

BAB II

DASAR TEORI

2.1. BETON

2.1.1. Teori Umum Beton

Beton merupakan material yang terdiri dari 3 jenis bahan baku yaitu: (1). Semen, (2). Agregat, dan (3) Air.

2.1.1.1. Semen

Semen merupakan bahan hidrolis yang dapat bereaksi secara kimia dengan air, disebut hidrasi, sehingga membentuk material padat. Pada umumnya, semen untuk bahan bangunan adalah tipe semen Portland. Semen ini dibuat dengan cara menghaluskan silikat – silikat kalsium yang bersifat hidrolis dan dicampur bahan gips. Beberapa tipe semen yang diproduksi di Indonesia, antara lain, semen Portland tipe I, II, III, dan V.

Semen tipe I dapat dikatakan yang paling banyak dimanfaatkan untuk bangunan, dan tidak memerlukan persyaratan – persyaratan khusus sebagaimana jenis yang lainnya.

Semen tipe II merupakan modifikasi semen tipe I dengan maksud untuk meningkatkan ketahanan terhadap sulfat dan menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah. Semen jenis ini terutama dimanfaatkan untuk bangunan yang terletak didaerah dengan tanah berkadar sulfat rendah.

Semen tipe III merupakan semen yang cepat mengeras. Beton yang dibuat dengan semen tipe III akan mengeras cukup cepat, dan kekuatan yang dicapainya dalam 24 jam akan sama dengan kekuatan beton dari semen biasa dalam 7 hari. Hanya sekitar 3 hari kekuatan tekannya setara dengan kekuatan tekan 28 hari beton dengan semen biasa.

Semen tipe V terutama ditujukan untuk memberikan perlindungan terhadap bahaya korosi akibat pengaruh air laut, air danau, air tambang, maupun pengaruh garam sulfat yang terdapat dalam air tanah. Semen tipe V ini memiliki daya resistansi terhadap sulfat yang lebih baik dibandingkan semen tipe II.

2.1.1.2. Agregat

Dalam SNI-03-2847-2002, agregat didefinisikan sebagai material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku pijar, yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton atau adukan semen hidrolik. Pada beton semen biasanya volume agregat yang digunakan adalah 50-80 % volume total beton, sehingga kondisi agregat yang digunakan sangat berpengaruh pada karakteristik beton. Semakin bagus agregat yang digunakan, maka akan lebih memberikan kekuatan pada beton.

Kekuatan beton dipengaruhi oleh kualitas agregat, proporsi campuran, serta kebersihan air dan agregatnya. Oleh karena itu, selain harus memiliki kekuatan dan daya tahan baik, butir agregat disyaratkan harus bersih dari lumpur atau material organik lainnya yang dapat mengurangi kekuatan beton. Diameter lumpur atau material organik ini adalah kurang dari 0,063 mm. Bila banyaknya lumpur atau material organik yang dikandung dalam agregat lebih dari 1 % berat kering, agregat tersebut harus dicuci.

2.1.1.2.1. Ukuran agregat

Ukuran agregat maksimum yang digunakan untuk beton bergantung pada tujuan penggunaannya. Ukuran agregat maksimum yang biasa digunakan dalam pembuatan beton pada umumnya adalah 80 mm. Agregat dibagi menjadi dua kategori berdasarkan ukurannya :

- a. Agregat kasar, ukurannya lebih besar dari 4,75 mm
- b. Agregat halus, ukurannya lebih kecil dari 4,75 mm

Berdasarkan SNI-03-2847-2002 agregat kasar untuk beton adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai dengan 40 mm. Besar butir yang direncanakan tergantung pada pemakaian. Sedangkan agregat halus untuk beton adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir sebesar 5 mm.

2.1.1.2.2. Sifat fisik agregat

Sifat fisik agregat sangat mempengaruhi sifat beton segar dan beton keras. Sifat-sifat fisik dari agregat yang perlu diketahui adalah sebagai berikut:

1. Bentuk agregat

Bentuk dari agregat sangat penting pada beton karena mempengaruhi workability beton. Bentuk dari agregat dipengaruhi oleh jenis batuan dan proses pemecahan batuan. Ditinjau dari bentuknya agregat digolongkan dalam bentuk sebagai berikut:

a. Bulat

Berbentuk bulat penuh atau bulat telur. Agregat ini banyak ditemukan di sungai.

b. Tidak beraturan

Bentuk alaminya memang tidak beraturan atau sebagian terjadi karena pergeseran dan mempunyai sisi tepi yang bulat. Jenisnya ialah kerikil yang berasal dari gunung berapi.

c. Pipih

Disebut pipih karena ketebalannya lebih kecil dibandingkan lebar panjangnya

d. Bersudut

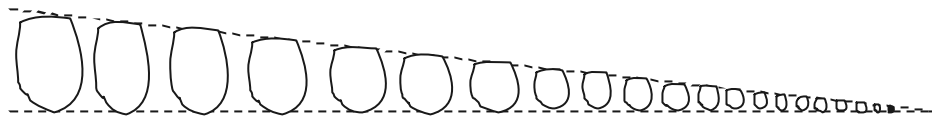
Bentuk ini tidak beraturan, mempunyai sudut yang tajam dan permukaan kasar. Agregat ini terbentuk karena dipecah dengan mesin pemecah batu.

