

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1. Landasan Teori**

##### **2.1.1. Definisi *Paving Block***

Menurut SNI 03-0691-1996 tentang Bata Beton (*Paving Block*) adalah suatu komposisi bahan bangunan yang di buat dari campuran semen portland atau bahan perekat hidrolis sejenisnya, air dan agregat dengan atau tanpa bahan tambah lainnya yang tidak mengurangi mutu bata beton itu.

##### **2.1.2. Persyaratan Mutu *Paving Block***

Kekuatan *paving block* tergantung pada perbandingan adukan dan disesuaikan dengan kebutuhan pekerjaan. Tidak ekonomis apabila membuat *paving block* lebih kuat dari yang dibutuhkan. Berikut ini adalah faktor-faktor yang mempengaruhi mutu *paving block* :

###### 1) Semen

Semen adalah faktor yang paling penting mempengaruhi kebutuhan dasar *paving block*. Semen haruslah baru dan diperhatikan tempat penyimpanannya supaya tidak menggumpal (Resniyanto, 2012).

###### 2) Perbandingan Air – Semen

Kekuatan *paving block* akan menurun dengan menurunnya perbandingan air-semen (FAS). Hal ini disebabkan penurunan nilai FAS akan membuat semen tidak mengalami hidrasi (proses pengikatan) secara sempurna, sedangkan nilai FAS yang terlalu tinggi akan meninggalkan banyak pori pori (kekosongan) setelah penguapan. Semakin banyak kekosongan maka akan semakin tidak kuat (Resniyanto, 2012).

Timbulnya pori-pori karena faktor air semen yang tinggi disebabkan akibat pasta semen yang menjadi terlalu cair, dan fungsinya sebagai pengikat malah akan mengalir meninggalkan agregat dan menyebabkan pengendapan pasta semen di dasar (Ginting, 2015).

3) Pasir

Pasir harus bebas dari dedaunan, rumput, benda-benda asing, zat organik dan memiliki kadar lumpur yang kurang dari 5%. Pasir haruslah agak kasar dengan ukuran partikel mulai dari ukuran debu hingga 5 mm (Resniyanto, 2012).

4) Mesin cetak produksi khusus untuk *paving block*

Peralatan mesin cetak produksi juga dapat menentukan kekuatan *paving block* yang dihasilkan. Semua bergantung kepada kemampuan mesin dalam memberikan tekanan pada proses pencetakan. Pada umumnya di Indonesia terdapat 3 jenis *paving block* bila dibedakan dari alat dan proses produksinya, yaitu *paving block press* tangan, *paving block press* mesin vibrasi, dan *paving block press* mesin hidrolik (Resniyanto, 2012).

*Paving block* yang baik menurut SNI 03-0691-1996 haruslah memenuhi syarat pengujian sifat tampak, ukuran dan bentuk, serta sifat fisika.

#### **2.1.2.1. Sifat Tampak**

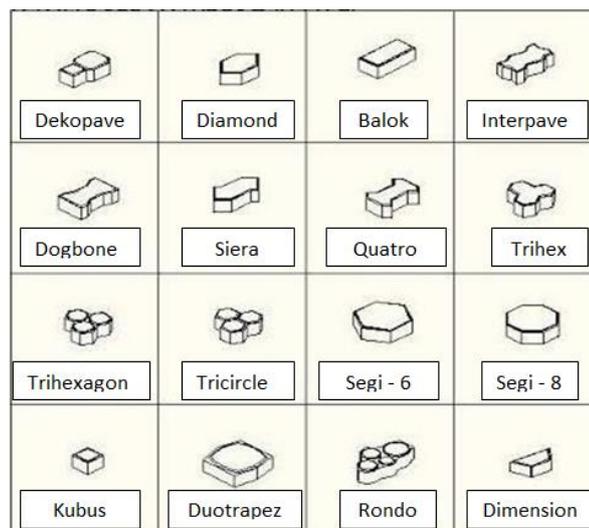
Menurut SNI 03-0691-1996 *paving block* harus mempunyai permukaan yang rata, tidak terdapat retak-retak dan cacat, bagian sudut dan rusuknya tidak mudah direpihkan dengan kekuatan jari tangan.

### 2.1.2.2. Ukuran

Dalam SNI 03-0691-1996 *paving block* harus memiliki ukuran ketebalan minimal 60 mm dengan toleransi  $\pm 8\%$ . Tetapi menurut Rommel (2007) menyatakan bahwa ketebalan yang sering digunakan dalam pembuatan *paving block* adalah :

1. Tebal 6 cm ; untuk beban lalu lintas ringan dengan frekuensi terbatas, misal pejalan kaki, sepeda motor, dan kadang-kadang dilalui oleh sedan.
2. Tebal 8 cm ; untuk beban lalu lintas berat dengan frekuensi padat, misal sedan, bus dan truk.
3. Tebal  $\leq 10$  cm; untuk beban lalu lintas super berat, misal *crane* dan *loader*.

