

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Teknologi beton terus berkembang seiring dengan tuntutan kebutuhan yang semakin meningkat baik kualitas maupun kuantitas. Beton merupakan suatu bahan komposit (campuran) dari beberapa material yaitu; semen, agregat halus, agregat kasar, air, serta bahan tambahan lain dengan perbandingan tertentu (Kardiyono Tjokrodinuljo, 1992). Karena beton merupakan komposit, maka kualitas beton sangat tergantung dari kualitas masing-masing material pembentuknya.

Beton merupakan bahan bangunan yang tersusun dari beberapa bahan material yang kekuatan kuat beton dipengaruhi oleh perbandingan bahan susun yang digunakan, oleh karena itu dengan mengatur perbandingan bahan susun beton dapat dihasilkan kuat desak beton yang bervariasi sesuai dengan perencanaan. Agar dihasilkan kuat desak beton yang sesuai dengan perencanaan diperlukan *mix design* untuk menentukan jumlah bahan susun yang dibutuhkan. Di samping itu, adukan beton harus diusahakan dalam kondisi yang benar-benar homogen dengan kelecakan tertentu agar tidak terjadi *segregasi*. Selain perbandingan bahan susunnya, kekuatan beton ditentukan oleh padat tidaknya campuran bahan susun beton tersebut. Semakin kecil rongga (kandungan udara) yang dihasilkan dalam campuran beton, makin tinggi kuat desak beton yang dihasilkan.

Perkembangan teknologi beton yang ditandai dengan semakin baik dari mutu beton, dengan usaha lain adalah dengan memanfaatkan fenomena bahwa semakin padat beton atau semakin kecil pori-pori yang ada semakin tinggi mutu beton yang dihasilkan. Pada mortar beton, semen dan air yang berupa pasta mengikat agregat halus dan agregat kasar dengan masih menyisakan rongga atau pori-pori yang tidak dapat terisi oleh butiran semen. Ruang yang tidak ditempati oleh butiran semen, merupakan rongga yang berisi udara dan air yang saling berhubungan dan disebut kapiler. Kapiler yang terbentuk akan tetap tinggal ketika beton telah mengeras sehingga beton akan mempunyai sifat tembus air yang besar, akibatnya kekuatan berkurang. (A. Antono, 1988). Rongga ini dapat dikurangi dengan bahan tambah meski penambahan ini akan menambah biaya pelaksanaan. Bahan tambah ini merupakan bahan khusus yang ditambahkan dalam mortar sebagai pengisi dan pada umumnya berupa bahan kimia organik dan bubuk mineral aktif (Brook, 1986).

Kendaraan tersebut diangkat oleh penyusun pada penelitian ini dengan memanfaatkan limbah pembakaran batubara (*Fly Ash*) Proyek PLTU di Suralaya, Banten. *Fly Ash* digunakan sebagai bahan pengisi untuk memperkecil pori-pori yang ada dan juga memanfaatkan sifat pozzolan dari *Fly Ash* untuk memperbaiki mutu beton.

2.2 Landasan Teori

Penelitian ini telah disampaikan dalam seminar dengan makalah seminar yang bertema “Stabilitas Abu Terbang Suralaya” oleh Bambang Ismanto, yang disebutkan sifat-sifat pozzolan dari *Fly Ash* yang memenuhi persyaratan standar ASTM yaitu kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimum 70% berat.

Fly Ash ini mengandung pozzolan yang telah memenuhi syarat tersebut, sehingga dapat menjadi bahan penambah (*aditif mineral*) yang baik untuk beton. Pozzolan adalah bahan yang mengandung silikon dioksida alami atau buatan yang tidak mempunyai sifat-sifat semen. Karena pozzolan mempunyai kandungan utama silikon dioksida, maka pozzolan pada suhu biasa dapat bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida membentuk senyawa kalsium silikat hidrat. Pada beton normal yang sudah mengeras seringkali terdapat unsur kalsium hidroksida yang dihasilkan dari proses hidrasi semen dan merupakan bagian lemah beton serta sumber sensitif beton terhadap serangan senyawa sulfat.

Penelitian mengenai beton tahan sulfat sudah pernah dilakukan dan dikembangkan di Indonesia oleh LPI dan Badan Penelitian dan Pengembangan DPU, yang dituangkan ke dalam SK-SNI-S-37-1990-03 tentang Standar Spesifikasi Beton Tahan Sulfat.

Beton dengan limbah pembakaran batubara (*Fly Ash*) sebagai bahan tambah material dengan komposisi tertentu yang diharapkan akan didapatkan kuat desak beton yang lebih tinggi dan ketahanan kuat desak beton *Fly Ash* terhadap agresi magnesium sulfat sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan untuk struktur utama dengan harga relatif lebih murah.

2.2.1 Bahan pembentuk beton

Untuk mendapatkan beton yang baik dan sesuai dengan mutu yang disyaratkan, maka sifat-sifat dan persyaratan-persyaratan material beton mutlak harus diketahui karena sifat bahan yang tidak sesuai dan tidak memenuhi syarat, akan berpengaruh terhadap mutu beton yang akan diperoleh.

