

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Agregat Kasar

Agregat kasar beton dapat berupa kerikil hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu. Pada umumnya yang dimaksud dengan agregat kasar adalah agregat dengan besar butiran 5 mm. Jenis agregat ini permukaannya kasar dan banyak memerlukan air untuk penggunaan dalam beton serta kegunaannya cukup bagus. Syarat-syarat agregat kasar antara lain :

1. Agregat kasar harus terdiri dari butir yang keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang tidak mengandung butir-butir pipih hanya dapat digunakan bila jumlah butir pipih tersebut tidak lebih dari 20% dari jumlah keseluruhan agregat. Butir-butir agregat harus tahan terhadap cuaca.
2. Agregat kasar tidak mengandung lumpur lebih dari 1% ditentukan terhadap berat kering. Yang diartikan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui saringan no. 200 (saringan ASTM) atau saringan 0,063 mm. Bila kadar lumpur melebihi 1% maka agregat kasar harus dicuci dulu sebelum digunakan.
3. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat reaktif alkali yang dapat memecahkan beton jika zat tersebut bereaksi dengan alkali  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{K}_2\text{O}$  dalam semen portland.
4. Kekerasan butiran agregat kasar dapat diperiksa dengan menggunakan mesin *Los Angeles* dimana tidak lolos 50% saringan no. 12 (ASTM).
5. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan harus bergradasi baik.

Butiran-butiran agregat runcing dan sangat kasar. Butiran yang pipih dan memanjang membutuhkan lebih banyak semen untuk menghasilkan beton yang mudah dikerjakan. Hal-hal tersebut sangat penting, bukan saja untuk agregat kasar tetapi juga untuk agregat halus. Biasanya agregat alam bentuknya bundar akan tetapi agregat yang diperoleh dari pemecahan batu yang sangat bersudut, pipih, sangat tipis dan sangat panjang sebaiknya tidak perlu digunakan. Berdasarkan proses terjadinya, agregat kasar dapat dibagi atas :

1. Agregat alam

Kerikil alam adalah batuan yang diperoleh dari penghancuran batuan induk secara alamiah. Umumnya jenis ini berbentuk bulat. Bentuk seperti ini baik untuk pembuatan beton

2. Agregat buatan

Karena keterbatasan persediaan kerikil alam, maka untuk memenuhi kebutuhan kerikil biasanya ditempuh dengan cara pemecahan atau penghancuran batuan. Keuntungan penggunaan kerikil jenis ini dalam pembuatan beton adalah menghasilkan beton yang berkekuatan tinggi, tahan panas dan api. Umumnya pembuatan agregat bentuk ini banyak mengandung pori, sehingga beton yang dihasilkan lebih mahal jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan kerikil alam. Karena sifatnya berpori maka dapat memberikan perubahan yang berarti dalam pembuatan beton yaitu penyusutan dan pemuaiian.

Karakteristik agregat kasar dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Bentuk butir dan keadaan permukaan

- a. Bulat dan permukaannya licin, kasar berkilat, berpori
- b. Tidak beraturan
- c. Bersudut tajam dan permukaannya kasar
- d. Pipih
- e. Memanjang, panjangnya lebih besar 3 kali dari lebarnya

Butiran agregat mempunyai hubungan erat dengan luas permukaan dan banyaknya rongga. Perbedaan luas permukaan akan mempengaruhi jumlah air yang diperlukan dalam pembuatan beton. Dalam beton, rongga-rongga akan diisi oleh pasta dimana makin banyak pasta yang digunakan makin banyak pula pemakaian semen.

2. Kekuatan agregat

Pada umumnya kekuatan agregat tergantung dari jenis agregat, susunan mineral, struktur butir. Kekuatan agregat akan sangat berpengaruh pada kekuatan beton. Pengujian kekuatan agregat kasar, antara lain :

- a. *British Standard*

- Nilai hancur (*crushing value*)
- Pukulan (*impact value*)

- 10% nilai

b. *America Standard*

- Pengujian geseran dan ketahanan dengan bejana LA
- Dengan PB 71 yaitu bejana tekan Rudellof

3. Berat jenis agregat

Berat jenis mutlak yaitu perbandingan antara suatu benda dengan berat air murni pada volume dan suhu yang sama dimana volume benda tidak termasuk pori-pori di dalamnya. Berat jenis nyata sama dengan berat jenis mutlak tetapi volume pori-pori yang tidak tembus air. Keadaan SSD yaitu perbandingan berat antara suatu benda pada SSD dengan berat air murni pada volume dan suhu yang sama dimana volume benda, pori-pori yang tidak tembus diisi oleh air. Berat jenis kering asma dengan berat SSD dimana volume benda termasuk seluruh pori-pori yang terkandung dalam agregat.

4. Pori-pori agregat

Pori-pori pada agregat dibedakan atas :

- a. Pori-pori yang tembus air
- b. Pori-pori yang tidak tembus air

Besar kecilnya pori-pori sangat tergantung dari jenis batuan dan proses pembentukannya yang mempengaruhi daya serap agregat. Pada agregat dapat terjadi kondisi-kondisi sebagai berikut :

- a. Kondisi kering mutlak
- b. Kondisi kering udara
- c. Kondisi kering permukaan (SSD)
- d. Kondisi basah

5. Berat isi agregat

Berat isi agregat adalah perbandingan antara berat dan isi, berat nilainya tergantung dari bagaimana padatnya kita mengisinya, bentuk butir dan susunan butirnya. Jadi meskipun berat jenis suatu benda sama namun tidaklah mutlak berat benda itu sama. Syarat- syarat yang harus dipenuhi oleh agregat adalah sebagai berikut:

- a. Agregat kasar untuk beton dapat berupa kerikil sebagai hasil dari disintegrasi dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari

pecahan batu. Pada umumnya yang dimaksud dengan agregat kasar adalah agregat dengan ukuran butir lebih besar dari 5 mm sesuai dengan syarat-syarat pengawasan mutu agregat untuk berbagai mutu beton.

- b. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang tidak mengandung butir-butir pipih hanya dapat digunakan apabila jumlah butirnya tidak melampaui 20% dari agregat seluruhnya. Agregat kasar tidak mudah hancur oleh perubahan cuaca.
- c. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% (ditentukan berdasarkan berat keringnya), yang dimaksud dengan lumpur dalam hal ini adalah bagian dari agregat yang lolos saringan no. 0,063 mm. Apabila kadar lumpurnya melebihi 1% maka agregat tersebut harus dicuci.
- d. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton seperti zat-zat reaktif alkali.
- e. Kekerasan dari butir agregat kasar diperiksa dengan bejana penguji dari Rudeloff dengan beban uji seberat 20 ton dan harus dapat memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:
  - Tidak terjadi pembekuan sampai fraksi 9,5 – 1,9 mm lebih dari 24% terhadap berat.
  - Tidak terjadi pembekuan sampai fraksi 19 – 30 mm lebih daripada 22% atau mesin *Los Angeles* beratnya tidak boleh melebihi 50% berat keseluruhan.
- f. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang bervariasi besarnya dan bila digunakan ayakan dengan susunan ayakan yang telah ditentukan harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :
  - Sisa pada ayakan 4 mm harus berkisar 90 – 98% dari berat.
  - Selisih antara sisa kumulatif pada ayakan yang berukuran maksimum 60% dan minimum 10% dari berat.
- g. Berat butir agregat tidak boleh lebih dari 1/5 jarak terkecil antara bidang-bidang samping dari cetakan, 1/3 dari tebal pelat atau 3/4 dari jarak bersih minimum antara batang-batang atau berkas-berkas tulangan. Penyimpangan dari batasan ini boleh dengan seizin ahli, cara-cara pengecoran apabila tidak terjadi sarang-sarang kerikil.

h. Istilah-istilah :

- Berat jenis spesifik adalah perbandingan antara berat kering agregat kasar dengan berat air suling pada tekanan volume sama.
- Berat jenis spesifik kering permukaan jenuh (SSD) adalah perbandingan antara berat kering permukaan jenuh agregat kasar dengan berat air suling pada volume sama.
- Berat jenis spesifik semu adalah perbandingan antara berat kering agregat kasar dengan berat air suling pada volume sama.
- Penyerapan (absorption) adalah prosentase berat air yang dapat disimpan pori terhadap agregat kering.

