetahui kekuatan beton di lapangan, dapat digunakan maturity model Nurse-Saul atau Arrhenius model yang merupakan model matematika yang menggambarkan hubungan waktu-temperatur dan kekuatan beton, dan untuk mempermudah perhitungan diperlukan perangkat lunak komputer di mana dengan memasukkan data waktu, temperatur lapangan dan kekuatan hasil pengujian laboratorium dapat diperoleh besaran kekuatan beton di lapangan.

### 3.5 Perawatan (*Curing*)

Dalam melakukan tindakan perawatan ada tahapan-tahapan yang harus diperhatikan. ACI 308 R – 01 menetapkan adanya 2 tahap masa perawatan, yaitu:

1. *Initial curing period* (periode awal perawatan); merupakan waktu sejak beton mulai dihampar sampai *final curing period* (periode akhir perawatan) dilakukan.
2. *Final curing period* (periode akhir perawatan): waktu dimana prosedur final curing dilaksanakan sampai aktivitas kegiatan perawatan dihentikan. Tujuan dari periode ini adalah untuk menjaga agar air yang dibutuhkan dapat terjaga dan proses hidrasi berlanjut sampai beton mencapai kekuatan yang direncanakan.

### **Initial Curing period (periode awal perawatan)**

Pada periode awal perawatan tindakan hanya akan dilakukan untuk mencegah kehilangan air secara berlebihan dari campuran beton yang dapat menyebabkan terjadinya retak susut. Hal utama yang dilakukan selama periode ini adalah memantau kecepatan penguapan air permukaan, dan untuk mengetahui besarnya kecepatan penguapan dapat dilakukan dengan menggunakan Nomogram dari ACI 308 atau rumus kecepatan penguapan yang ditunjukkan di bawah ini.

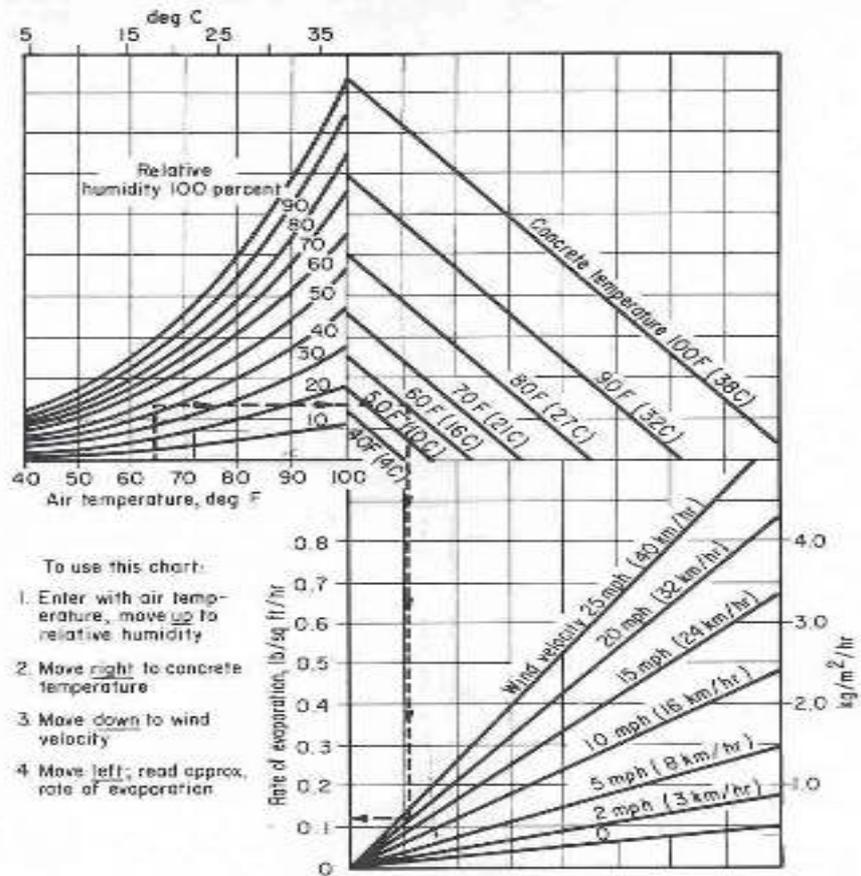
Hasil penelitian yang dilakukan Menzel menunjukkan bahwa faktor yang paling dominan terhadap kecepatan penguapan air permukaan adalah kecepatan angin dan temperatur beton dan hal tersebut dikuatkan oleh Poole (2006).

$$ER = 4.88 \left\{ 0.1113 + 0.04224 \left( \frac{WS}{0.447} \right) \right\} (0.0443) \left( e^{0.0302(CT-1.8)+32} \right) - \left( \frac{RH}{100} \right) \left( e^{0.0302(AT-1.8)+32} \right)$$

Di mana:

- ER : tingkat penguapan (kg/m<sup>2</sup>/h)
- WS : kecepatan angin (m/s),
- CT : temperatur beton (°C),
- AT : temperatur udara (°C), dan
- RH : kelembaban relatif (%).