2.2.1.1 Semen portland

Semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan tambahan *gips* (kalsium sulfat). Fungsi semen ialah untuk merekatkan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang padat. Selain itu juga untuk mengisi rongga-rongga diantara butiran agregat. Suatu semen jika diaduk dengan agregat kasar, agregat halus, dan air akan terbentuk beton setelah mengalami proses pengerasan.

Semen portland dibuat dengan melalui beberapa langkah, sehingga hasilnya sangat halus. Semen diperoleh dengan membakar secara bersamaan, kapur, silika, alumina, dan besi. Dalam proses pembuatannya, ditambahkan *gips* (CaSO_4) sebanyak 2%-4% yang berfungsi sebagai pengontrol terhadap waktu pengikatan. Penambahan tersebut memberikan perubahan pada susunan kimia dasar menjadi susunan kimia yang lebih kompleks dan menjadi unsur utama sebagai berikut:

- a. Trikalsium silikat (C_3S) atau $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,
- b. Dikalsium silikat (C_2S) atau $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,
- c. Trikalsium aluminat (C_3A) atau $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,
- d. Tetrakalsium aluminoforit (C_4AF) atau $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Dalam pemakaian semen portland, perlu dilakukan pemeriksaan secara berkala terhadap sifat-sifat fisik agar tetap memenuhi syarat dan kualitas yang ditetapkan sehingga dapat berfungsi secara efektif. Sifat-sifat semen yang penting adalah: kehalusan butir, waktu ikatan, kekuatan, dan panas hidrasi.

Perubahan komposisi kimia semen yang dilakukan dengan cara mengubah persentasi empat komponen utama semen, dapat menghasilkan beberapa jenis sesuai dengan tujuan pemakaian, semen portland di Indonesia (PUBI-1982) dibagi menjadi 5 jenis sebagai berikut:

- a. Jenis I : Semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti pada jenis lainnya,
- b. Jenis II : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang,
- c. Jenis III : Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan kekuatan yang tinggi,
- d. Jenis IV : Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan panas hidrasi yang rendah,
- e. Jenis V : Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan sangat tahan terhadap sulfat.

Pada penelitian ini dipakai semen Gresik yang termasuk semen portland dengan jenis I kemasan 50 kg yang ada di pasaran.

2.2.1.2 Agregat

Agregat adalah butiran mineral yang merupakan hasil *disintegrasi* alami dari batu-batuan atau juga berupa hasil mesin pemecah batu dengan memecah batu alam. Agregat berfungsi sebagai bahan pengisi dalam beton. Walaupun hanya sebagai bahan pengisi, akan tetapi agregat menempati sekitar 70% volume beton, karena itu agregat adalah komponen yang paling berpengaruh terhadap sifat-sifat dan kekuatan

dalam beton, sehingga pemilihan agregat merupakan bagian penting dalam pembuatan beton.

Cara membedakan jenis agregat yang paling banyak dilakukan adalah dengan berdasarkan pada ukuran butir-butirnya. Agregat yang mempunyai butir-butir yang besar disebut agregat kasar, sedangkan butir agregat yang kecil disebut agregat halus. Dalam teknologi beton, agregat yang butir-butirnya lebih besar dari 4,8 mm disebut agregat kasar, sedangkan agregat yang butir-butirnya lebih kecil dari 4,8 mm disebut agregat halus.

Agregat halus adalah pasir alam sebagai disintegrasi alami dari batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran terbesar 4,8 mm (Gideon dan Vis, 1992). Pasir alam dapat digolongkan menjadi tiga macam (Kardiyono, T. 1992), yaitu:

1. Pasir galian

Pasir ini diperoleh langsung dari permukaan tanah atau dengan cara menggali. Bentuk pasir ini biasanya tajam, bersudut, berpori dan bebas dari kandungan garam walaupun biasanya harus dibersihkan dari kotoran tanah dengan jalan dicuci terlebih dahulu,

2. Pasir sungai

Pasir ini diperoleh langsung dari dasar sungai, yang pada umumnya berbutir halus, bulat-bulat akibat proses gesekan. Daya lekatan antar butiran agak kurang karena bentuk butiran yang bulat,

3. Pasir laut

Pasir laut adalah pasir yang diambil dari pantai. Butir-butirnya halus dan bulat arena gesekan. Pasir ini merupakan pasir yang jelek karena mengandung banyak garam-garaman. Garam-garaman ini menyerap kandungan air dari udara dan mengakibatkan pasir selalu agak basah serta menyebabkan pengembangan volume bila dipakai pada bangunan. Selain dari garam-garaman ini mengakibatkan korosi terhadap struktur beton. Oleh karena itu pasir laut sebaiknya tidak dipakai.

Pada penelitian ini dipakai pasir sungai yang diambil dari kali Progo.

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil *disintegrasi* alami dari batuan atau batu pecah yang diperoleh dari pemecah batu dengan ukuran 5-40 mm (Gideon dan Vis, 1992). Berdasarkan berat jenisnya, agregat kasar dibedakan menjadi tiga golongan (Kardiyono.T, 1992), yaitu:

1. Agregat normal

Agregat normal adalah agregat yang berat jenisnya antara 2,5-2,7 gr/cm^3 . Agregat ini biasanya berasal dari agregat basalt, granit, kuarsa, dan sebagainya. Beton yang dihasilkan mempunyai berat jenis sekitar 2,3 gr/cm^3 .