## 2.2 Agregat Halus

Agregat halus dapat berupa pasir alam sebagai disintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu (*stone crusher*). Syarat-syarat pasir yang dapat dipakai sebagai campuran beton yaitu :

1. Terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras.
2. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5%.
3. Tidak boleh mengandung bahan-bahan organis.
4. Terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya.
5. Pasir laut tidak boleh dijadikan bahan bangunan kecuali bila telah diadakan penelitian dan petunjuk dari ahli bangunan.

Secara umum harga agregat lebih murah dari semen sehingga penggunaannya selalu diusahakan dengan prosentase yang tertinggi tanpa harus mengurangi mutu beton. Penggunaan dengan prosentase tertentu tersebut tentunya tetap memperhatikan sifat dari agregat karena bukan hanya mempengaruhi sifat beton akan tetapi juga daya tahan (*durability*), stabilitas volume dan juga kuat tekannya sehingga walaupun harganya murah takarannya tetap harus diperhatikan untuk mengontrol mutu beton.

Agregat alami yang digunakan untuk agregat campuran beton dapat digolongkan menjadi 3 macam yaitu :

### 1. Pasir galian

Pasir golongan ini diperoleh langsung dari permukaan tanah atau dengan cara menggali terlebih dahulu. Pasir ini biasanya tajam, bersudut, berpori dan bebas dari kandungan garam, tetapi biasanya harus dibersihkan dari kotoran tanah dengan cara mencucinya.

### 2. Pasir sungai

Pasir ini diperoleh langsung dari dasar sungai, umumnya berbutir halus, bulat-bulat akibat proses gesekan. Daya lekat antar butir-butir agak kurang karena butir yang bulat. Karena besar butir-butirnya kecil, maka baik dipakai untuk memplaster tembok, juga dapat dipakai untuk keperluan yang lain.

### 3. Pasir laut

Pasir laut ini adalah pasir yang diambil dari pantai. Butir-butirnya halus dan bulat karena gesekan. Pasir ini merupakan pasir yang paling jelek karena banyak mengandung garam-garaman. Garam-garaman ini menyerap kandungan air dari udara dan ini mengakibatkan pasir selalu agak basah dan juga menyebabkan pengembangan bila sudah menjadi bangunan.

## 2.3 Air

Air di alam dapat diperoleh dari berbagai sumber seperti sungai, laut, sumur artesis ataupun sumur terbuka. Namun, tidak semua air yang ada di permukaan bumi dapat digunakan sebagai bahan pembuatan beton yang dapat menghasilkan beton bermutu tinggi. Air yang dapat digunakan untuk pembuatan beton harus air yang tidak mengandung zat yang dapat menghalangi proses pengikatan antara semen dan agregat. Kandungan zat yang dapat memberikan pengaruh buruk terhadap kualitas beton antara lain : minyak, asam, alkali, garam, limbah, zat organik atau bahan-bahan lain yang bersifat merusak beton dan baja tulangan.

Air diperlukan pada pembuatan beton agar terjadi reaksi kimia antara kerikil, pasir dengan semen, untuk membasahi agregat, memberikan kemudahan dalam pekerjaan dan menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat sehingga mudah dipadatkan. Air yang dapat diminum umumnya dapat digunakan sebagai campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa berbahaya atau tercemar oleh zat kimia bila dipakai untuk campuran beton akan menurunkan kekuatannya dan dapat mengubah

sifat-sifat semen. Untuk bereaksi dengan semen, air yang diperlukan hanya 30% berat semen saja, namun dalam kenyataannya nilai faktor air semen yang dipakai sulit kurang dari 0,35. Kelebihan air ini dipakai sebagai pelumas.

Air yang digunakan dapat berupa air tawar (dari sungai, danau, telaga, kolam, dan lainnya), air laut maupun air limbah, asalkan memenuhi syarat mutu yang telah ditetapkan. Di dalam penggunaannya, air tidak boleh terlalu banyak karena akan menyebabkan menurunnya kekuatan beton.

Persyaratan air yang digunakan dalam campuran beton:

1. Memenuhi persyaratan air minum.
2. Tidak berwarna, tidak berasa dan tidak berbau.
3. Tidak mengandung bahan-bahan yang dapat menurunkan mutu beton (zat kimia, zat organik, minyak, garam).

Karena karakter pasta semen merupakan hasil reaksi kimia antara semen dan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total material yang menentukan, melainkan hanya perbandingan antara air dan semen pada campuran yang menentukan. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak selesai seluruhnya.

### 2.3.1 Unsur-Unsur Merugikan Yang Terdapat Dalam Air

1. Kandungan Benda Padat

Pada air di dalamnya terdapat zat padat terlarut bila jumlahnya kurang dari 6% berat air dan pada umumnya cukup aman digunakan untuk pembuatan beton. Sedangkan pada air sumur didalamnya mengandung jumlah padatan 5% hal ini disebabkan karena air yang berasal dari alam belum tercemar sehingga konsentrasi lebih kecil. Untuk air laut berbeda karena pada air laut mengandung garam sehingga dapat dikatakan bahwa air yang diperoleh dari alam yang belum tercemar dapat digunakan sebagai air pencampur.

2. Ion-ion yang ditemukan

Air yang berasal dari alam didalamnya belum tercemar oleh limbah industri, awalnya mengandung ion positif (kation) dan ion negatif (anion) yang berasal dari larutan anorganik. Misalnya: golongan kation yaitu kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ),

Magnesium ( $Mg^{2+}$ ), Natrium ( $Na^+$ ), dll., sedangkan golongan anion yaitu Sulfat ( $SO_4^-$ ), Klorida ( $Cl^-$ ), Nitrat ( $NO_3^-$ ), dll.

#### 2.4 Air Laut

Laut merupakan wilayah yang paling luas di permukaan dunia, dengan luas mencapai 70% dari seluruh permukaan dunia. Air laut memiliki sifat korosifitas yang sangat agresif. Untuk itu, bangunan atau peralatan yang terpasang di laut dan terbuat dari logam, seperti jembatan, tiang pancang dermaga atau anjungan minyak, telah diberi proteksi untuk mengendalikan serangan korosi di lingkungan laut. Kandungan konsentrasi larutan garam pada air laut sekitar 3,5%. Secara umum, garam air laut mengandung 78% sodium klorida ( $NaCl$ ), 15% klorida ( $Cl^-$ ) dan magnesium sulfat ( $MgSO_4$ ), sedangkan kandungan karbonat cukup rendah sekitar 75 ppm.

Air laut mengandung sampai 35000 ppm (3,5 %) garam. Intrusi air laut pada struktur sangat tidak dianjurkan untuk terjadi karena dapat menimbulkan bahaya korosi. Namun resiko korosi dapat dikurangi dengan menyediakan penutup tulangan yang baik, misalnya selimut beton. Daerah yang paling agresif pada lingkungan laut adalah zona atmosferik dan zona percikan (*splashing*), karena pada zona tersebut kandungan oksigen sangat tinggi, sehingga meningkatkan laju korosi. Bentuk-bentuk serangan korosi yang umum terjadi di lingkungan laut adalah korosi merata, korosi galvanik, korosi sumuran (*pitting*) dan korosi celah (*crevice*). Agresifitas lingkungan laut disebabkan oleh beberapa faktor, seperti :

1. Laut merupakan elektrolit yang memiliki sifat konduktifitas tinggi.
2. Kandungan oksigen terlarut cukup tinggi.
3. Temperatur permukaan laut umumnya tinggi.
4. Ion klorida pada air laut merupakan ion agresif.
5. Adanya *biofouling*.