2. Kekuatan agregat

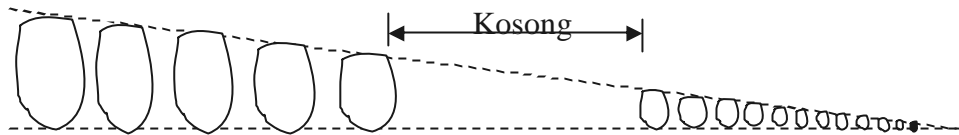
Kekuatan agregat sangat mempengaruhi kekuatan beton yang akan dibuat, tetapi kekuatan beton juga dipengaruhi oleh ikatan antara pasta semen dengan agregat. Untuk mengetahui kekuatan agregat menurut standar pengujian yang digunakan di Indonesia adalah dengan test abrasi menggunakan alat Los Angeles atau di test kuat hancurnya dengan bejana tekan Rudeloff

3. Susunan butiran (gradasi)

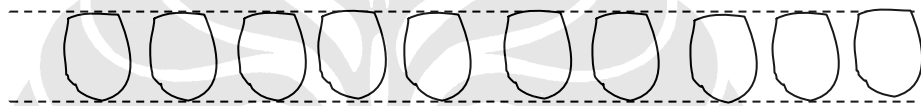
Pada dasarnya ada tiga macam susunan gradasi dari agregat yaitu gradasi rapat (*dense graded*), gradasi terbuka (*open graded*) dan gradasi seragam (*uniform graded*), yang dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.1. Gradasi rapat (bermacam-macam ukuran)

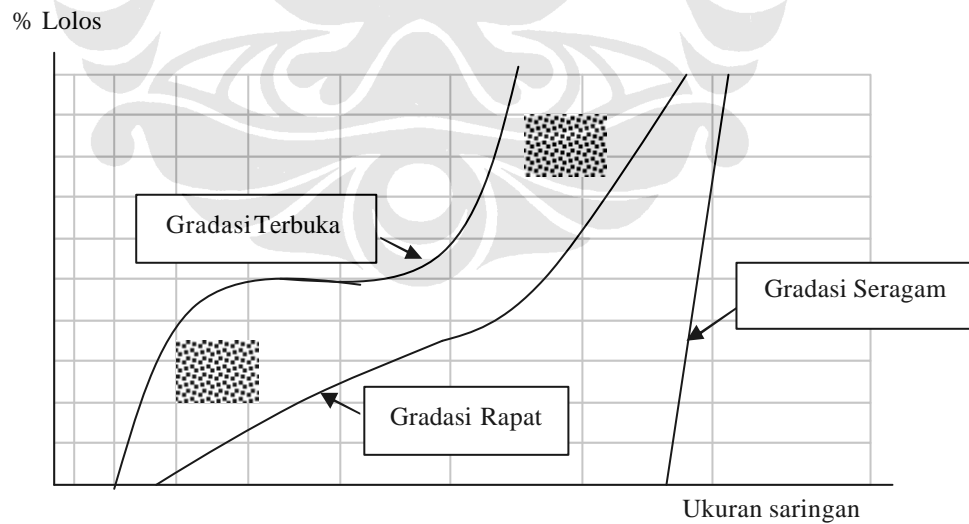


Gambar 2.2. Gradasi terbuka (ada ukuran yang tidak ada)



Gambar 2.3. Gradasi seragam (ukuran butirnya serupa)

Jenis-jenis gradasi tersebut dapat juga digambarkan dalam grafik analisa saringan sebagai berikut :