2. Agregat berat

Agregat berat adalah agregat yang mempunyai berat jenis lebih dari 2,8 gr/cm^3 , misalnya magnetik (FeO_4), barit (BaSO_4) atau serbuk besi. Beton yang dihasilkan mempunyai berat jenis tinggi sampai 5 gr/cm^3 . Penggunaannya dipakai sebagai pelindung dari radiasi.

3. Agregat ringan

Agregat ringan adalah agregat yang mempunyai berat jenis kurang dari $2,0 \text{ gr/cm}^3$ yang biasanya dibuat untuk beton non struktural atau dinding beton. Kebaikannya adalah berat sendiri yang rendah sehingga strukturnya ringan dan pondasinya lebih ringan.

Agregat kasar harus memenuhi persyaratan gradasi yang disyaratkan. Apabila butir-butir agregat mempunyai gradasi yang sama atau seragam maka volume pori akan besar, sebaliknya bila ukuran butirnya bervariasi atau bergradasi baik maka akan didapat volume pori yang kecil. Pada pelaksanaan beton, diinginkan komposisi butiran dengan kemampuan tinggi karena volume porinya sedikit dan ini hanya membutuhkan bahan ikat yang sedikit pula.

Menilai jenis agregat yang akan digunakan sebagai bahan campuran beton, bergantung pada: mutunya, tersedia bahannya, harga bahannya, dan jenis konstruksi yang akan menggunakan bahan tersebut.

Untuk memenuhi syarat mutu yang ditetapkan, agregat harus memenuhi syarat sebagai berikut: ukuran, gradasi, kekuatan, bentuk butiran, bentuk permukaan, dan kebersihan.

A. Ukuran

Oleh karena harga agregat adalah lebih murah dari semen, maka penggunaan agregat secara maksimum dalam beton, baik jumlah maupun ukurannya sebagaimana yang disebutkan diatas akan menjadi lebih ekonomis. Penggunaan ukuran butir agregat dalam beton akan berpengaruh terhadap jumlah semen yang akan digunakan, maka jumlah kebutuhan semen semakin sedikit. Hal ini terjadi

karena penggunaan agregat yang besar mengurangi volume pori-pori dalam beton yang dapat diisi oleh semen. Namun demikian, penggunaan ukuran maksimum agregat perlu mempertimbangkan faktor pelaksanaan di lapangan, sehingga harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- a. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $1/4$ kali jarak bersih antara batang-batang atau antara berkas-berkas tulangan,
- b. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $1/3$ kali tebal plat,
- c. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $1/5$ kali jarak terkecil antara bidang-bidang samping dari cetakan.

B. Gradasi

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Penggunaan butir agregat dengan ukuran yang sama akan memperbesar pori dalam beton, sebaliknya dengan butir yang bervariasi (gradasi) volume pori akan semakin kecil. Dengan gradasi agregat, butiran yang kecil akan mengisi pori diantara butiran yang lebih besar, sehingga pori-pori menjadi lebih sedikit.

Sebagai pernyataan gradasi dipakai nilai persentasi dari berat agregat yang tertinggal atau lewat di dalam suatu susunan ayakan.

C. Kekuatan

Kekuatan agregat adalah kuat tekan yang dimiliki agregat. Sebagai bahan pembentuk beton yang menempati sebagian besar dari volume beton, kekuatan

agregat yang akan digunakan harus lebih tinggi dari pada kekuatan beton yang dibuat dari agregat tersebut.

Butir-butir agregat yang lemah tidak dapat menghasilkan beton yang kekuatannya yang dapat diandalkan, akan tetapi dengan butir-butir agregat yang kuat, akan diperoleh kekuatan beton yang dapat diandalkan. Agregat yang kuat mempunyai modulus elastisitas yang tinggi yang merupakan sifat penting dan berpengaruh besar terhadap kekuatan beton.

Dalam pelaksanaan, kekuatan agregat juga diperlukan karena pada waktu pembuatan beton, bahan ini harus mengalami gerakan-gerakan dan gesekan-gesekan yang kuat baik pada saat pencampuran pada *mixer* maupun pada saat pengecoran dan pemadatan. Agregat harus dapat menahan keausan dan pemecahan. Cara untuk menguji kekuatan agregat ialah dengan menggunakan mesin uji Los Angeles atau Bejana Rodellof. Pada cara ini contoh butir-butir agregat dimasukkan ke dalam silinder logam dengan bola-bola baja pemukul, kemudian silinder diputar sehingga butir-butir tersebut terpukul-pukul dan terabrasi. Kehilangan berat tidak boleh lebih dari 50%.