Air laut mempunyai kandungan klorida dan sulfat yang tinggi sebagai campuran. Misalnya, batasan ion klorida 0,1% dari berat semen dalam suatu campuran dengan 300  $kg/m^3$  semen dan faktor air semen 0,5 akan membatasi kandungan ion klorida dalam campuran sebanyak  $(0,001 \times 300)/150 = 0,002$  kg per kg air, atau 2000 ppm.

Secara umum garam yang terkandung di dalam air laut dapat memberikan tiga pengaruh, yaitu :

1. Kandungan unsur sodium klorida mempercepat waktu pengikatan dan pengerasan seperti halnya pengaruh kalsium klorida dalam kadar yang sama.
2. Garam muncul ke permukaan beton sebagai lapisan tipis berwarna keputih-putihan ketika beton mengeras.
3. Sodium klorida mengakibatkan korosi pada tulangan, apabila beton tidak mempunyai kualitas dan selimut beton yang mencukupi, karena air laut dapat mengakibatkan pengaruh korosi pada tulangan.

Garam-garam sodium yang terkandung dalam air laut dapat menghasilkan substansi yang bila berkombinasi dengan agregat alkali yang reaktif, sama seperti kombinasi dengan semen alkali. Oleh karena itu, air laut tidak boleh digunakan untuk beton yang diketahui mempunyai potensi agregat alkali reaktif, bahkan bila kadar alkalinya rendah.

Sebagian dari garam-garam ini akan bereaksi secara kimiawi dengan semen dan mengubah atau memperlambat proses pengikatan semen, jenis-jenis lainnya dapat mengurangi kekuatan beton. Selain reaksi kimia, kristalisasi garam dalam rongga beton dapat mengakibatkan kehancuran akibat tekanan kristalisasi tadi. Karena kristalisasi terjadi pada titik penguapan air, bentuk serangan terjadi di dalam beton di atas permukaan air. Garam naik di dalam beton dengan aksi kapiler, jadi serangan terjadi hanya jika air dapat terserap dalam beton. Pengurangan kekuatan ini dapat dikurangi dengan mengurangi faktor air semen.

## 2.5 Semen

Beton umumnya tersusun dari empat bahan penyusun utama yaitu semen, agregat kasar, agregat halus, dan air. Semen merupakan bahan campuran yang secara kimiawi aktif setelah berhubungan dengan air. Agregat tidak memegang peranan penting dalam reaksi kimia tersebut, tetapi berfungsi sebagai bahan pengisi mineral. Agregat dapat mencegah perubahan-perubahan volume beton setelah pengadukan selesai dan memperbaiki keawetan beton yang dihasilkan.

Semen Portland (PC) dibuat dari semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terbuat dari batu kapur ( $\text{CaCO}_3$ ) yang jumlahnya amat

banyak serta tanah liat dan bahan dasar berkadar besi, terutama dari silikat kalsium yang bersifat hidraulis ditambah dengan bahan yang mengatur waktu ikat.

Semen merupakan bahan pengikat yang penting dan banyak digunakan dalam pembangunan fisik di sektor konstruksi sipil. Jika ditambah air, semen akan menjadi pasta semen. Jika ditambah agregat halus, pasta semen akan menjadi mortar yang jika digabungkan dengan agregat kasar akan menjadi campuran beton segar dan jika telah mengeras akan menjadi beton keras.

Semen merupakan jenis pengikat hidrolis yang artinya dapat mengeras bila bereaksi dengan air. Pada dasarnya semen portland terdiri dari 4 unsur yang paling penting, yaitu:

- a. Trikalsium silikat ( $C_3S$ ) atau ( $CaO.SiO_2$ ), sifatnya hampir sama dengan sifat semen yaitu jika ditambahkan air akan menjadi kaku dan dalam beberapa jam saja pasta akan mengeras.  $C_3S$  menunjang kekuatan awal semen dan menimbulkan panas hidrasi kurang lebih 58 kalori/gram setelah 3 hari.
- b. Dikalsium silikat ( $C_2S$ ) atau ( $2CaO.SiO_2$ ). Pada saat penambahan air setelah reaksi yang menyebabkan pasta mengeras dan menimbulkan panas 12 kalori/gram setelah 3 hari. Pasta akan mengeras, perkembangan kekuatannya stabil dan lambat pada beberapa minggu kemudian mencapai kekuatan tekan akhir hampir sama dengan  $C_3S$ .
- c. Trikalsium aluminat ( $C_3A$ ) atau ( $3CaO.Al_2O_3$ ). Unsur ini apabila bereaksi dengan air akan menimbulkan panas hidrasi tinggi yaitu 212 kalori/gram setelah 3 hari. Perkembangan kekuatan terjadi satu sampai dua hari tetapi sangat rendah.
- d. Tetrakalsium aluminoforit ( $C_4AF$ ) atau ( $Al_2O_3.Fe_2O_3$ ). Unsur ini saat bereaksi dengan air berlangsung sangat cepat dan pasta terbentuk dalam beberapa menit, menimbulkan panas hidrasi 68 kalori/gram. Warna abu-abu pada semen disebabkan oleh unsur ini.

Dari senyawa tersebut,  $C_3S$  dan  $C_2S$  bersifat sebagai perekat dan memberi kekuatan pada semen bila bereaksi dengan air.

Semen Portland dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan aluminium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu. Penambahan air ini menyebabkan komponen kapur dilepaskan dari senyawanya,

banyaknya kapur yang dilepaskan sekitar 20% dari berat semen. Ukuran partikel semen mempunyai pengaruh yang besar terhadap kelajuan reaksi antara semen dan air. Bahan baku pembentuk semen adalah kapur ( $\text{CaO}$ ) dari batu kapur, silika ( $\text{SiO}_2$ ) dari lempung, Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dari lempung, sedikit prosentase Magnesia ( $\text{MgO}$ ) dan terkadang terdapat Alkali. Oksida besi terkadang ditambahkan untuk mengontrol komposisinya.

Di Indonesia semen yang umum digunakan dalam konstruksi adalah jenis Semen Portland yang memenuhi syarat SII.0013-81 atau Standar Uji Bahan Bangunan Indonesia 1986, dan harus memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam standar tersebut. Semen yang digunakan untuk pekerjaan beton harus disesuaikan dengan rencana kekuatan dan spesifikasi teknik yang diberikan.

Sesuai dengan tujuan pemakaiannya, semen portland dibagi menjadi lima jenis antara lain :

- a. Tipe I, semen portland yang dalam penggunaannya tidak memerlukan persyaratan khusus seperti jenis-jenis lainnya.
- b. Tipe II, semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang. Kadar  $\text{C}_3\text{S}$  sedang sama besar dengan kadar  $\text{C}_3\text{A}$  yaitu maksimal 8 % alkali rendah.
- c. Tipe III, semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan awal yang tinggi dalam fase permulaan setelah terjadi pengikatan. Kadar  $\text{C}_3\text{S}$ -nya sangat tinggi dan butirannya sangat halus.
- d. Tipe IV, semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan panas hidrasi rendah, sehingga kadar  $\text{C}_3\text{S}$  dan  $\text{C}_3\text{A}$  rendah.
- e. Tipe V, semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan yang tinggi terhadap sulfat.

## 2.6 *Bottom Ash*

*Bottom ash* adalah bahan buangan dari proses pembakaran batubara pada pembangkit tenaga yang mempunyai ukuran partikel lebih besar dan lebih berat dari pada *fly ash*, sehingga *bottom ash* akan jatuh pada dasar tungku pembakaran (*boiler*) dan terkumpul pada penampung debu (*ash hopper*) lalu dikeluarkan dari tungku dengan

cara disemprot dengan air untuk kemudian dibuang atau dipakai sebagai bahan tambahan pada perkerasan jalan.