Gambar 6. Nomograph ACI 308 Tingkat Penguapan

Menurut ACI 308, jika tingkat penguapan  $> 0,5 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ , permukaan beton perlu mendapat perhatian serius. Sedangkan jika tingkat penguapan  $> 1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  maka harus dilakukan tindakan perlindungan agar perkerasan beton tidak mengalami kerusakan dikarenakan susut.

USACE TM 5-82 menetapkan bahwa pelaksanaan penghamparan beton tidak boleh dilakukan jika perkiraan tingkat penguapan  $> 1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ .

Ketentuan mengenai batasan-batasan tingkat penguapan seperti yang dikemukakan diatas tidak terlalu tepat diterapkan pada beton masa kini yang cenderung mempunyai  $w/c < 0,4$ . Disarankan batasan yang lebih rendah yaitu  $0,50 - 0,75 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ .

Delatte (2008) menyarankan sebelum pelaksanaan penghamparan lapisan perkerasan beton, agar dilakukan prakiraan tingkat penguapan yang akan terjadi. Jika hasil prakiraan menunjukkan tingkat penguapan akan melampaui batasan yang diizinkan, maka dapat dilakukan pencegahan kerusakan karena susut, misalnya dengan memindahkan waktu penghamparan beton.

Harus juga diperhatikan jika kecepatan penguapan *bleed water* lebih besar dari kecepatan *bleeding*, maka permukaan beton yang paling atas akan mulai kering dan susut yang berpotensi menyebabkan kerusakan karena susut (*plastic shrinkage cracking*).

$$\text{Bleed Rate} = [0.051 * w / \text{cm} - 0.015] * T$$

Di mana:

$w/\text{cm}$  = *ratio* air terhadap semen

$T$  = tebal pelat beton, cm

untuk mengurangi kecepatan penguapan beton pada periode awal perawatan dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

- Penggunaan peralatan untuk melindungi beton dari angin dan pengkabutan dengan air.
- Penggunaan es dan nitrogen cair
- Penggunaan *evaporation reducers* (*evaporation retarders*).

Metode yang pertama tidak praktis digunakan pada proyek berskala besar karena membutuhkan peralatan dan tenaga kerja yang tidak sedikit. Sedangkan metode yang kedua bertujuan untuk mengurangi temperatur

beton, yaitu dengan menambahkan es pada air untuk campuran beton, sehingga temperatur beton menurun. Pada daerah dengan temperatur yang tinggi, penggunaan nitrogen cair yang ditambahkan pada truk pencampur beton telah terbukti sangat efektif untuk mengurangi temperatur beton.

*Evaporation reducers* merupakan produk baru tetapi sudah cukup dikenal dan terbukti cukup efektif mengurangi kecepatan penguapan sampai 65%. Penerapan *evaporation reducers* menggunakan peralatan dan cara yang sama dengan penerapan *curing compound*. Hanya bahan pembentuknya yang berbeda. Jika keadaan cukup mengkhawatirkan, dimana angin, temperatur beton dan temperatur udara tinggi, maka *evaporation reducers* dapat diterapkan berulang kali.

### **Final Curing period (Periode akhir perawatan)**

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam pelaksanaan *curing*:

- Pemilihan metode *curing*
- Pemilihan bahan *curing*
- Lamanya pelaksanaan *curing*
- Pengujian efektifitas *curing*

### **Pemilihan metode *curing***

Ada beberapa metode *curing* yaitu:

- *Curing compound*
- *Water added* (cara pembasahan)
- *Water retentive* (penggunaan lapisan pelindung)

Metode perawatan dengan pembasahan dan penggunaan bahan pelindung cocok untuk proyek berskala kecil, meskipun untuk perkerasan beton dengan  $w/c < 0,4$  metoda pembasahan adalah yang paling efektif akan tetapi untuk proyek berskala besar sulit untuk diterapkan. Dari ketiga metode yang disebutkan di atas, metode *curing compound* merupakan

metode perawatan yang paling praktis dan ekonomis untuk proyek yang berskala besar.

### **Pelaksanaan Curing**

Waktu yang paling tepat untuk menyemprotkan *curing compound* adalah setelah pengikatan awal (*initial setting*), karena proses kimia sedang berlangsung dan beton plastis mulai berubah bentuk menjadi keras.

*Pada umumnya pedoman penggunaan curing menetapkan pelaksanaan curing dilakukan setelah air permukaan tidak mengkilap, demikian juga dengan spesifikasi 2010.*

Pada masa kini beton untuk perkerasan cenderung dibuat dengan w/c yang rendah, dan kilap permukaannya umumnya tidak terlihat setelah dilakukan penghamparan meskipun air permukaannya (*bleed water*) sebenarnya masih akan naik ke permukaan. Demikian pula dengan beton yang dihampar menggunakan acuan gelincir (*slip form*) air permukaan hampir tidak terlihat pada saat penghamparan dilakukan.