D. Bentuk butiran

Bentuk butiran agregat lebih berpengaruh pada beton segar daripada beton setelah mengeras. Berdasarkan bentuknya, butiran agregat dapat dibedakan menjadi sebagai berikut:

- a. Agregat bulat, mempunyai rongga udara minimum 33% sehingga hanya memerlukan pasta semen yang sedikit, namun ikatan antar butir-butirnya

kurang kuat sehingga lekatnya lemah. Agregat ini tidak cocok untuk beton mutu tinggi maupun perkerasan jalan,

- b. Agregat bulat sebagian, mempunyai rongga udara berkisar antara 35%-38%. Dengan membutuhkan lebih banyak pasta semen untuk mendapatkan beton segar yang dapat dikerjakan. Ikatan antar butir-butir lebih baik daripada agregat bulat, namun belum cukup untuk dibuat beton mutu tinggi,
- c. Agregat bersudut, mempunyai rongga udara berkisar antara 38%-40%. Pasta semen yang dibutuhkan lebih banyak untuk membuat adukan beton yang dapat dikerjakan, akan tetapi ikatan antar butir-butirnya baik sehingga membentuk daya lekat yang baik. Agregat ini baik untuk membuat adukan beton mutu tinggi maupun lapis perkerasan jalan,
- d. Agregat memanjang, ialah agregat yang ukuran terbesarnya lebih dari 9/5 ukuran rata-rata ayakan yang meloloskan dan menahan butiran agregat. Agregat ini berpengaruh jelek terhadap daya tahanan beton, karena cenderung berkedudukan pada bidang rata air sehingga terdapat rongga udara di bawahnya. Agregat ini tidak boleh lebih dari 15%,
- e. Agregat pipih, ialah agregat yang ukuran terkecilnya kurang dari 3/5 ukuran rata-rata ayakan yang meloloskan dan menahan butiran agregat. Sebagaimana agregat memanjang, agregat pipih juga kurang baik terhadap beton, sehingga tidak boleh lebih dari 15%.

memanjang untuk membuat beton. Pada penelitian ini dipakai agregat bulat sebagian dan agregat bersudut agar terjadi kelekatan yang baik.

E. Tekstur permukaan

Tekstur permukaan ialah suatu sifat permukaan yang bergantung pada ukuran apakah permukaan butir termasuk halus atau kasar, mengkilap atau kusam dan macam dari bentuk kekasaran permukaan. Berdasarkan pada pemeriksaan visual butiran agregat, tekstur permukaan butiran agregat dapat dibedakan menjadi: sangat halus, halus, granular, kasar, berkilat, berpori, dan berlobang-lobang.

Tekstur permukaan tergantung pada kekerasan, ukuran molekul, tekstur batuan, dan juga terhadap besar gaya yang bekerja pada permukaan butiran yang telah membuat licin atau kasar permukaan tersebut. Bentuk dari tekstur permukaan sangat berpengaruh terhadap sebagai berikut:

- a. daya serapan terhadap air,
- b. kemudahan pengerjaan terhadap beton segarnya,
- c. daya lekat antara agregat dengan pastanya.

Suatu agregat dengan permukaan yang berpori dan kasar lebih disukai daripada agregat dengan permukaan halus, karena agregat dengan permukaan kasar dapat meningkatkan rekatan antara agregat dengan semen sampai 1,75 kali dan kuat betonnya dapat meningkat sekitar 20%. Pada penelitian ini dipakai agregat kasar agar dapat ditingkatkan daya rekat yang baik dengan semen.

F. Kebersihan

Agregat yang ada pada umumnya mengandung bahan-bahan yang dapat memberikan pengaruh yang merugikan terhadap kekuatan beton, permukaan beton, dan kemudahan pengerjaan.

Ditinjau dari aksi zat-zat yang berpengaruh buruk tersebut, maka dapat dibedakan menjadi tiga macam sebagai berikut:

- a. zat yang mengganggu proses hidrasi semen, yaitu bahan-bahan organik berupa sisa-sisa tumbuhan dalam bentuk humus,
- b. zat yang melapisi agregat sehingga mengganggu terbentuknya lekatan yang baik antar agregat dengan semen seperti tanah liat, dan lempung,
- c. butiran yang kurang tahan cuaca, yang bersifat lemah dan menimbulkan reaksi kimia antara agregat dengan semen seperti mika, butir-butir yang mengandung garam, arang, dan belerang.

Dalam penelitian ini digunakan agregat halus dan agregat kasar yang berasal dari Sungai Kali Progo, Yogyakarta.

2.2.1.3 Air

Di dalam campuran beton, air mempunyai dua fungsi, yaitu untuk memungkinkan reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya pengerasan serta sebagai pelumas campuran butir-butir kerikil, pasir, dan semen agar memudahkan pelaksanaan dan pencetakan. Seperti pada reaksi kimia lainnya, semen dan air dikombinasikan dalam proporsi tertentu. Untuk bereaksi dengan semen, air yang dibutuhkan sekitar 30% dari berat semen, namun dalam kenyataannya beton sulit untuk dikerjakan, oleh karena itu dibutuhkan tambahan air untuk menjadi

pelumas. Tetapi perlu diketahui tambahan air tidak boleh terlalu banyak karena kekuatan beton akan menurun dan beton menjadi porous. Selain itu, kelebihan air mengakibatkan *bleeding* dan kemudian menjadi lapisan buih yang mengurangi lekatan antara lapis-lapis beton.

Adapun syarat-syarat air yang digunakan sebagai bahan pembuat beton adalah sebagai berikut:

- a. tidak mengandung lumpur lebih dari 2 gr/liter,
- b. tidak mengandung garam-garam (asam, zat organik) yang dapat merusak beton lebih dari 15 gr/liter,
- c. tidak mengandung klorida lebih dari 0,5 gr/liter,
- d. tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gr/liter.