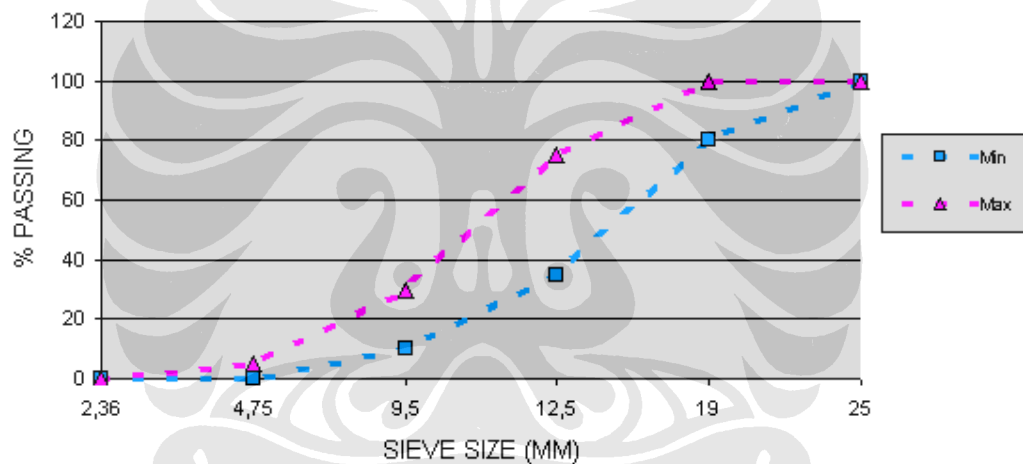


Gambar 2.4. Grafik analisa saringan

Persyaratan analisa saringan agregat untuk material beton (ASTM C – 33) dapat dijelaskan sebagai berikut :

Tabel 2.1. Analisa Saringan Agregat Kasar No.4 Sampai 19 mm (¾")

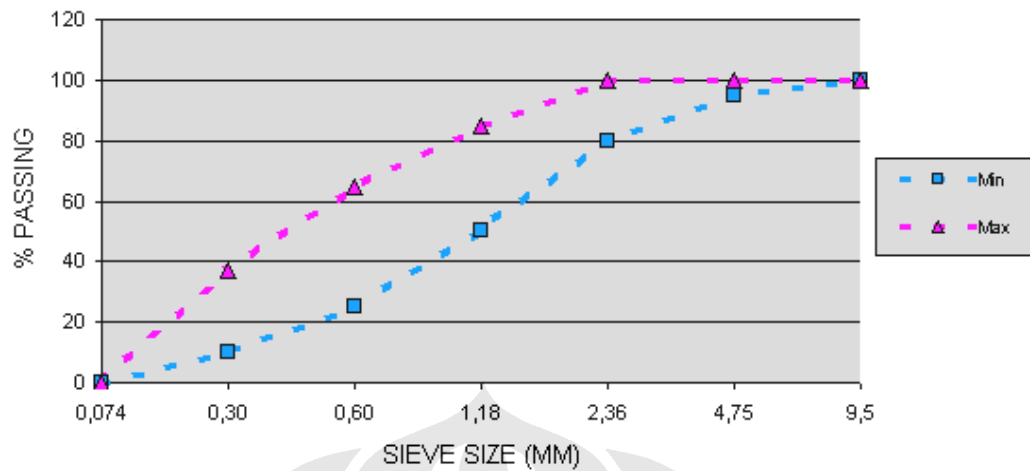
UKURAN SARINGAN	% LOLOS (BERAT)
25 mm (1")	100
19 mm (¾")	80 - 100
12,5 mm (½")	35 - 75
9,5 mm (3/8")	10 - 30
4,75 mm (No.4)	0 - 5
2,36 mm (No. 8)	0



Gambar 2.5. Grafik Standar Gradasi Agregat Kasar

Tabel 2.2. Analisa Saringan Agregat Halus

UKURAN SARINGAN	% LOLOS (BERAT)
9,50 mm (3/8")	100
4,75 mm (No. 4)	95 - 100
2,36 mm (No. 8)	80 - 100
1,18 mm (No. 16)	50 - 85
0,60 mm (No. 30)	25 - 65
0,30 mm (No. 50)	10 - 37
0,075 mm (No. 200)	0



Gambar 2.6. Grafik Standar Gradasi Agregat Halus

4. Berat jenis (*specific gravity*) dan penyerapan air

Sebelum merancang beton perlu diketahui dulu berat jenis agregatnya. Berat jenis ini akan mempengaruhi rancangan campuran beton. Berat jenis ini ada tiga macam yaitu:

- a. *Bulk Specific Gravity* antara berat suatu benda dalam keadaan kering mutlak dengan berat air murni yang sama dengan volume benda termasuk volume pori-pori yang tidak tembus air dan tidak termasuk volume pori-pori kapiler yang dapat terisi oleh air.
- b. *Bulk Specific Gravity (Saturated Surface Dry)* ialah perbandingan antara berat suatu benda pada keadaan jenuh kering muka dengan berat air murni yang sama dengan volume benda termasuk volume pori-pori yang tidak tembus air dan tidak termasuk volume pori-pori kapiler yang dapat terisi oleh air.
- c. *Apparent Specific Gravity (Saturated surface Dry)* ialah perbandingan antara berat suatu benda dalam keadaan kering mutlak dengan berat air murni yang sama dengan volume benda termasuk seluruh pori-pori yang terkandung didalamnya.