Sedangkan untuk toleransi *paving block* menurut ASTM C 936-82 antara lain untuk panjang  $\pm 2$  mm, lebar  $\pm 2$  mm, dan tebal  $\pm 3$  mm (*Specification For Precast Concrete Paving Block*). Selain ukuran *paving block*, dipasaran juga memiliki banyak bentuk diantaranya seperti yang ada pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1. Macam – Macam Bentuk *Paving Block***  
(<https://goo.gl/images/i12GzS>, 2016)

### 2.1.2.3. Sifat Fisika

Berdasarkan SNI 03-0691-1996 *paving block* harus memiliki sifat-sifat fisika seperti yang ada pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1. Standarisasi Mutu *Paving Block***

Jenis	Kuat Tekan (Mpa)		Ketahanan Aus		Penyerapan Air (Rata - rata Max)
	Rata - rata	Min.	Rata – rata	Min.	
A	40	35	0,090	0,103	3
B	20	17	0,130	0,149	6
C	15	12,5	0,160	0,184	8
D	10	8,5	0,219	0,251	10

*SNI 03-0691-1996*

Dari data Tabel 2.1, maka menurut SNI 03-0691-1996 setiap kelas mutu memiliki klasifikasi penggunaannya tersendiri, antara lain:

- a) Bata Beton mutu A : digunakan untuk jalan
- b) Bata Beton mutu B : digunakan untuk pelataran parkir
- c) Bata Beton mutu C : digunakan untuk pejalan kaki
- d) Bata Beton mutu D : digunakan untuk taman dan penggunaan lain.

Dibawah ini adalah penjelasan tentang sifat-sifat fisika yang menjadi persyaratan mutu *paving block* dan faktor-faktor yang mempengaruhi nilainya.

#### 1. Kuat Tekan

Menurut SNI 03-1974-1990 tentang Metode Pengujian Kuat Tekan Beton, Kuat tekan adalah Besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Kuat tekan} = \frac{P}{L}$$

Keterangan : P = Beban tekan (N)

L = Luas bidang tekan (m<sup>2</sup>).

*Paving block* merupakan jenis mortar karena bahan utamanya hanya semen, pasir, dan air. Maka adapun faktor yang mempengaruhi kuat tekan mortar/ *paving block* yaitu (Afifah, 2014) :

a) Faktor air semen (FAS)

Faktor air semen adalah angka perbandingan antara berat air dan berat mortar semen dalam campuran mortar. Secara umum telah diketahui bahwa semakin tinggi nilai FAS maka akan semakin rendah mutunya dan sebaliknya. Namun nilai FAS yang terlalu rendah akan menyebabkan kesulitan dalam pengerjaan pemadatan yang menyebabkan mutunya akan menurun.

b) Jumlah semen

Mortar dengan jumlah semen yang banyak belum tentu memiliki kuat tekan yang tinggi. Hal ini disebabkan jumlah air yang banyak menyebabkan kandungan pori lebih banyak dari pada mortar. Kandungan pori inilah yang mengurangi kekuatan mortar.

c) Umur Benda Uji

Kekuatan mortar akan meningkat seiring dengan bertambahnya umur dimana pada umur 28 hari pasta/ mortar akan memperoleh kekuatan yang diinginkan.

d) Sifat Agregat Halus (Pasir)

Kadar lumpur, kekerasan, dan modulus halus butir pada agregat berpengaruh pada kekuatan. Bentuk dari agregat akan berpengaruh terhadap *interlocking* antar agregat.

## 2. Ketahanan Aus

Keausan terjadi apabila dua buah benda yang saling menekan dan saling bergesekkan yang menyebabkan hilangnya partikel-partikel pada benda yang lebih lunak. Faktor yang mempengaruhi keausan adalah (W.Tarina dkk, 2012) :

### a) Kecepatan

Semakin besar kecepatan relatif benda yang bergesekan, maka tingkat keausan akan semakin tinggi.

### b) Tekanan

Sama halnya pada kecepatan, semakin besar tekanan material diatasnya maka keausan akan semakin tinggi.

### c) Kekasaran permukaan dan kekasaran material

Permukaan yang kasar akan menyebabkan lebih besarnya terjadi gesekan yang mengakibatkan tingkat keausan yang tinggi.

Ketahanan aus dihitung dengan menggunakan persamaan (Wikana dan Gulo, 2012) :

$$\text{Ketahanan aus} = \frac{S \times 10}{\rho_{pv} \times L \times t}$$

Keterangan :

S = Selisih berat sebelum dan setelah diauskan (gr)

$\rho_{pv}$  = Berat jenis satuan *paving block* ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

L = Luas penampang *paving block* ( $\text{cm}^2$ )

t = Waktu penggoresan yang dilakukan pada benda uji (dalam 6 menit)

### 3. Penyerapan air

Penyerapan air adalah persentase berat air yang mampu diserap oleh beton.

Penyerapan air dihitung sebagai berikut (SNI 03-0691-1996):

$$\text{Penyerapan air} = \frac{A-B}{B} \times 100\%$$

Keterangan : A = Berat bata beton basah (kg)

B = Berat bata beton kering (kg)

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya penyerapan air pada beton, antara lain (Syamsuddin dkk, 2011) :

#### a) Faktor Air Semen

Faktor air semen yang tinggi, maka kadar air yang ada pada campuran juga tinggi dan dapat mengakibatkan nilai penyerapan yang tinggi pula.