*Bottom ash* dikategorikan menjadi *dry bottom ash* dan *wet bottom ash/boiler slag* berdasarkan jenis tungkunya yaitu *dry bottom boiler* yang menghasilkan *dry bottom ash* dan *slag-tap boiler* serta *cyclone boiler* yang menghasilkan *wet bottom ash (boiler slag)*. Sifat dari *bottom ash* sangat bervariasi karena dipengaruhi oleh jenis batu bara dan sistem pembakarannya. Beberapa sifat fisis, kimia, dan mekanis yang penting dari *bottom ash* adalah sebagai berikut:

### 2.6.1. Sifat fisis

Sifat fisis *bottom ash* berdasarkan bentuk, warna, tampilan, ukuran, *specific gravity*, *dry unit weight* dan penyerapan dari *wet* dan *dry bottom ash* dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. Sifat fisis khas dari *bottom ash***

Sifat Fisis <i>Bottom Ash</i>	Wet	Dry
Bentuk	Angular / bersiku	Berbutir kecil / granular
Warna	Hitam	Abu-abu gelap
Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus, sangat berpori
Ukuran (% lolos ayakan)	No.4 (90-100%)	1.5 s/d 3/4 in (100%)
	No.10 (40-60%)	No.4 (50-90%)
	No.40 ( 10%)	No.10 (10-60%)
	No.200 ( 5%)	No.40 (0-10%)
Specific gravity	2,3 – 2,9	2,1 – 2,7
Dry Unit Weight	960 – 1440 kg/m <sup>3</sup>	720 – 1600 kg/m <sup>3</sup>
Penyerapan	0,3 – 1,1%	0,8 – 2,0%

Sumber: Coal Bottom Ash/Boiler Slag-Material Description, 2000 [1]

### 2.6.2. Sifat kimia

Komposisi kimia dari *bottom ash* sebagian besar tersusun dari unsur-unsur Si, Al, Fe, Ca, serta Mg, S, Na dan unsur kimia yang lain.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Moulton, didapat bahwa kandungan garam dan pH yang rendah dari *bottom ash* dapat menimbulkan sifat korosi pada struktur baja yang bersentuhan dengan campuran yang mengandung *bottom ash*. Selain

itu rendahnya nilai pH yang ditunjukkan oleh tingginya kandungan sulfat yang terlarut menunjukkan adanya kandungan *pyrite (iron sulfide)* yang besar.

## 2.7 Beton

Beton adalah campuran agregat halus dan agregat kasar sebagai bahan pengisi. Ditambah semen dan air yang digunakan sebagai bahan pengikat dan atau menggunakan bahan tambahan. Sekarang ini penggunaan beton banyak digunakan untuk sebagai konstruksi, misalnya jalan, jembatan, lapangan terbang, waduk, bendungan dan lainnya.

Dengan melakukan analisa bahan maka dalam hal pembuatan beton harus lebih teliti dengan berbagai macam material-material yang digunakan dalam pembuatan tersebut, dikarenakan apabila suatu material dalam beton itu tidak bagus maka hasil dari beton tersebut tidak akan mencapai pada hasil yang diinginkan. Sehingga dengan diadakannya analisa bahan terhadap material yang akan digunakan untuk pembuatan beton maka hasil dapat diperoleh dengan baik.

### 2.7.1 Jenis beton

Berdasarkan teknik pembuatannya, beton dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu :

#### 1. Beton Biasa

Beton ini langsung dibuat dalam keadaan plastis, dan cara pembuatannya berdasarkan atas :

- Beton siap pakai (*Ready Mix Concrete*).
- Beton dibuat langsung pada lapangan.

#### 2. Beton *Precast*

Beton ini dibuat dalam bentuk elemen-elemen yang merupakan bagian dari suatu konstruksi. Bagian yang akan menjadi beton ini dipasang dalam keadaan mengeras.

#### 3. Beton *Prestress*

Beton ini dibuat dengan memberi tegangan dalam pada beton sebelum mendapat beban luar.

#### 4. Beton Hampa

Beton hampa adalah beton yang setelah diaduk dan dituang serta dipadatkan sebagaimana beton biasa, air sisa reaksi disedot dengan cara khusus, disebut cara vakum (*vacuum method*). Air yang tertinggal hanya air yang dipakai untuk reaksi dengan semen sehingga beton yang diperoleh sangat kuat.

Berdasarkan bahan penyusunnya, beton dapat dibedakan menjadi beberapa jenis diantaranya yaitu :

##### 1. Beton serat (*Fiber Concrete*)

Beton serat adalah bahan komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan lain yang berupa serat. Serat dalam beton ini berfungsi untuk mencegah retak-retak sehingga menjadikan beton lebih daktil daripada beton biasa.

##### 2. Beton non-pasir (*No-Fines Concrete*)

Beton non-pasir adalah bentuk sederhana dari jenis beton ringan yang diperoleh dengan cara menghilangkan bagian halus agregat pada pembuatan beton. Tidak adanya agregat halus dalam campuran menghasilkan suatu sistem berupa keseragaman rongga yang terdistribusi di dalam massa beton, serta berkurangnya berat jenis beton.

##### 3. Beton Siklop

Beton siklop adalah beton normal (beton biasa) yang menggunakan ukuran agregat yang relatif lebih besar. Ukuran agregat mencapai 20 cm, namun proporsi agregat yang lebih besar ini sebaiknya tidak lebih dari 20 % agregat seluruhnya.

##### 4. Beton Mortar

Beton mortar adalah adukan yang terdiri dari pasir, bahan perekat, dan air. Mortar dapat dibedakan menjadi tiga macam, yaitu : mortar lumpur, mortar kapur, dan mortar semen.

### 2.7.2 Sifat-sifat beton segar

Sifat-sifat beton perlu diketahui untuk mendapatkan mutu beton yang diharapkan sesuai tuntutan konstruksi dan umur bangunan yang bersangkutan. Pada saat segar atau sesaat setelah dicetak, beton bersifat plastis dan mudah dibentuk. Sedang pada saat keras, beton memiliki kekuatan yang cukup untuk menerima beban. Sifat

beton segar yang baik sangat mempengaruhi kemudahan pengerjaan sehingga menghasilkan beton dengan berkualitas baik. Adapun sifat-sifat beton segar adalah :

1. Kemudahan pengerjaan (*workability*)

Sifat ini merupakan ukuran dari tingkat kemudahan campuran untuk diaduk, diangkut, dituang dan dipadatkan tanpa menimbulkan pemisahan bahan susunan pembentuk beton. Sifat *workability* beton segar ditandai dengan enam karakter yaitu: konsistensi, plastisitas (*plasticity*), kemudahan dituang (*placeability*), keenceran (*flowability*), kemudahan dirapikan (*finishability*), dan kemudahan dipompa (*pumpability*). Secara garis besar sekurang-kurangnya terdapat tiga sifat yang terpisah dalam mendefinisikan sifat ini, yaitu:

- a. Kompakabilitas, kemudahan beton dipadatkan
- b. Mobilitas, kemudahan beton mengalir dalam cetakan
- c. Stabilitas, kemampuan beton untuk tetap sebagai massa yang homogen, koheren dan stabil selama dikerjakan atau dipadatkan.

Tingkat kompakabilitas campuran tergantung pada nilai faktor air semennya. Semakin kecil nilai faktor air semen, adukan beton semakin kental dan kaku sehingga makin sulit untuk dipadatkan. Sebaliknya semakin besar nilai faktor air semen adukan beton semakin encer dan semakin sulit untuk mengikat agregat sehingga kekuatan beton yang dihasilkan semakin rendah. Pengamatan *workability* beton di lapangan pada umumnya dilakukan dengan *slump test*. Pengetesan ini merupakan petunjuk dari sifat mobilitas dan stabilitas beton. *Slump test* bermanfaat untuk mengamati variasi keseragaman campuran. Pada beton biasa, pengujian *slump* dilakukan untuk mencatat konsistensi dalam satuan mm penurunan benda uji beton segar selama pengujian. Selain itu *workability* dapat juga diamati dengan mengukur faktor kepadatan, yaitu rasio antara berat aktual beton dalam silinder dengan berat beton dalam kondisi padat pada silinder yang sama. Faktor kepadatan memberikan indikasi bahwa tingkat kemampuan beton tersebut dipadatkan.