Secara umum, air yang dapat dipakai untuk bahan pencampur beton ialah air yang bila dipakai akan dapat menghasilkan beton dengan kekuatan lebih dari 90% kekuatan yang memakai air suling. Untuk air rawatan, dapat juga dipakai juga air yang digunakan untuk pengadukan.

Air yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, jalan Kaliurang km 14,4 Yogyakarta.

2.2.1.4 Fly Ash

Fly Ash umumnya diperoleh dari sisa pembakaran Pusat Listrik Tenaga Uap, yang mempergunakan batubara sebagai sumber energi. Sisa pembakaran berupa partikel halus, keluar bersama-sama gas buang. Partikel ini dinamakan *Fly Ash*, sedang sisa pembakaran yang berupa partikel kasar keluar melalui bagian bawah,

yang disebut Bottom Ash. Pada Penelitian ini *Fly Ash* akan digunakan sebagai bahan tambah (mineral admixture) yang berfungsi sebagai bahan pengisi pori adukan beton.

Fly Ash harus memenuhi syarat pozzolan dan persyaratan sebagai bahan tambah standar ASTM yaitu kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimum 70% berat. Oleh karena itu *Fly Ash* dengan memanfaatkan sifat-sifat fisika dan kimia, dapat dioptimalkan untuk meningkatkan mutu beton. Adapun sifat-sifat kimia maupun fisika dapat dilihat dalam Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1. Komposisi unsur kimia *Fly Ash* dalam satuan persen berat

No	Unsur Kimia	Persen berat <i>Fly Ash</i>
1	SiO_2	56.20
2	Al_2O_3	29.07
3	Fe_2O_3	5.77
4	Na_2O	1.27
5	CaO	1.63
6	TiO_2	1.13
7	MgO	1.32
8	P_2O_5	0.29
9	K_2O	0.71
10	SO_3	0.74

Tabel 2.2 Sifat fisik *Fly Ash* ex batubara

No	Sifat fisik	Data yang ada
1	Berat Jenis	1,99 - 2,40 gr/cm^3
2	kehalusan Butir	163,25 - 227,19 m^2/kg
3	Kadar Air	0,55 - 4,6 %

Dengan sifat-sifat tersebut *Fly Ash* diharapkan dapat meningkatkan ketahanan dan keawetan terhadap rembesan senyawa sulfat.

2.2.1.5 Senyawa Magnesium Sulfat

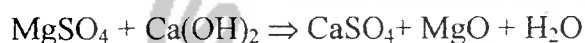
Larutan Magnesium Sulfat merupakan salah satu unsur terbesar di air laut yang bersifat merusak. Senyawa sulfat mengadakan agresi pada beton dan menyebabkan pengembangan, perusakan, dan dengan sendirinya menimbulkan pecah-pecah (**disintegrasi**). Agresi ini dibarengi dengan pengembangan yang tidak begitu banyak, yang mungkin tidak tampak pada betonnya sendiri, tapi mungkin menyebabkan kerusakan pada titik-titik yang tertahan, dan selama berlangsung agresi biasanya terdapat beberapa perubahan warna dari semen normal abu-abu, di samping terjadi retak-retak, penggelembungan, yang mulai dari permukaan beton padat, tetapi menembus lebih ke dalam pada beton yang porous. (**Mudrock dan Brook, 1986**).

Serangan sulfat yang dibahas adalah serangan yang disebabkan oleh senyawa Magnesium sulfat ($MgSO_4$). Semua senyawa sulfat yang larut dalam air bersifat merusak. Faktor-faktor penting yang menentukan ketahanan beton terhadap agresi senyawa sulfat adalah sebagai berikut:

- a. Kepadatan beton, semakin padat betonnya, semakin baik ketahanannya. Faktor air semen rendah dan penambahan bahan tambahan halus, abu terbang, tras, atau silika fume, akan berdampak positif.
- b. Kehadiran aluminat pada semen, Semen dengan kadar Tricalcium aluminat (C_3A) rendah ($\leq 3\%$) cukup untuk menahan perusakan senyawa sulfat. Suatu semen berkadar rendah, C_3A juga merugikan yakni beton mempunyai struktur yang kurang padat (**Gideon dan Vis, 1992**)

2.2.2 Pengaruh kimia

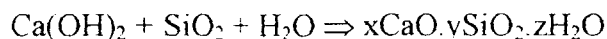
Untuk menguji ketahanan beton terhadap agresi Magnesium sulfat, beton tersebut harus direndam dulu ke dalam larutan tersebut dengan prosentasi berat tertentu selama selang waktu tertentu. Beton yang mengandung Ca(OH)_2 dan C_3A akan bereaksi dengan sulfat, yang hasil akhir akan membentuk ettringite. Hasil reaksi ini menyebabkan terjadinya pemuaian sehingga terjadi craking. Reaksi berlangsung sebagai berikut:



Kalsium hidroksida $\{\text{Ca(OH)}_2\}$ yang berasal dari dalam beton yang dapat mengikat senyawa kimia terlarut menjadi beberapa molekul. Molekul-molekul ini terdiri dari Kalsium sulfat (gips), magnesia, dan air. Magnesia (magnesium oksida) merupakan salah satu sifat kimia dari Fly Ash dalam jumlah yang sangat kecil, yang berfungsi sebagai pembakaran semen. Sedangkan kalsium sulfat sering disebut gipsum, yang bila beraksi dengan C_3A yang ada dalam komposisi semen, akan membentuk ettringite (calciumsulfoaluminat) yang dapat menyebabkan retak-retak atau disintegrasi pada beton karena ettringite mempunyai volume 2,27 kali volume C_3A pada semen portland (Kusnadi.M, Teknologi Beton).