#### b) Susunan Butir (Gradasi) Agregat

Agregat yang bergradasi baik relatif mempunyai nilai penyerapan air yang lebih kecil. Hal tersebut disebabkan celah-celah yang ada diantara butiran yang lebih besar dapat terisi oleh butiran kecil yang dapat membentuk massa yang padat setelah dicampur dengan semen dan air.

### 2.1.3. Bahan Penyusun *Paving Block*

Bahan utama penyusun *paving block* terdiri dari agregat halus, air, dan semen. Bahan-bahan tersebut memiliki spesifikasi persyaratan bahan bangunan yang baik sesuai dengan standar SNI 03-6861.1-2002.

### 2.1.3.1. Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi ‘alami’ batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir sebesar 5 mm. Adapun syarat pasir yang baik diantaranya adalah :

1. Berbutir tajam dan keras, dengan indeks kekerasan  $\leq 2,2$ .
2. Bersifat kekal, yaitu tidak mudah lapuk dan hancur oleh perubahan cuaca seperti terik matahari dan hujan.
3. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% dari berat keringnya. Yang diartikan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0,06 mm. Apabila kadar lumpur melampaui 5%, maka agregat halus harus dicuci.
4. Tidak boleh mengandung bahan-bahan organis terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams-Herder. Paling maksimal zat organik pasir harus berada di no.3.
5. Susunan besar butir agregat halus harus mempunyai modulus kehalusan antara 1,5 – 3,8 dan harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya. Apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan, harus masuk salah satu dalam daerah susunan butir menurut zona 1, 2, 3, atau 4 (SKBI/BS.882) dan harus memenuhi syarat – syarat sebagai berikut :
  - (1) Sisa di atas ayakan 4,8 mm, harus maksimum 2% berat;
  - (2) Sisa di atas ayakan 1,2 mm, harus maksimum 10% berat;
  - (3) Sisa di atas ayakan 0,3 mm, harus maksimum 15% berat.

6. Tidak boleh menggunakan pasir laut, kecuali dengan petunjuk *staff* ahli, karena pasir laut mengandung garam yang dapat merusak beton/ baja tulangan.

#### **2.1.3.2. Air**

Air diperlukan pada pembuatan produk beton untuk memicu proses kimiawi semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Karena pasta semen merupakan hasil reaksi kimia antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total berat campuran yang penting, tetapi justru perbandingan air dengan semen atau yang biasa disebut faktor air semen. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak tercapai seluruhnya, sehingga akan mempengaruhi kekuatan beton (Trimulyono, 2003 : 51).

Untuk bereaksi dengan semen portland, air yang diperlukan hanya sekitar 25 – 30 persen saja dari berat semen. (Tjokrodimuljo, 2007 : 50)

Persyaratan air sebagai bahan bangunan, sesuai dengan penggunaannya harus memenuhi syarat sebagai berikut (SNI 03-6861.1-2002) :

1. Air harus bersih.
2. Tidak mengandung lumpur, minyak dan benda-benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
3. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram/liter.
4. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
5. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/ liter.
6. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter

### 2.1.3.3. Semen

Menurut SNI 15-2049-2004 Semen Portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Bahan baku pembentuk semen adalah kapur (CaO), silika (SiO<sub>2</sub>), alumumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), oksida besi (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Tjokrodimuljo, 2007 : 8).

#### a. Komposisi dan Sifat Kimia Semen

**Tabel 2.2. Susunan Oksida Semen Tiga Roda**

No.	Bahan	Kadar
1	CaO	76,46 %
2	SiO <sub>2</sub>	5,86 %
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,16 %
4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,91 %
5	MgO	0,86 %
6	K <sub>2</sub> O	2,99 %
7	SO <sub>3</sub>	1,36 %
8	CO <sub>2</sub>	7,40 %

Sumber : Data hasil uji pendahuluan

Di dalam semen, oksida-oksida tersebut tidak terpisah satu dari yang lainnya melainkan membentuk senyawa-senyawa yang disebut senyawa semen. Empat senyawa yang biasanya dianggap sebagai unsur pokok utama dari semen terdaftar pada Tabel 2.3 disertai dengan singkatan simbolnya.