2. *Bleeding*

*Bleeding* adalah pengeluaran air dari adukan beton yang disebabkan oleh pelepasan air dari pasta semen. Sesaat setelah dicetak, air yang terkandung di dalam beton segar cenderung untuk naik ke permukaan. Naiknya air ke

permukaan dan bersamaan dengan turunnya bahan ke dasar disebabkan oleh pengaruh gravitasi akibat berat sendiri sebagai fenomena alamiah atau proses “*specific sedimentation*“. Adapun penyebab *bleeding* adalah ketidakmampuan bahan padat campuran untuk menangkap air pencampur. Ketika *bleeding* sedang berlangsung, air campuran terjebak di dalam kantong-kantong yang terbentuk antara agregat dan pasta semen (*matriks*). Sesudah *bleeding* selesai dan beton mengeras, kantong-kantong menjadi kering ketika berlangsung perawatan dalam keadaan kering. Akibatnya apabila ada tekanan, kantong-kantong tersebut menjadi penyebab mudahnya retak pada beton, karena kantong-kantong hanya berisi udara dan bahan lembut semacam debu halus.

### 3. Pemisahan kerikil (segregasi)

Segregasi adalah kecenderungan pemisahan bahan-bahan pembentuk beton. Terdapat dua bentuk segregasi beton segar yaitu:

- b. Partikel yang lebih kasar cenderung memisahkan diri dari partikel yang lebih halus.
- c. Terpisahnya air semen dari adukan.

Segregasi sangat besar pengaruhnya terhadap sifat beton keras. Jika tingkat segregasi beton sangat tinggi, maka ketidaksempurnaan konstruksi beton juga tinggi. Hal ini dapat berupa keropos, terdapat lapisan yang lemah dan berpori, permukaan nampak bersisik dan tidak merata.

Segregasi disebabkan oleh :

- Penggunaan air pencampur yang terlalu banyak.
- Gradasi agregat yang jelek.
- Kurangnya jumlah semen.
- Cara pengelolaan yang tidak memenuhi syarat.

## 2.8 Ion Klorida

Ion klorida yang berada dalam beton, dapat berasal dari bahan-bahan pembentuk beton ketika proses pembuatannya (misal dari agregat, air yang dipakai mencampur, atau zat aditif) atau dari lingkungan luar beton, seperti air laut. Mekanisme masuknya ion klorida ke dalam beton dapat berlangsung dengan berbagai cara seperti difusi, penghisapan kapiler, permeasi dan kondensasi/evaporasi/kristalisasi. Selain itu, yang

dapat mendominasi masuknya ion klorida ke dalam beton tergantung dari lingkungan beton berada. Misalnya pada lingkungan laut, beton dapat berada di daerah terendam, pasang surut, daerah pecahnya gelombang atau di udara terbuka.

Mekanisme masuknya ion klorida ke dalam beton dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Permeasi

Didefinisikan sebagai proses mengalirnya aliran tiap unit volume per unit luas permukaan tiap satuan waktu pada temperatur yang tetap. Permeasi terjadi akibat tekanan hidrolik dan menyebabkan ion klorida yang terlarut pada air laut akan ikut ke dalam beton. Dalam kaitannya dengan permeasi, koefisien permeabilitas beton menjadi karakteristik penting, karena menunjukkan tingkat kemudahan suatu cairan dapat merembes melalui material tersebut (Wayan Armaja, 2001).

2. Penghisapan Kapiler

Didefinisikan sebagai mekanisme masuknya suatu cairan ke dalam material berpori akibat tegangan permukaan yang terjadi di dalam lubang-lubang kapiler. Proses masuknya cairan dalam mekanisme ini dipengaruhi oleh karakteristik cairan seperti viskositas, densitas dan tegangan permukaan (Wayan Armaja, 2001).

3. Difusi

Didefinisikan sebagai perpindahan massa dengan gerakan acak dari molekul atau ion ke dalam pori-pori larutan yang menghasilkan jaringan aliran dari daerah konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah (Wayan Armaja, 2001). Dari ketiga jenis mekanisme penetrasi tersebut, difusi merupakan mekanisme paling dominan dalam penetrasi klorida ke dalam beton, terutama pada daerah *submerged* (terendam air). Dimana pada daerah tersebut, pori-pori pada beton terisi penuh oleh air.

## 2.9 Pengaruh Ion Klorida Pada Beton

Tidak ada ketentuan syarat air dari ASTM, namun pada BS 3148, ada dua metode untuk menilai kelayakan air untuk beton. Metode tersebut akan membandingkan waktu pengikatan dan kuat tekan dari benda uji yang dibuat dengan semen dan air yang

dipertanyakan dengan air suling. Air dianggap memenuhi syarat jika waktu pengikatannya tidak lebih dari 30 menit atau kekuatannya tidak berkurang dari 20 % dibandingkan air suling (Nugraha, 2007 : 63).

Penggunaan air di daerah pantai untuk campuran beton akan memberikan beberapa pengaruh pada beton seperti *setting time* dan kuat tekan beton dalam jangka waktu tertentu. Senyawa klorida merupakan salah satu senyawa yang memiliki konsentrasi besar yang biasanya terkandung dalam air di daerah pantai (Neville, 1981:349).

Air laut mengandung sekitar 3,5% garam yang terdiri dari 78% Sodium Chlorida (NaCl) dan 15% lainnya terdiri dari Magnesium Klorida (MgCl<sub>2</sub>) dan Magnesium Sulfat (MgSO<sub>4</sub>) Sn menghasilkan kekuatan awal yang tinggi tapi dalam jangka panjang, kekuatan akhirnya menurun (Neville, 1981:349).

Menurut Amri,S (2005:47), Secara umum garam yang terkandung di dalam air laut dapat memberikan tiga pengaruh, yaitu:

1. Kandungan unsur sodium klorida mempercepat waktu pengikatan dan pengerasan seperti halnya pengaruh kalsium klorida dalam kadar yang sama.
2. Garam muncul ke permukaan beton sebagai lapisan tipis berwarna keputih-putihan ketika beton mengeras.
3. Sodium klorida mengakibatkan korosi pada tulangan, apabila beton tidak mempunyai kualitas dan selimut beton yang mencukupi, karena air laut dapat memberikan pengaruh korosi pada tulangan.

Garam-garam sodium yang terkandung dalam air laut dapat menghasilkan substansi yang bila berkombinasi dengan agregat alkali reaktif, sama seperti dengan kombinasi dengan semen alkali. Karena air laut tidak boleh dipakai untuk beton yang diketahui mempunyai potensi agregat alkali reaktif, bahkan bila kadar alkalinya rendah (Nugraha, 2007:65). Sebagian dari garam-garam ini akan bereaksi secara kimiawi dengan semen dan mengubah atau memperlambat proses pengikatan semen, dan jenis-jenis lainnya dapat mengurangi kekuatan beton. Selain reaksi kimia, kristalisasi garam dalam rongga beton dapat mengakibatkan kehancuran akibat tekanan kristalisasi tadi. Karena kristalisasi terjadi pada titik penguapan air, bentuk serangan terjadi di dalam

beton di atas permukaan air. Garam naik di dalam beton dengan aksi kapiler, jadi serangan terjadi hanya jika air dapat terserap dalam beton.

Karena itu walaupun kekuatan awalnya lebih tinggi dari beton biasa. Setelah 28 hari kuat tekannya akan lebih rendah. Pengurangan kekuatan ini dapat dikurangi dengan mengurangi faktor air semen.

## 2.10 Perawatan Beton (*Curing*)

Reaksi kimia antara semen dan air membutuhkan waktu. Fungsi semen sebagai perekat mulai berkembang pada saat umur beton masih muda, karena itu untuk pekerjaan beton baik konvensional maupun *precast* perlu dilakukan perawatan beton (Sasono, 2008).

Tujuan perawatan beton yaitu:

1. Mencegah kehilangan *moisture* pada beton.
2. Mempertahankan suhu yang baik selama durasi tertentu (di atas suhu beku dan di bawah 50 derajat celcius).

Jenis-jenis perawatan beton antara lain:

### 1. *Steam Curing*

Menguntungkan bila menginginkan kekuatan awal. Panas tambahan dibutuhkan untuk menyelesaikan hidrasi.