Kemampuan beton *Fly Ash* adalah yang dapat mengurangi permeabilitas dan mempunyai sifat pozzolan yang baik sehingga dapat menjamin keawetan terhadap rembesan senyawa sulfat. Salah satu sifat kimia pozzolan dari *Fly Ash* adalah SiO_2 (Silikon Dioksida) bereaksi dengan Kalsium Hidroksida $\{\text{Ca(OH)}_2\}$ akibat adanya hidrasi (reaksi antara air dengan semen) membentuk kalsium silikat. Karena kalsium hidroksida bersifat basa kuat maka akan sangat mudah bereaksi dengan senyawa

sulfat yang bersifat merusak. Dengan adanya SiO_2 dalam *Fly Ash* sebagai bahan tambah maka dapat mengurangi kandungan Kalsium Hidroksida menjadi Kalsium Silikat Hidrat.



Beton direndam dalam larutan jenuh MgSO_4 , SiO_2 dalam *Fly Ash* diharapkan dapat melarutkan Mg sehingga menghasilkan MgSiO_3 dan SO_3 , dan dengan adanya SiO_2 dalam *Fly Ash* dapat melarutkan Magnesium sulfat.



2.2.3 Faktor air semen

Faktor air semen (fas) adalah perbandingan berat air dengan berat semen yang digunakan dalam adukan beton. Faktor air semen sangat mempengaruhi kekuatan beton. Hubungan antara faktor air semen dengan kuat desak beton secara umum dapat ditulis dengan rumus yang diusulkan Duff Abrams (1919) sebagai berikut:

$$f_c = \frac{A}{B^{1.5 \cdot x}}$$

Keterangan : f_c = kuat desak beton

x = faktor air semen

A, B = konstanta

Dengan demikian semakin besar faktor air semen semakin rendah kuat desak betonnya, walaupun menurut rumusnya tersebut tampak bahwa semakin kecil fas semakin tinggi kuat desak beton, tetapi nilai fas yang rendah akan menyulitkan pepadatan, sehingga kekuatan beton akan rendah karena beton kurang padat.

2.2.4 Kekentalan

Beton yang padat dan kuat adalah beton dengan jumlah volume rongga yang minimal. Beton yang padat diperoleh dengan menggunakan jumlah air yang minimal konsisten dengan derajat *workabilitas* yang dibutuhkan untuk memberikan kepadatan maksimal.

Tingkat kemudahan pengerjaan adukan beton berkaitan dengan tingkat kekentalan adukan beton, makin kental suatu adukan beton makin susah cara pengerjaannya. Kekentalan adukan beton harus disesuaikan dengan cara pengangkutan, cara pemadatan, jenis konstruksi, dan kerapatan dari tulangan. Kekentalan tersebut tergantung pada jumlah dan jenis semen, nilai fas, jenis dan susunan butir agregat serta penggunaan bahan-bahan pembantu. Untuk mengetahui tingkat kekentalan adukan beton, dapat dilakukan percobaan slump. Adukan beton untuk keperluan pengujian slump ini harus diambil langsung dari mesin pengaduk. Hasil pengukuran dari pengujian slump yang dilakukan disebut ukuran slump yang merupakan nilai atau ukuran dari kekentalan adukan beton yang dibuat.

Untuk mencegah penggunaan adukan beton yang terlalu kental atau terlalu encer, dianjurkan untuk menggunakan nilai-nilai slump yang terletak dalam batas-batas yang ditunjukkan dalam Tabel 2.10.

Untuk maksud dan alasan tertentu, maka dengan persetujuan pengawas ahli, dapat dipakai nilai-nilai slump yang menyimpang daripada yang tercantum dalam

Tabel 2.3 asal dipenuhi hal-hal sebagai berikut:

- a. beton dapat dikerjakan dengan baik,
- b. tidak terjadi pemisahan dari adukan beton,
- c. mutu beton yang disyaratkan tetap terpenuhi.

2.2.5 Workability

Workability (kemudahan pengerjaan) merupakan ukuran tingkat kemudahan adukan untuk diaduk, dituangkan, dan dipadatkan. Perbandingan bahan-bahan penyusun beton, secara bersama-sama mempengaruhi sifat kemudahan pengerjaan adukan beton. Unsur-unsur yang mempengaruhi sifat kemudahan pengerjaan adukan beton antara lain:

- a. Jumlah air yang dipergunakan dalam campuran adukan beton. Jumlah air ini akan mempengaruhi konsistensi adukan, yaitu semakin banyak air yang digunakan maka adukan beton semakin encer, sehingga semakin mudah untuk dikerjakan,
- b. Jumlah semen yang dipergunakan. Penambahan jumlah semen ke dalam campuran adukan beton akan memudahkan pengerjaan adukan betonnya, karena akan diikuti dengan penambahan air campuran untuk memperoleh nilai fas tetap,
- c. Penambahan bahan tambah tertentu yang bertujuan untuk meningkatkan kemudahan pengerjaan adukan pada fas rendah misalnya dengan penambahan *plastizier*.