**Tabel 2.3. Senyawa Utama Semen Portland**

Nama Senyawa	Komposisi Oksida	Singkatan/Symbol	Fungsi
Trikalsium Silikat	3CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	Kekuatan awal

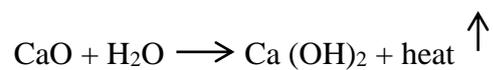
Dikalsium Silikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Kekuatan akhir
Trikalsium Aluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	kekuatan yang sangat awal yang hidrasinya masih rendah dan masih belum tahan terhadap sulfat
Tetrakalsium Aluminofe	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{F}$	Berpengaruh pada warna

Sumber : George Earl Troxell, *Composition & Properties of Concrete*

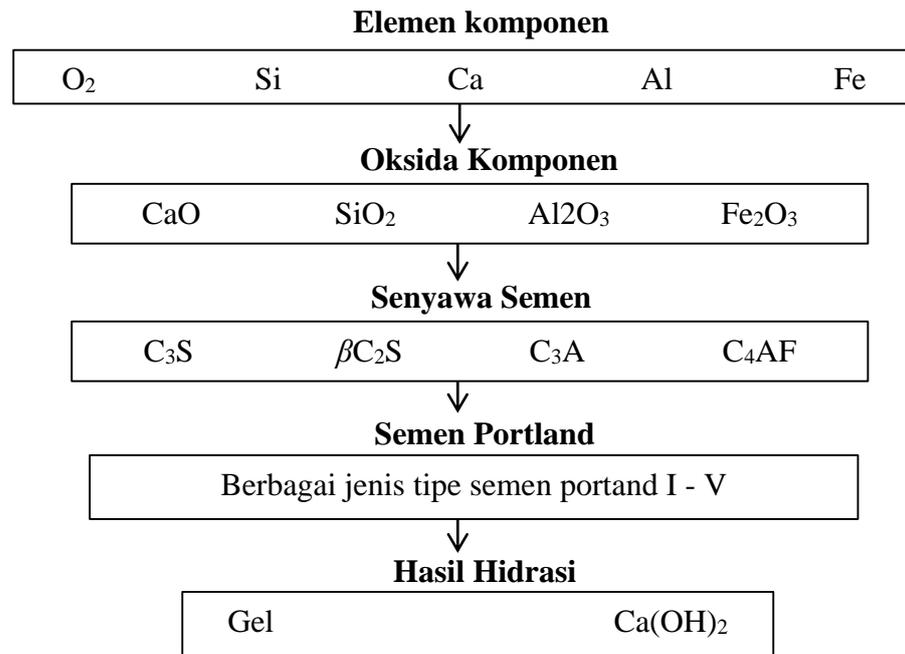
Notasi singkat ini digunakan oleh ahli kimia semen untuk menjelaskan masing-masing oksida dengan satu huruf, yaitu  $\text{CaO} = \text{C}$ ;  $\text{SiO}_2 = \text{S}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ ; dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$  serta juga  $\text{H}_2\text{O}$  pada pengerasan semen dinotasikan oleh H.  $\text{C}_3\text{S}$  yang biasanya ada dalam jumlah yang paling besar, terjadi pengecilan butir dan butir berwarna sama. Pada pendinginan dibawah  $1250^\circ\text{C}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$  terurai secara perlahan, tetapi apabila pendinginan tidak terlalu lambat,  $\text{C}_3\text{S}$  tetap tidak akan berubah dan relatif stabil pada temperatur biasa.  $\text{C}_2\text{S}$  diketahui memiliki tiga atau bahkan mungkin empat bentuk. Seperti  $\alpha\text{-C}_2\text{S}$  yang ada pada temperatur tinggi lalu berubah ke bentuk  $\beta$  pada suhu kira-kira  $1450^\circ\text{C}$ .  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  mengalami inversi lanjutan ke  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  pada suhu sekitar  $670^\circ\text{C}$ , tetapi pada laju pendinginan semen yang ada dipasaran  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  diawetkan dalam klinker. Bentuk  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  yang berbentuk bulat menandakan kemunculan ganda.  $\text{C}_3\text{A}$  membentuk kristal persegi, tetapi  $\text{C}_3\text{A}$  dalam pembekuan kaca membentuk sebuah fase celah amorf.  $\text{C}_4\text{AF}$  benar-benar larutan padat mulai dari  $\text{C}_2\text{F}$  sampai pada  $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$ , akan tetapi penjelasan  $\text{C}_4\text{AF}$  adalah penyederhanaan senyawa yang paling sederhana dan mudah (Troxell, 1968).

Pada semen sendiri dari ketiga senyawa tersebut yang banyak berperan adalah oksida  $\text{CaO}$  (Kalsium Oksida). Secara kimia,  $\text{CaO}$  adalah

nama lain dari kapur kalsium. Dalam proses hidrasi dan pengerasan semen, kapur dan silika akan menjadi penyumbang kekuatan yang terbesar. Sedangkan alumina dan oksida besi akan lebih berfungsi untuk mengatur kecepatan proses hidrasi. Namun dalam proses produksi semen, terutama dalam proses pembakarannya, alumina dan oksida besi seringkali lebih ditentukan oleh kebutuhan untuk menghindari kesulitan produksi klinker pada suhu tinggi, dan bukan oleh kebutuhan komposisi kimianya. Sebagai bahan komersial, kapur dapat dilengkapi dalam bentuk kapur CaO atau kapur Ca(OH)<sub>2</sub>. Umumnya kapur terhidrasi dengan kelebihan air dan dalam bentuk pasta basah atau dempul. Kapur bereaksi cepat dengan air disertai dengan evolusi yang cukup panas :



Di semen portland, kapur sebagian besar dikombinasikan dalam bentuk silikat kalsium dan aluminat kalsium. Dibawah ini terdapat penjelasan skema pembentukan semen dari mulai masih membentuk unsur elemen kimia sampai menjadi pasta semen yang sudah bereaksi dengan air atau yang disebut hidrasi (Neville, 1991).