### 2. Penyemprotan/ *Fogging*

Metode yang baik untuk kondisi dengan suhu di atas suhu beku dan humiditas rendah. Kekurangannya yaitu biaya dan dapat menyebabkan erosi pada permukaan beton yang baru mengeras.

### 3. Pengerangan / Perendaman

Ideal untuk mencegah hilangnya *moisture*. Mempertahankan suhu yang seragam. Kekurangannya yaitu membutuhkan tenaga kerja yang banyak, perlu pengawasan, dan tidak praktis untuk proyek yang besar.

### 4. Lembaran Plastik (sesuai ASTM C171)

Lapisan *polythylene* dengan ketebalan 4 ml kelebihannya yaitu ringan, efektif sebagai penghalang hilangnya *moisture*, dan mudah diterapkan. Kekurangannya yaitu dapat menyebabkan *discoloration* permukaan, lebih terlihat bila lapisan plastik bergelombang dan diperlukan penambahan air secara periodik.

5. Penutup Basah (sesuai ASTM C171)

Menggunakan bahan yang dapat mempertahankan *moisture* seperti burlap (karung goni) yang dibasahi. Kelebihannya yaitu tidak terjadi *discoloration* dan tahan terhadap api. Kekurangannya yaitu memerlukan penambahan air secara periodik dan diperlukan lapisan plastik penutup burlap untuk mengurangi kebutuhan penambahan air.

6. *Curing Compound* (sesuai ASTM C171)

Membentuk lapisan tipis pada permukaan untuk menghalangi penguapan. Efisiensinya dites dengan ASTM C156.

## 2.11 Baja Tulangan

Beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai-nilai tertentu tanpa mengalami retak-retak. Maka, agar beton dapat bekerja dengan baik dalam suatu struktur, perlu dibantu dengan memberinya perkuatan tulangan yang terutama akan mengemban tugas menahan gaya tarik yang bakal timbul di dalam sistem struktur. Demi keperluan penulangan tersebut digunakan bahan baja yang memiliki sifat teknis menguntungkan. Bahan baja yang digunakan dapat berupa batang baja lonjoran untuk balok. Sifat fisik batang tulangan baja yang paling penting untuk digunakan dalam perhitungan perencanaan beton bertulang adalah tegangan luluh ( $f_y$ ) dan modulus elastisitas. (Istamawan, 1999)

### 2.11.1. Tegangan Luluh

Tegangan luluh (titik luluh) baja ditentukan melalui prosedur pengujian standar sesuai SII 0136-84 dengan ketentuan bahwa tegangan luluh adalah tegangan baja pada saat dimana meningkatnya tegangan tidak lagi disertai dengan peningkatan regangannya. (Istamawan, 1999)

### 2.11.2 Modulus Elastisitas

Modulus Elastisitas baja tulangan ditentukan berdasarkan kemiringan awal kurva tegangan-regangan di daerah elastik dimana antara mutu baja yang satu dengan lainnya tidak banyak bervariasi. Ketentuan SK SNI T-15-1991-03 menetapkan bahwa nilai modulus elastisitas baja untuk tulangan adalah 200.000 MPa. (Istamawan, 1999)

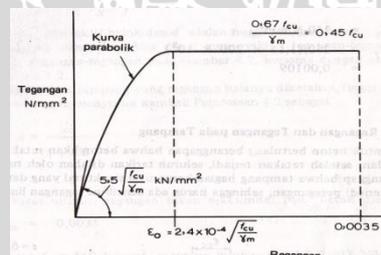
## 2.12 Hubungan Tegangan – Regangan

### 2.12.1 Kurva Tegangan – Regangan Pada Beton

Perilaku beton struktural diwakili oleh hubungan tegangan – regangan parabolik, sampai mencapai regangan  $\epsilon_0$ , dari titik di mana regangan meningkat sedangkan tegangan tetap konstan. Regangan  $\epsilon_0$  diterapkan sebagai suatu fungsi dari kekuatan karakteristik beton ( $f_{cu}$ ), begitu juga dengan modulus tangens pada permulaan. Tegangan rencana ultimit diberikan oleh :

$$\frac{0,67 f_{cu}}{\gamma_m} = \frac{0,67 f_{cu}}{1,5} = 0,447 f_{cu} \approx 0,45 f_{cu} \quad (2-1)$$

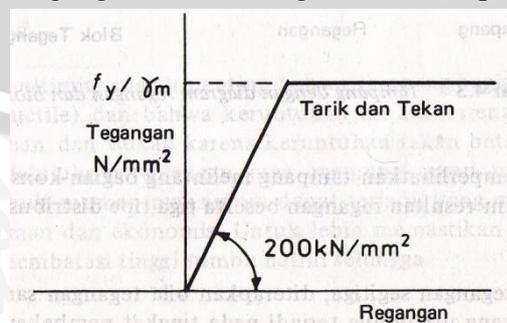
Di mana faktor sebesar 0,67 menyesuaikan perbedaan antara kekuatan lentur dan kekuatan hancur kubus beton, dan  $\gamma_m = 1,5$  adalah faktor keamanan parsial yang biasa untuk kekuatan beton apabila merencanakan bagian konstruksi yang dicor di tempat. Regangan ultimit sebesar 0,0035 adalah standar untuk semua mutu beton. Berikut gambar kurva tegangan – regangan untuk beton dalam tekanan :



Gambar 2.1 Kurva Tegangan-Regangan untuk Beton Dalam Keadaan Tertekan

### 2.12.2 Kurva Tegangan – Regangan Pada Baja Tulangan

Kurva tegangan – regangan untuk tulangan diberikan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.2 Kurva Tegangan-Regangan untuk Tulangan

Perilaku baja identik dalam tarikan dan tekanan, dan linear dalam rentang elastik. Sampai mencapai tegangan luluh rencana sebesar  $f_y/Y_m$ , dimana  $f_y$  adalah tegangan luluh karakteristik dan  $Y_m$  adalah faktor keamanan parsial.

Dalam rentang elastik, hubungan tegangan – regangan adalah :

Tegangan = modulus elastisitas x regangan

$$= E_s \times \epsilon_s \quad (2-1)$$

Sehingga regangan luluhnya adalah :

$$\epsilon_y = \frac{\left( \frac{f_y}{\gamma_m} \right)}{E_s} \quad (2-2)$$

### 2.13 Analisis Kuat Lentur Pada Penampang Bertulangan Rangkap

Perhitungan beton bertulang pada penampang lentur dibagi dua, yaitu penampang bertulangan tunggal dan rangkap. Analisis yang sering ditemui di lapangan yaitu analisis yang berdasarkan asumsi luas tulangan tekan adalah 20 % dari luas tulangan tarikannya. Asumsi ini didukung oleh teori dari beberapa literatur yaitu menurut Wiratman (1971), Salmon (1990), dan Anonim (1977), dimana besarnya tulangan tekan dapat ditentukan secara langsung melalui tabel lenturnya yaitu dengan menetapkan rasio tulangan terhadap tarik sebesar 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; dan seterusnya.

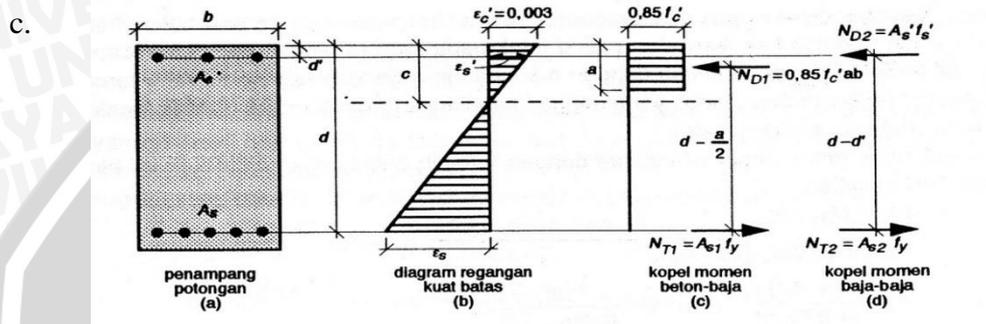
Pengaruh penambahan tulangan tekan untuk meningkatkan kekuatan lentur umumnya berkisar antara 3 % – 4 % sehingga pengaruhnya dapat diabaikan (Salmon 1990). Tulangan tekan diperlukan bila rasio tulangan tarik maksimum untuk tulangan tunggal tidak mencukupi (tulangan rangkap). Jadi jika rasio tulangan tarik maksimum tulangan tunggal sudah mencukupi, besarnya tulangan tekan dapat diambil sembarang, misal 20 % tulangan tarikannya.