Adukan dengan tingkat kelecakan tinggi mempunyai resiko yang besar terhadap *bleeding* atau *water gain*. Hal ini terjadi karena bahan-bahan padat adukan

beton mengendap dan bahan susun kurang mengikat air campuran. Resiko bleeding dapat dikurangi dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. air campuran yang dipakai sebanyak yang diperlukan sesuai hitungan *mix design*,
- b. pasir yang dipakai mempunyai bentuk yang beragam dan mempunyai kadar butiran yang halus,
- c. gradasi agregat yang dipakai sesuai dengan persyaratan yang ditentukan menurut metode yang dipakai.

Penggunaan Fly Ash pada workability juga berpengaruh terhadap kelecakan adukan beton. Semakin besar penggunaan Fly Ash maka semakin kental adukan beton karena Fly Ash mempunyai daya serap terhadap air. Hal ini akan mempengaruhi faktor air semen sehingga adukan menjadi kental dan susah untuk dikerjakan.

2.2.6 Kekuatan beton

Kekuatan tekan beton ditentukan dengan pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan berbagai jenis campuran. Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama di dalam penentuan kekuatan beton. Semakin rendah perbandingan air terhadap semen, semakin tinggi kekuatan tekan beton. Suatu jumlah tertentu air diperlukan untuk memberikan aksi kimia di dalam pengerasan beton. Kelebihan air akan meningkatkan kemampuan pengerjaan akan tetapi menurunkan kekuatan beton karena semakin banyak air akan berpengaruh setelah beton mengering, tempat yang terisi air setelah mengering akan menjadi rongga rongga.

Yang dimaksud dengan kekuatan tekan beton ialah kekuatan tekan yang diperoleh dari pemeriksaan benda uji kubus yang bersisi 15 cm pada umur 28 hari. Apabila kekuatan beton tidak ditentukan dengan benda uji kubus yang bersisi 15 cm, tetapi dengan benda uji kubus yang bersisi 20 cm atau dengan benda uji silinder yang berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm, maka perbandingan antara kekuatan tekan yang didapat dari benda uji-benda uji terakhir ini dan dengan benda uji kubus yang bersisi 15 cm, harus diambil menurut Tabel 2.3

Tabel 2.3 Perbandingan kekuatan tekan beton

Benda uji	Perbandingan kekuatan beton
Kubus 15x15x15 cm	1,00
Kubus 20x20x20 cm	0,95
Silinder 15x30 cm	0,83

Kekuatan tekan beton yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tertentu, dihitung dengan menggunakan rumus di bawah ini:

$$f_c = \frac{P}{A} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Keterangan: f_c = kuat desak beton, kg/cm²

P = beban maksimum, kg

A = luas penampang benda uji, cm²

Beton dari hasil pengujian perlu diperiksa dengan perkiraan variasi kuat tekan beton dari keseluruhan sampel beton yang telah diuji. Perkiraan yang lebih baik standar deviasi untuk keseluruhan sampel benda uji dihitung dengan rumus berikut ini:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (f'c' - f'cr)^2}{(n-1)}}$$

dengan :

S = deviasi standar, Mpa

f'c = kuat tekan beton yang didapat dari masing-masing benda uji, Mpa

f'cr = kuat tekan beton rata-rata, Mpa

n = jumlah benda uji.

Sedangkan untuk menghitung kuat tekan beton yang disyaratkan dipakai rumus sebagai berikut:

$$f'cr = f'c - 1.64k.S$$

dengan : k = pengali deviasi standar

Untuk mencari angka konversi dari jumlah benda uji yang disyaratkan berdasarkan jumlah benda uji 30 sampel dapat dilihat pada Tabel 2.4

Tabel 2.4. Faktor pengali deviasi standar bila data benda uji yang tersedia kurang dari 30 sampel

Jumlah benda uji	Faktor pengali deviasi standar
15	1,160
18	1,120
19	1,096
20	1,080
25	1,030
≥30	1,000

2.2.7 Metode perancangan campuran beton

Pada penelitian ini digunakan ACI (American Concrete Institute) sebagai metode perancangan beton. Metode ini digunakan karena menyarankan suatu cara perancangan campuran yang memperlihatkan nilai ekonomi, bahan yang tersedia, kemudahan pengerjaan, keawetan serta kekuatan yang diinginkan. Cara ACI ini melihat kenyataan bahwa pada ukuran maksimum agregat tertentu, jumlah air per meter kubik adukan beton menentukan tingkat konsistensi/kekentalan adukan beton.