**Gambar 2.2 Skema Formasi dan Hidrasi Semen Portland**  
(A M Neville, *Properties of Concrete*)

Persentase senyawa dalam semen portland bisa dihitung dari persentase oksida-oksida semen yang sudah diketahui. Prosedur sistematis ini dalam bentuk persamaan yang disebut sebagai persamaan Bogue adalah seperti berikut :

$$\% \text{ C3S} = (4,071 \times \% \text{ CaO}) - (7,600 \times \% \text{ SiO}_2) - (6,718 \times \% \text{ Al}_2\text{O}_3) - (1,430 \times \% \text{ Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{ SO}_3)$$

$$\% \text{ C2S} = (2,876 \times \% \text{ SiO}_2) - (0,7544 \times \% \text{ C3S})$$

$$\% \text{ C3A} = (2,650 \times \% \text{ Al}_2\text{O}_3) - (1,692 \times \% \text{ Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\% \text{ C4AF} = (3,043 \times \% \text{ Fe}_2\text{O}_3)$$

Menurut SNI 15-2049-2004, persyaratan kimia semen portland harus memenuhi persyaratan seperti yang telah di jelaskan pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4. Syarat Kimia Utama Untuk Lima Jenis Semen Portland**

No	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO <sub>3</sub> , minimum	-	20%	-	-	-
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , maksimum	-	6%	-	-	-
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , maksimum	-	6%	-	6,5%	-
4	MgO, maksimum	6%	6%	6%	6%	6%
5	SO <sub>3</sub> , maksimum					
	Jika C <sub>3</sub> A ≤ 8%	3%	3%	3,5%	2,3%	2,3%
	Jika C <sub>3</sub> A > 8%	3,5%	-	4,5%	-	-
6	C <sub>3</sub> S, maksimum	-	-	-	35%	-
7	C <sub>2</sub> S, maksimum	-	-	-	40%	-
8	C <sub>3</sub> A, maksimum	-	8%	15%	7%	5%
9	C <sub>4</sub> AF + C <sub>2</sub> F, maksimum	-	-	-	-	25%
10	C <sub>3</sub> A, maksimum	-	-	-	8%	-
11	C <sub>3</sub> A, minimum	-	-	-	5%	-
12	Alkali, sebagai (Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O), maksimum	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%

Sumber : SNI 15-2049-2004

Apabila  $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} < 0,64$ , terbentuk larutan padat (C<sub>4</sub>AF + C<sub>2</sub>F) =

4CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tetapi karena hasil dari  $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} \geq 0,64$  yaitu

$\frac{2,16\%}{2,91\%} = 0,74$  ,maka persentase C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, dan C<sub>4</sub>AF dihitung

menggunakan persamaan bogue yang telah dipaparkan sebelumnya yaitu :

$$\begin{aligned} \text{C}_3\text{S} &= (4,071 \times 76,46\%) - (7,600 \times 5,86\%) - (6,718 \times 2,16\%) - (1,430 \times \\ &2,91\%) - (2,852 \times 1,36\%) = 2,4\% \end{aligned}$$

$$\text{C}_2\text{S} = (2,876 \times 5,86\%) - (0,7544 \times 2,4\%) = 0,15\%$$

$$\text{C}_3\text{A} = (2,650 \times 2,16\%) - (1,692 \times 2,91\%) = 0,008\%$$

$$\text{C}_4\text{AF} = (3,043 \times 2,91\%) = 0,09\%$$

Semen portland yang dipakai adalah semen portland jenis pertama yang keseluruhannya dari hasil tabel maupun perhitungan memenuhi syarat Semen portland jenis pertama Standar Nasional Indonesia (SNI 15-2049-2004).

b. Sifat Fisik Semen

**Tabel 2.5. Persyaratan Fisik Semen Portland Standar**

No	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	Kehalusan. Sisa diatas ayakan 0,09 mm maksimal % dari berat	10	10	10	10	10
2	Waktu pengikatan dengan alat vicat. Awal, min. menit Akhir, maks. Jam	45 8	45 8	45 8	45 8	45 8

Sumber : SNI 03-6861.1-2002

1. Kehalusan butir

Reaksi antara semen dan air dimulai dari permukaan butir-butir semen, sehingga makin luas permukaan butir-butir semen, maka makin cepat proses hidrasinya. Butir-butir semen yang halus akan menjadi kuat dan menghasilkan panas hidrasi yang lebih cepat dari pada semen dengan berbutir kasar. Paling sedikit 78% berat semen harus dapat lewat ayakan nomor 200 (lubang 0,075 mm). Namun perlu dicatat, bahwa jika butir-butir semen terlalu halus, sifat semen maka akan menjadi kebalikannya karena mudah terjadi hidrasi awal oleh kelembaban udara (Tjokrodimuljo, 2007 : 12).