Pada analisis tulangan rangkap beranggapan bahwa tegangan tulangan baja tekan ( $f'_s$ ) merupakan fungsi dari regangannya, dan terletak tepat pada titik berat tulangan baja tekan. Terdapat dua kondisi umum dalam menganalisa keberadaan tulangan rangkap ini, antara lain:

- a. Tulangan baja berperilaku elastik hanya sampai pada tingkat di mana regangannya luluh ( $\epsilon_y$ ). Bila regangan tekan baja ( $\epsilon'_s$ ) sama atau lebih besar dari regangan

luluhnya ( $\epsilon_y$ ) maka batas maksimum tegangan tekan baja ( $f_s'$ ) diambil sama dengan tegangan luluhnya ( $f_y$ ). Sedangkan bila regangan tekan baja yang terjadi kurang dari regangan luluhnya maka tegangan tekan baja  $f_s' = \epsilon_s' \cdot f_s$

- b. Bila letak garis netral penampang balok relatif tinggi, regangan  $\epsilon_s' < \epsilon_y$  (belum mencapai luluh). Masing-masing keadaan tersebut tergantung dari posisi garis netral penampang yang terjadi. Kuat momen total balok bertulangan rangkap merupakan penjumlahan kedua kopel momen dalam dengan mengabaikan luas beton tekan yang ditempati oleh tulangan baja tekan.



**Gambar 2.3 Diagram Regangan Balok Bertulangan Rangkap**

Jika menganggap tulangan baja tarik dan tekan telah meluluh, maka :

$$f_s = f_s' = f_y \dots \dots \dots (2-6)$$

Keseimbangan gaya – gaya :  $\sum(H) = 0$ , sehingga  $f_s' = f_y$  :

$$N_T = N_{D1} + N_{D2} \dots \dots \dots (2-7)$$

$$A_s f_y = 0,85 f_c' ab + A_s' f_y \dots \dots \dots (2-8)$$

Nilai a didapatkan dari persamaan berikut :

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{(0,85 \cdot f_c') b} \dots \dots \dots (2-9)$$

Dengan menggunakan anggapan sama dengan yang dipakai pada balok bertulangan tarik saja tentang hubungan antara tinggi blok tegangan beton tekan dengan garis netral penampang balok terhadap serat tepi tekan ( $a = \beta \cdot c$ ), maka letak garis netral dapat ditentukan dan selanjutnya digunakan untuk memeriksa regangan – tulangan baja:

$$c = \frac{a}{0,85} \dots \dots \dots (2-10)$$



Pemeriksaan regangan-tegangan untuk mengetahui apakah asumsi yang digunakan benar, yang berarti bahwa kedua penulangan baik tulangan tekan maupun tarik telah meluluh sebelum beton hancur seperti yang terlihat pada gambar 2.8 b.

Regangan yang diperhitungkan terjadi pada saat dicapai momen ultimit, adalah :

$$\varepsilon_s' = \left( \frac{c - d'}{c} \right) 0,003 \quad \dots \dots \dots (2-11)$$

$$\varepsilon_c = \left( \frac{c - d'}{c} \right) 0,003 \quad \dots \dots \dots (2-12)$$

$$e_y = \frac{f_y}{E_s} \quad \dots \dots \dots (2-13)$$

Apabila  $E_s' < E_y$  dan  $E_s \geq E_y$  untuk mendapatkan nilai  $c$  digunakan persamaan sebagai berikut :

$$A_s f_y = (0,85 f_c' c) ab + A_s f_s' \quad \dots \dots \dots (2-14)$$

$$f_s' = \left( \frac{c - d'}{c} \right) 0,003 E_s \quad \dots \dots \dots (2-15)$$

$$f_s' = \left( 1 - \frac{\beta d'}{c} \right) 0,003 E_s \quad \dots \dots \dots (2-16)$$

$$A_s f_y = (0,85 f_c' c) ab + A_s' \left( 1 - \frac{\beta d'}{c} \right) 0,003 E_s \quad \dots \dots \dots (2-17)$$

Menghitung kuat momen tahanan ideal untuk masing – masing kopel :

$$M_u = N_{D1} \cdot (d - 1/2a) + N_{D2} \cdot (d - d') \quad \dots \dots \dots (2-18)$$

Dari uraian di atas pada penampang balok persegi dengan penulangan tarik saja yang bertugas menahan tekanan adalah beton, sedangkan pada balok bertulangan rangkap yang bertugas adalah beton bersama-sama dengan baja tekan. Penampangnya secara teoritis dibagi menjadi dua bagian seperti diperlihatkan pada gambar 2.3.

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa garis penuh adalah menunjukkan bidang momen nominal, sedangkan garis terputus-putus menunjukkan bidang momen rencana. Dimana dapat dilihat bahwa dapat terjadi pergeseran momen nominal sehingga perlunya perpanjangan tulangan untuk mengatasi masalah tegangan-tegangan yang terjadi.

## 2.14 Penelitian-Penelitian Terdahulu

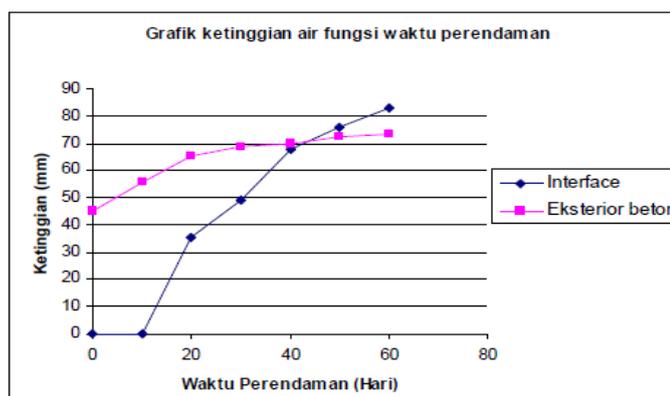
*Miko Eniarti (1996)* mengemukakan bahwa serangan air laut disebabkan oleh serangan Magnesium Sulfat ( $MgSO_4$ ) dan Magnesium Klorida ( $MgCl_2$ ) yang bersifat merugikan beton. Dengan adanya Magnesium Sulfat ( $MgSO_4$ ) akan terjadi penguraian dari Kalsium Silikat Hidrat (CSH) sehingga fungsi perekatan beton akan hilang. Bila beton rapat hanya sebagai  $Ca(OH)_2$  yang berubah menjadi  $CaSO_4$  menggantikan kedudukan ion  $Ca^+$  dalam kapur  $Ca(OH)_2$  sehingga makin lama kapur dalam beton berkurang, sehingga ion  $Mg^{+}$  menyerang CAH dan CSH (bahan perekat dalam beton) sehingga fungsi perekat menjadi hilang, menjadi senyawa-senyawa MAH dan MSH merupakan senyawa yang tidak berfungsi sebagai perekat sehingga beton akan kehilangan ikatan dan kuat tekannya.

*Indriani Santoso, et. al. (2003)* mengemukakan bahwa penggunaan *bottom ash* sebagai material pekerasan jalan adalah salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti efek penggunaan *bottom ash* sebagai pengganti agregat halus terhadap stabilitas, keelehan, rongga udara, rongga di dalam agregat dan *Marshall quotient* dari campuran aspal beton. Penelitian dilakukan dengan menguji efek pemakaian *bottom ash* sebagai pengganti agregat halus sebesar sepuluh sampai 100%. Dari penelitian ditemukan bahwa prosentase terbaik penggantian agregat halus dengan *bottom ash* adalah sepuluh persen. Penggantian ini memenuhi semua persyaratan yang ditentukan kecuali persyaratan rongga udara. Sebuah bahan aditif (*chemcrete*) digunakan untuk memperbaiki rongga udara. Penggunaan *chemcrete* dapat meningkatkan nilai stabilitas serta memperbaiki nilai rongga udara pada campuran aspal beton.