Tahapan perhitungan perancangan campuran beton berdasarkan metode ACI (Kardiyono.T, 1992) adalah sebagai berikut:

1. Menghitung kuat desak beton rata-rata berdasarkan kuat desak karakteristik beton dan nilai margin

$$f'_{cr} = f'_c + m$$

dengan : f'_c = kuat tekan beton yang didapat dari masing-masing benda

uji, Mpa

f'_{cr} = kuat tekan beton rata-rata, Mpa

m = nilai margin, Mpa

Nilai margin tergantung pada tingkat pengawasan mutu dan didefinisikan sebagai:

$$m = 1,64 \times k \cdot S_d$$

dengan : S_d = nilai deviasi standar,

dan dapat dilihat dalam Tabel 2.5

Tabel 2.5 Nilai deviasi standar (kg/cm^2)

Volume Pekerjaan (m^3)	Mutu Pekerjaan		
	baik sekali	baik	cukup
kecil : < 1000	$45 < s_d \leq 55$	$55 < s_d \leq 65$	$65 < s_d \leq 85$
sedang : 1000-3000	$35 < s_d \leq 45$	$45 < s_d \leq 55$	$55 < s_d \leq 75$
besar : > 3000	$25 < s_d \leq 35$	$35 < s_d \leq 45$	$45 < s_d \leq 65$

2. Menentukan faktor air semen berdasarkan kuat tekan rata-rata pada umur beton yang dikehendaki tertera pada Tabel 2.6, dan keawetan berdasarkan jenis struktur dan kondisi lingkungan tertera pada Tabel 2.7, dari keduanya dipilih yang paling rendah.

Tabel 2.6 Hubungan faktor air semen dengan kuat tekan silinder beton pada umur 28 hari

Faktor air semen	Perkiraanan kuat tekan (Mpa)
0,35	42
0,44	35
0,53	28
0,62	22,4
0,71	17,5
0,80	14

Tabel 2.7 Faktor air semen maksimum

Beton di dalam ruang bangunan:	
a. keadaan keliling non korosif:	0,60
b. keadaan keliling korosif, atau disebabkan oleh kondensasi atau uap air:	0,52
Berat di luar ruang bangunan:	
a. tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung:	0,60
b. terlindung dari hujan dan terik matahari langsung:	0,60
Beton yang masuk ke dalam tanah:	
a. mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti:	0,55
b. mendapatkan pengaruh sulfat alkali dari tanah atau dari air tanah:	0,52
Beton yang kontinu berhubungan dengan air:	
a. air tawar	0,57
b. air laut	0,52

3. Berdasarkan jenis strukturnya, ditetapkan nilai slump dan ukuran maksimum agregat, bisa dilihat dalam Tabel 2.8 dan Tabel 2.9

Tabel 2.8. Nilai-nilai slump untuk berbagai pekerjaan beton

Jenis Konstruksi	Slump (cm)	
	Maksimum	Minimum
- Dinding, plat pondasi, pondasi bertulang	12.5	5.0
- Pondasi telapak tidak bertulang, kaison, dan konstruksi di bawah tanah	9.0	2.5
- Plat, balok, kolom, dan dinding	15.0	7.5
- pengerasan jalan	7.5	5.0
- pembetonan masal	7.5	2.5

Tabel 2.9 Ukuran maksimum agregat (mm)

Dimensi minimum, mm	balok/kolom	plat
62.5	12.5	20
150	40	40
300	40	80
750	80	80

4. Menentukan jumlah air yang diperlukan berdasarkan ukuran maksimum agregat dan nilai slump, dilihat dari Tabel 2.10

Tabel 2.10 Perkiraan kebutuhan air berdasarkan nilai slump dan ukuran maksimum agregat, (liter)

Slump (mm)	Ukuran maksimum agregat, mm		
	10	20	40
25-50	206	182	162
75-100	226	203	177
150-75	240	212	188
Udara Terperangkap	3%	2%	1%

5. Menghitung berat semen yang diperlukan, berdasarkan hasil langkah (2) dan (4) diatas.
6. Menetapkan volume agregat kasar yang diperlukan per satuan volume beton, berdasarkan ukuran maksimum dari agregat dan nilai modulus halus agregat halusnya, dilihat pada Tabel 2.11

Tabel 2.11. Perkiraan kebutuhan kerikil per meter kubik beton, berdasarkan ukuran maksimum agregat dan modulus halus butiran

Ukuran maksimum agregat (mm)	Modulus halus butiran			
	2.4	2.6	2.8	3.0
10	0.46	0.44	0.42	0.40
20	0.64	0.63	0.61	0.59
40	0.76	0.74	0.72	0.70
80	0.84	0.82	0.80	0.78
150	0.90	0.88	0.86	0.84

Modulus halus butiran didefinisikan sebagai jumlah persen kumulatif dari butir-butir agregat yang tertinggal diatas satu set ayakan dan kemudian dibagi seratus. Susunan pada lubang ayakan adalah 38 mm, 19 mm, 9,6 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, dan 0,15 mm. Makin nilai modulus halus menunjukkan makin besar butiran agregatnya. Pada umumnya pasir mempunyai modulus halus butiran antara 1,5 sampai 3,8, sedangkan kerikil antara 5 sampai 8. Modulus halus campuran kerikil dengan pasir berkisar antara 5 sampai 6,5.

7. Menghitung volume agregat halus yang diperlukan, berdasarkan jumlah air, semen, dan agregat kasar yang diperlukan, serta udara yang terperangkap dalam adukan (lihat Tabel 2.10), dengan cara hitungan volume absolut.
8. Hitung berat masing-masing bahan susun beton.