2. Waktu Ikat Awal

Menurut SNI 03-6827-2002 waktu ikat awal adalah waktu yang diperlukan oleh pasta semen untuk mengubah sifatnya dari kondisi

cair menjadi padat. Sedangkan waktu ikat akhir adalah waktu dimana penetrasi jarum vicat tidak terlihat secara visual. Waktu ikat awal ditentukan dari grafik penetrasi waktu, yaitu waktu dimana penetrasi jarum vicat mencapai nilai 25 mm.

### 3. Berat jenis

Berat jenis semen adalah perbandingan antara berat isi kering semen pada suhu kamar dengan berat kerosin yang mempunyai berat jenis 62 API. Semen portland memiliki berat jenis kisaran 3,00 – 3,20 gram/ml. Berat jenis bukan merupakan petunjuk kualitas semen, nilai ini hanya digunakan dalam perbandingan campuran saja. Untuk mengetahui berat jenis maka digunakan rumus sebagai berikut

(Pedoman Pengujian Bahan Politeknik Negeri Bandung):

$$BJ = \frac{w}{(v2-v1)} \times d$$

Keterangan :

BJ = Berat Jenis (gram/ml)

W = Berat Semen Portland (gram)

V1 = Volume awal (ml)

V2 = Volume Akhir (ml)

d = Massa jenis air pada ruang yang tetap (1 gram/ml)

### c. Faktor Air Semen (FAS)

Tabel 2.6. adalah rentang faktor air semen sesuai dengan kekuatan rencana beton.

**Tabel 2.6. FAS Terhadap Kuat Tekan Rencana**

<i>Water/cement ratio</i>	<i>Converted strength as a percentage of initial unconverted strength (Mpa)</i>
0,3	56 - 63
0,35	55 - 61
0,45	26 - 43
0,55	20 - 35
0,65	12 - 30

Sumber : A M Neville, *Properties of Concrete*

#### 2.1.3.4. Kaca

Kaca adalah sebuah bahan yang mempunyai kandungan kimia silika yang tinggi. Selama beberapa tahun terakhir, telah diadakan penelitian untuk mengembangkan material baru seperti agregat kaca, di dalam bahan konstruksi. Disamping itu, terdapat sejumlah alasan dari segi lingkungan, diupayakan agar limbah kaca tidak terus bertambah dan memenuhi tempat-tempat pembuangan. Kaca yang dihaluskan hingga sangat halus memiliki karakteristik *pozzolanic* sehingga dapat dipakai sebagai pengganti parsial semen atau filler (Resdiyanto, 2012).

Dengan perkembangan teknologi maka beragam pula bentuk dan warna pada kaca. Dibawah ini merupakan jenis-jenis kaca komersial yang dikelompokkan menjadi beberapa golongan (Kasiati, 2011) :

1. **Silika Lebur**, kaca ini mempunyai ketahanan pada suhu panas yang lebih tinggi dibanding kaca lain. Selain itu kaca ini sangat transparan terhadap radiasi ultraviolet. Jenis kaca ini biasa digunakan untuk alat pengukur serapan cahaya di daerah ultraviolet dan sinar matahari oleh suatu senyawa (spektrometer UV-Visible).
2. **Alkali Silikat**, kaca ini dibuat dari pasir dan soda yang dicampur bersama-sama dan hasilnya disebut natrium silikat. Kaca ini banyak digunakan sebagai

adhesif dalam pembuatan kotak-kotak karton gelombang yang memberi sifat tahan api.

3. **Kaca Soda Gamping**, kaca ini merupakan 95% dari semua kaca yang dihasilkan. Kaca ini biasa digunakan untuk membuat segala macam bejana, kaca lembaran, jendela mobil, maupun barang pecah belah.
4. **Kaca timbal**, kaca ini mempunyai indeks refraksi dan depresi yang tinggi sehingga membuat kaca ini digunakan dalam bidang optik.
5. **Kaca Borosilikat**, kaca yang mengandung 10% - 20%  $B_2O_3$ , 80% - 87% Silika, dan kurang dari 10%  $Na_2O$ . Kaca ini digunakan untuk perabot laboratorium ataupun pipa lensa teleskop yang mempunyai stabilitas kimia yang tinggi.
6. **Kaca Khusus**, kaca yang digunakan untuk semua yang termasuk kaca khusus seperti kaca keselamatan, optik, kaca berwarna, dll. Komposisinya berbeda-beda sesuai hasil akhir yang diinginkan.
7. **Serat Kaca**, Kaca ini biasanya memiliki kandungan silika sekitar 55% dan alkali lebih rendah dengan ketahanannya terhadap cuaca.