*Yulianto, Erfan Yoky (2007)* mengemukakan bahwa pemanfaatan limbah batubara (*bottom ash*) sebagai bata beton ditinjau dari aspek teknik dan lingkungan. Pemanfaatan limbah tersebut diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap lingkungan yaitu mengurangi dampak buruk yang timbul akibat timbunan limbah batubara tersebut. Penelitian dilakukan dengan menguji kelayakan bata beton tersebut terhadap standar mutu teknis dan lingkungan. Hasil dari penelitian diketahui bahwa kondisi optimal menurut standar mutu teknis (LPMB-1989) terdapat pada perbandingan komposisi berat semen dan agregat halus sebesar 1 : 5, dengan proporsi limbah batubara (*bottom ash*) sebesar 10% dari berat agregat halus. Dari proporsi perbandingan tersebut

didapatkan kuat tekan bata beton sebesar 13,54 MPa dan penyerapan air sebesar 8,86%. Pada bata beton tersebut terdapat unsur logam berat yang melebihi standar baku mutu (PP Nomor 85 tahun 1999), yaitu berupa kadmium (Cd) sebesar 2,438 ppm, kromium (Cr) sebesar 9,003 ppm, tembaga (Cu) sebesar 25,892 ppm, timbal (Pb) sebesar 32,464 ppm dan seng (Zn) sebesar 50,244 ppm.

*Bernad M.S. (2009)* mengemukakan bahwa air memasuki beton dengan cara permeasi dan difusi menuju dua arah yaitu ke arah vertikal dan ke arah radial. Permeasi dan difusi ke arah vertikal membuat air naik dari batas perendaman ke atas sehingga eksterior beton yang tidak terendam akan ikut basah. Hal ini akan tampak dari peningkatan ketinggian air pada eksterior beton fungsi waktu dimana dengan semakin bertambahnya waktu ketinggian air pada eksterior beton akan semakin bertambah sedangkan permeasi dan difusi ke arah radial membuat air masuk dari selimut beton menuju ke *interface* baja tulangan dengan beton dimana hal ini terlihat dari perubahan prosentase khlor di dalam beton. Prosentase khlor akan menurun secara gradual dari permukaan hingga ke dalam beton. Pada akhirnya kenaikan air pada *interface* baja tulangan dengan beton tidak bergantung pada proses permeasi dan difusi air dari selimut beton menuju *interface*. Air naik lebih cepat di dalam *interface* baja tulangan dengan beton dibandingkan dengan difusi air dari selimut beton ke dalam *interface* baja tulangan dengan beton. Serangan korosi pada baja tulangan dimulai dari dasar baja tulangan menuju ke atas. Dasar baja tulangan terkorosi lebih dahulu karena mengalami kontak dengan media korosi lebih cepat. Hal ini yang menyebabkan pengurangan ketebalan baja tulangan di dasar lebih cepat dibandingkan dengan pengurangan ketebalan baja tulangan di titik observasi yang lebih tinggi. Fenomena kapilaritas pada *interface* baja tulangan dengan beton dapat dimodelkan dalam suatu persamaan polinomial tingkat tiga yaitu  $y = -0,0007x^3 + 0,0541x^2 + 0,7604x + 3,1081$ .



**Gambar 2.4** ketinggian air fungsi waktu perendaman

Dimas Setyo Yuliandoko (2012) mengemukakan bahwa pemanfaatan *bottom ash* sebagai pengganti semen berpengaruh terhadap kuat lentur dan permeabilitas dari genteng beton. Hal ini dibuktikan dengan tidak menurunnya nilai kuat lentur rata-rata pada prosentase 0% - 30% dan setelah itu baru mengalami penurunan yang signifikan. Berdasarkan uji analisis varian (anova) satu arah juga disimpulkan bahwa *bottom ash* berpengaruh terhadap kuat lentur yang dihasilkan genteng beton. Sementara berdasarkan perhitungan anova dengan dua bagian, 0% - 30% dan 30% - 50% diperoleh kesimpulan bahwa bagian pertama tidak ada peningkatan yang signifikan, sebaliknya pada bagian kedua terjadi penurunan yang signifikan. Sehingga dapat dikatakan *bottom ash* berpengaruh terhadap penurunan kuat lentur yang dihasilkan.

Kris Naedi (2012) mengemukakan bahwa adanya pengaruh yang nyata dari pemanfaatan *bottom ash* sebagai pengganti semen terhadap kuat tekan pada *paving block*. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan kuat tekan seiring dengan bertambahnya *bottom ash* yang digunakan, karena sifat semen yang mampu mengikat dan mengeras di dalam air tidak dapat digantikan seluruhnya oleh *bottom ash* dan karena penggunaan air dalam jumlah yang sama dalam semua variasi.

Adanya pengaruh yang nyata dari pemanfaatan *bottom ash* sebagai pengganti semen terhadap penyerapan air *paving block*. Hal ini ditunjukkan dengan adanya kenaikan prosentase penyerapan air seiring dengan bertambahnya *bottom ash* yang digunakan, karena semakin banyak pori-pori yang terdapat pada *paving block*.

Untuk pemanfaatan *bottom ash* sebagai pengganti semen dalam pembuatan *paving block*, dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Untuk penggunaan 25%, 30%, 35% dan 40% termasuk antara mutu A dan mutu B baik dari segi penyerapan air maupun kuat tekan. Dari segi keempat variasi tersebut, variasi 30% *bottom ash* merupakan prosentase yang paling maksimum bila digunakan dalam campuran *paving block* antara mutu A dan mutu B karena kuat tekannya menunjukkan nilai tertinggi.
- b. Untuk penggunaan 45% termasuk antara mutu B dan mutu C baik dari segi penyerapan air maupun kuat tekan.
- c. Untuk penggunaan 50%, 55% dan 60% termasuk antara mutu C dan mutu D baik dari segi penyerapan air maupun kuat tekan. Dari ketiga variasi tersebut, variasi 50% *bottom ash* merupakan prosentase yang paling maksimum bila digunakan dalam campuran *paving block* antara mutu C dan mutu D karena kuat tekannya menunjukkan nilai tertinggi.

*Septiawan Arifin H. (2012)* mengemukakan bahwa prosentase *bottom ash* digunakan sebagai pengganti semen adalah 5% – 60% dari total berat kebutuhan semen dengan interval 5% sehingga terdapat 12 variasi dengan 1 variasi sebagai kontrol yaitu benda uji dengan kadar *bottom ash* sebesar 0%. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan cara memberikan beban searah bidang permukaan tekan sesuai dengan arah beban pada kenyataan di lapangan. Pengujian tekan dilakukan menggunakan pelat besi. Pengujian tekan dilakukan kurang dari satu menit dan tidak boleh lebih dari dua menit. Sedangkan untuk pengujian penyerapan, dilakukan dengan cara merendam benda uji kedalam bak uji selama 24 jam kemudian di oven sampai berat benda uji stabil dan tidak berubah sampai tiga kali pengujian.

Dari hasil dan uji statistik dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan *bottom ash* pada benda uji tidak berpengaruh terhadap kuat tekan dari batako. Justru penambahan *bottom ash* membuat kuat tekan batako menjadi turun.

## 2.15 Hipotesis

Dari berbagai kajian teori dan permasalahan yang telah diuraikan diatas maka pada penelitian yang disajikan hipotesis penelitian sebagai berikut ” Terdapat pengaruh kapasitas lentur terhadap variasi campuran kadar *bottom ash* dengan prosentase 0%, 10%, 20%, 25% dan direndam dengan air laut dalam durasi 7, 14, 28 hari pada balok”.