Akan tetapi, ada juga dampak negatif penggunaan *curing compound* jika diterapkan segera setelah kilap permukaan menghilang, yaitu bahan *curing compound* dapat memperlambat bahkan menghentikan penguapan air permukaan. Air permukaan ini akan berakumulasi di bawah lapisan curing atau bercampur dengan *curing compound*, dan menyebabkan kerusakan berupa spalling mortar pada permukaan beton.

### **Lamanya Masa Perawatan (curing)**

*Pada spesifikasi ditetapkan bahwa: Lapisan perawatan harus dipertahankan utuh dalam bentuk selaput yang menerus dan tidak patah sampai kekuatan lapangan sebesar 300kg/cm<sup>2</sup> dicapai. Setiap kerusakan selaput perawatan (curing membrane) harus diperbaiki dengan penyemprotan manual pada lokasi yang cacat.*

ACI 325.9 R (*Guide for Construction of Concrete Pavements and Concrete Bases*) adalah 7 hari, pada temperatur  $> 4^{\circ}\text{C}$ . Akan tetapi, jika kuat tekan beton (*compressive strength*) telah mencapai 70%, maka perawatan dapat dihentikan.

AASHTO menetapkan lamanya waktu perawatan adalah 3 hari, dan 10 hari jika digunakan bahan tambah mineral  $>10\%$ . Dan seperti ACI, AASHTO juga memberikan pilihan jika kuat tekan beton telah mencapai 70% maka kegiatan perawatan dihentikan.

Pendekatan paling tepat untuk menentukan lamanya waktu perawatan adalah berdasarkan tingkat kekuatan yang dicapai beton. Hal ini dikarenakan kekuatan beton merupakan ukuran dari tingkat hidrasi yang terjadi didalam beton,serta pencapaian dari sifat-sifat beton yang dicapai. Oleh karena itu, sebaiknya pada spesifikasi penentuan lamanya masa perawatan adalah dicapainya kekuatan beton 70%.



# 4

## KESIMPULAN

### 4.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari kajian ini adalah:

- Persyaratan untuk kehilangan abrasi agregat pada spesifikasi sebesar maksimal 25 % harus ditinjau ulang.
- Persyaratan bentuk partikel agregat sebaiknya hanya ditentukan 1 nilai saja, yaitu rasio 3:1 maksimal 25%.
- Persyaratan kekuatan beton minimum pada spesifikasi sebaiknya dicantumkan hanya satu nilai kekuatan beton, yaitu kuat lentur minimum..
- Ketentuan penggunaan jumlah pasir alam dan kadar semen dalam campuran beton sebaiknya tidak dibatasi, karena merupakan bagian dari rancangan campuran.
- Batasan penggunaan abu terbang tergantung pada penggunaannya
- Untuk bahan pemecah ikatan (*bond breaker*) selain plastik dapat juga digunakan, aspal emulsi, geotekstil atau *curing membrane*.
- Ketentuan penghentian waktu perawatan sebaiknya disyaratkan setelah beton mencapai kuat tekan 70%.
- Ketentuan yang mengenai waktu penggergajian adalah kriteria perkerasan beton setelah beton mengalami pengikatan akhir,

ditunjukkan dengan kondisi beton yang sudah cukup mengeras. Jika pada spesifikasi dicantumkan batasan waktu, itu hanya sebagai catatan untuk membantu saja.

## 4.2 Saran

- Perlu dilakukan pengujian laboratorium untuk menguatkan penetapan ketentuan-ketentuan pada spesifikasi
- Perlu dilakukan lebih banyak pengamatan lapangan



# DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials, *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Offices, 1993
- Affandi, F. *Pengaruh penyimpangan ketebalan dan mutu pelat beton pada perkerasan beton semen (perkerasan kaku)*; Jurnal Litbang Jalan. Volume 21 No 1, . 2004
- A.M.Neville, *Properties of concrete*, 4th and final edition, Pearson –Prentice hall, 2002,
- Day Ken D., *Concrete Mix Design, Quality Control and Spesification*, Taylor and Francis, 2006.
- Delatte N., *Concrete Pavement Design, Construction and Performance*, Taylor and Francis, 2008,
- Departemen Perumahan dan Prasarana wilayah, *Pedoman Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen. (Pd T – 14 - 2003)*
- Griffiths, G. And Thom N., *Concrete Pavement Design Guidance Notes*, Taylor and Francis. 2007,
- Krebs R.D. and Walker R.D, 1971, *Highway Material*, McGraw-Hill.
- Kementerian Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Bina Marga; *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan*, 2010
- Mindess S, et. al, *Concrete*, Prentice Hall, 2003,

Poole, T.S., *Guide for Curing of Portland Cement Concrete Pavements*, Volume II, FHWA Publication No. HRT-05-038, Turner Fairbank Highway Research Center, McLean, VA, August, 2006.

Ramachandran V.S., *Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology*, 2nd ed. Noyes Publication 1995.

Taylor P.C., Kosmatka S.H., Voigt G.F., et al., *Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement*, 2006, FHWA Report.