Dari jenis-jenis kaca yang telah dipaparkan di halaman 23-24, maka jenis kaca yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis kaca soda gamping yang berasal dari barang pecah belah berupa botol kaca bening. Untuk kandungan oksida kimia yang terdapat dalam bubuk kaca itu sendiri yaitu seperti yang tertera pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.7. Kandungan Bubuk Kaca**

No	Oksida	Jumlah Oksida
1	CaO	18,98%
2	SiO <sub>2</sub>	45,01%
3	Na <sub>2</sub> O	36,01%

Sumber : Data Hasil Uji Pendahuluan

Pada oksida diatas yang paling tinggi kandungan kimianya dalam bubuk kaca adalah silika ( $\text{SiO}_2$ ). Secara kimia, silika adalah silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ). Karna memiliki kandungan silika yang tinggi dan mendapat perlakuan dihaluskan sampai menjadi bubuk yang membuat kaca bersifat *pozzolanic*. Suatu bahan yang bersifat *pozzolanic* bila berbentuk bahan halus dan bersama-sama dengan kapur padam akan mempunyai sifat mengikat. Penggunaan dari bubuk kaca yang bersifat *pozzolanic* ini juga dapat mengurangi rata-rata ukuran pori pada beton sehingga diperoleh permeabilitas beton yang lebih kecil (Nugroho, 2010).

## 2.2. Penelitian Relevan

Beberapa penelitian relevan yang menggunakan kaca sebagai pengganti sebagian semen ataupun filler pada produk beton lainnya yaitu antara lain:

- a. Nursyamsi, dkk pada tahun 2016 dari Departemen Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara dengan judul penelitian *Pemanfaatan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Tambah Dalam Pembuatan Batako*. Penelitian ini menggunakan serbuk kaca yang berasal dari botol-botol kaca sebagai bahan pengganti semen. Serbuk kaca yang digunakan terdiri dari dua jenis yaitu serbuk kaca lolos ayakan No. 100 tertahan ayakan No. 200 (BSK  $\phi 100 - \phi 200$ ) dan serbuk kaca lolos ayakan No. 200 (BSK  $< \phi 200$ ) dengan 6 macam komposisi campuran 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30% dari berat semen. Hasil penelitian menunjukkan seluruh BSK memenuhi syarat untuk penyerapan air bata beton pejal mutu I menurut SNI 03-0349-1989. Kuat tekan BSK 0% sebesar 95,289 kg/cm<sup>2</sup> dan kuat tekan tertinggi untuk penggantian semennya dengan bubuk kaca terdapat pada BSK  $< \phi 200$  persentase 20% sebesar 91,422 kg/cm<sup>2</sup>, sedangkan untuk persentase 20%

BSK  $\phi 100-\phi 200$  adalah  $75,022 \text{ kg/cm}^2$  dengan kata lain perbandingan antara BSK $\phi 100-\phi 200$  dan BSK $<\phi 200$  adalah 17,94%. Walaupun menurun tetapi pada BSK $<\phi 200$  persentase 20% masih tergolong dalam mutu I SNI 03-0349-1989 sama dengan mutu persentase 0%. Secara keseluruhan diketahui bahwa BSK $<\phi 200$  persentase 20% merupakan persentase paling baik untuk diaplikasikan selanjutnya.

- b. Handy Yohanes Karwur pada tahun 2013 dari Universitas Sam Ratulangi dengan judul penelitian *Kuat Tekan Beton Dengan Bahan Tambah Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen*. Menggunakan kaca dengan variasi penggunaan persentase 0%, 6%, 8%, 10%, 12%, dan 15% serbuk kaca. Pengujian dilakukan terhadap berat volume dengan menggunakan benda uji silinder 10/20 cm untuk umur 1 hari dan kuat tekan beton untuk umur 7, 14, dan 28 hari. Berat volume untuk semua variasi penggunaan serbuk kaca termasuk beton normal. Hasil dari kuat tekannya pada umur 28 hari pada persentase 0%, 6%, 8%, 10%, 12%, dan 15% secara berturut-turut adalah 26,23 Mpa; 27,69 Mpa; 29,15 Mpa; 31,07 Mpa; 27,12 Mpa; dan 24,13 Mpa. Beton dengan nilai kuat tekan tertinggi dicapai pada komposisi serbuk kaca 10% yaitu 31,1 Mpa. Sedangkan nilai kuat tekan terendah didapat pada komposisi kaca 15%.
- c. Arie Putra dkk pada tahun 2012 dari Universitas Riau dengan judul penelitian *Pengaruh Variasi Bentuk Paving Block Terhadap Kuat Tekan*. Perbandingan semen dan pasir yang digunakan adalah 1 : 2,857 dengan ukuran 20 x 10 x 8 cm dengan variasi bentuk balok dan segi enam. Didapat hasil kuat tekannya menggunakan mesin kuat tekan adalah 39,58 Mpa untuk bentuk balok dan 53,50 untuk bentuk segi enam. Kuat tekan

yang berbentuk segi enam mencapai mutu A, sedangkan yang berbentuk balok hampir mendekati mutu A karena *paving block* mutu A memiliki nilai kuat tekan 35 Mpa dan nilai kuat tekan rata-ratanya adalah 40 Mpa. Tetapi untuk nilai penyerapan airnya pada bentuk balok adalah 2,66% dan bentuk segi enam adalah 2,62% termasuk kedalam *paving block* mutu A.

- d. Endang Kasiati pada tahun 2011 dari Institut Teknologi Surabaya dengan judul penelitian *Pembuatan Paving Blok Dengan Menggunakan Semen Portland Dan Semen Pozzolan Dengan Bahan Tambahan Serbuk Kaca Dan Abu Batu*. Pada penelitian ini dibuat 6 komposisi campuran 5%, 10%, dan 15% bubuk kaca untuk pembuatan paving tersebut. Untuk lebih meningkatkan kuat tekan, akan digunakan juga abu batu. Untuk bahan pengikat dipakai semen portland pada 3 komposisi awal dan 3 komposisi lainnya yaitu : \*PC 30% : PS 45% : Serbuk Kaca 5% : Abu Batu 20%, \*PC 30% : PS 45% : Serbuk Kaca 10% : Abu Batu 15%, \*PC 30% : PS 45% : Serbuk Kaca 15% : Abu Batu 10%, dan \*PPC 30% : PS 45% : Serbuk Kaca 5% : Abu Batu 20%, \*PPC 30% : PS 45% : Serbuk Kaca 10% : Abu Batu 15%, \*PPC 30% : PS 45% : Serbuk Kaca 15% : Abu Batu 10%. Dari hasil yang didapat kuat tekan terbesar adalah *paving block* dengan komposisi PC 30% : PS 45% : Serbuk Kaca 15% : Abu Batu 10%. *Paving block* ini menghasilkan kuat tekan maksimal 38,47 Mpa ketika berumur 28 hari dan masuk *paving block* kelas mutu B sesuai SNI 03-0691-1996 yang dapat dipakai untuk pelataran parkir.

### **2.3. Kerangka Berpikir**

Sejalan dengan meningkatnya kegiatan pembangunan dan banyaknya penggunaan *paving block* sebagai bahan bangunan, perlu dilakukan upaya untuk

mendapatkan bahan pengganti sebagian semen yang dapat digunakan dalam pembuatan *paving block*. Penggantian semen ini dirasa perlu dilakukan mengingat dalam pembuatan semen menghasilkan banyak residu yang mencemari lingkungan. Salah satu alternatif bahan pengganti semen yang mungkin dimanfaatkan adalah limbah botol kaca.

Kaca merupakan limbah yang sangat sulit diuraikan, butuh 1 sampai 2 juta tahun lama penguraiannya. Dengan menjadikan kaca sebagai bahan pengganti atau bahan penambah semen maka akan merubah bentuknya menjadi bubuk bukan bentukan padat lagi. Kaca juga dijadikan bahan pengganti sebgai semen dikarenakan kandungan silikanya yang tinggi, sedangkan pada proses hidrasi kapur dan silika adalah senyawa yang paling berperan aktif pada proses tersebut. Hal tersebut dikarenakan kaca yang dihaluskan akan memiliki sifat *pozzolanic* yang apabila dicampur dengan semen portland maka saat proses hidrasi yang menghasilkan karbon hidroksida  $[Ca(OH)_2]$  akan bereaksi juga dengan kandungan silika yang ada pada bubuk kaca yang membuatnya berubah menjadi kalsium silikat. Kalsium silikat akan menghasilkan gel CSH yaitu senyawa kimia yang berpengaruh terhadap kekuatan pasta yang juga akan mempengaruhi pada kekuatan *paving block*.

Pemanfaatan bubuk kaca untuk pengganti atau penambah pada proses pembuatan bahan bangunan ataupun struktur sudah banyak dilakukan. Misalnya, Kasiati (2011) mengenai pembuatan *paving block* dengan dua jenis semen, yaitu semen portland dan semen pozzolan yang keduanya sama sama ditambahkan serbuk kaca dan abu batu. Setelah itu Karwur (2013) mengenai pembuatan beton yang ditambahkan serbuk kaca sebagai substitusi parsial semennya untuk melihat

mutu kuat tekannya. Dan yang paling baru adalah Nursyamsi, dkk (2016) mengenai pembuatan batako yang ditambahkan serbuk kaca sebagai bahan substitusi terhadap berat semen.

Dari tahun ketahun penelitian tentang penambahan ataupun penggantian semen menggunakan kaca pada beton atau bahan bangunan lainnya terus dilakukan. Namun pemanfaatan kaca pada pembuatan *paving block* sebagai bahan pengganti sebagian semen ini belum ada yang benar-benar menggunakan hanya kaca murni tanpa mencampurkan bahan tambah atau bahan pengganti lainnya. Maka dari itulah penelitian tentang penggantian sebagian semen menggunakan bubuk kaca saja pada pembuatan *paving block* perlu dilakukan.

#### **2.4. Hipotesis Penelitian**

Berdasarkan kerangka teoritis dan kerangka berpikir diatas, diduga *paving block* dengan persentase bubuk kaca 0%, 10%, 20%, 30%, dan 50% masuk ke dalam kelas mutu *paving block* yang sesuai dengan SNI 03-0691-1996, tetapi tidak seluruhnya kadar persentase masuk kedalam kelas mutu A.