Karena dalam beton kondisi agregat dalam keadaan jenuh maka didalam rancangan campuran hanya *Bulk Specific Gravity SSD* saja yang digunakan.

Penyerapan air adalah kemampuan suatu benda untuk menyerap air dari keadaan kering mutlak menjadi keadaan SSD⁴. Penyerapan air pada agregat mempengaruhi terhadap daya rekat antara pasta semen dengan agregat serta keawetan dari agregat itu sendiri. Pada umumnya agregat yang memiliki penyerapan air tinggi daya rekatnya dengan semen baik, tetapi dengan penyerapan air tinggi dapat menyebabkan mineral yang mudah larut dalam air akan cepat hilang sehingga keawetan dari agregat menjadi berkurang.

Sifat lain dari agregat yang perlu diketahui adalah kadar air dari agregat. Kadar air pada agregat berubah tergantung kondisi agregatnya. Kondisi agregat dapat digambarkan sebagai berikut:

a. Kondisi basah

Pada kondisi ini agregat jenuh dengan air yang ada sampai menyelimuti agregatnya. Kondisi ini terjadi pada agregat yang selalu dalam kondisi basah karena air hujan atau terendam air.

b. Kondisi SSD

Kondisi ini adalah kondisi dimana agregat di dalamnya jenuh dengan air tetapi bagian permukaannya kering. Kondisi ini terjadi pada agregat yang basah dan jenuh air di lapisan bagian permukaannya.

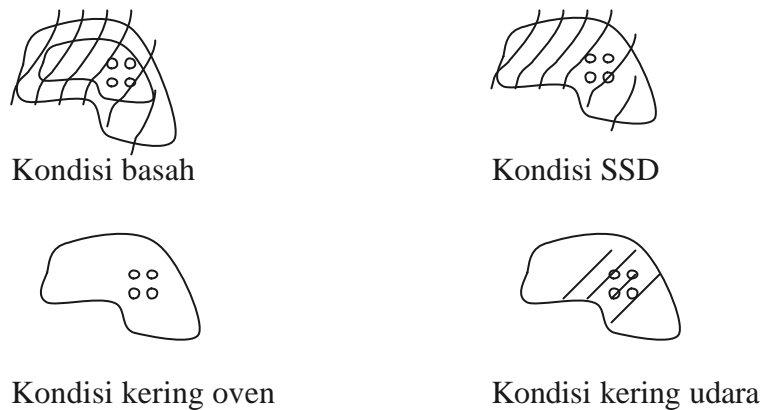
c. Kondisi kering udara

Apabila agregat ditempatkan pada ruang terbuka dan airnya mengalami penguapan tetapi air yang dikandungnya tidak habis. Biasanya pada musim kemarau agregat dalam kondisi ini.

d. Kondisi kering oven

Kondisi ini didapat bila agregat didalam suhu lebih dari 100°C, sehingga kadar airnya 0%.

⁴ Achmad Djedjen, *Pemanfaatan Limbah Beton sebagai Agregat kasar untuk campuran beton mutu rendah*, Universitas Indonesia, Depok, 1997



Gambar 2.7. Kondisi Air pada Agregat

2.1.1.3. Air

Air adalah suatu bahan yang penting dalam pembuatan beton, air diperlukan agar terjadi reaksi kimia dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumasi agregat agar mudah dalam pengerjaannya. Air yang umumnya dapat digunakan untuk beton adalah air yang dapat diminum. Tetapi tidak semua air dapat memenuhi syarat tersebut karena mengandung berbagai macam unsur yang dapat merugikan.

SKSNI mensyaratkan air yang dapat digunakan sebagai bahan bangunan sebagai berikut:

1. Air harus bersih.
2. Tidak mengandung lumpur, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
3. Tidak mengandung benda-benda yang 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 15gram/liter. Kandungan klorida (CL) tidak lebih dari 500 ppm dan senyawa sulfat tidak lebih dari 1000 ppm sebagai SO_3 .
5. Bila dibandingkan dengan kekuatan tekan adukan dan beton yang memakai air suling, maka penurunan kekuatan adukan dan beton yang memakai air yang diperiksa tidak lebih dari 10%.
6. Semua air yang mutunya meragukan harus dianalisa secara kimia dan dievaluasi mutunya menurut pemakaiannya.

2.1.2. Teknologi Bahan

Beton merupakan bahan yang keras menyerupai batu, terbuat dari campuran semen hidrolis, air dan agregat. Beton yang masih segar bersifat plastis sehingga beton mudah dikerjakan. Beton yang plastis makin lama akan mengalami pengikatan sehingga menjadi keras. Lamanya pengikatan dipengaruhi oleh jenis semen dan suhu sekitarnya.

Kuat tekan beton dipengaruhi oleh susunan campurannya, terutama perbandingan antara berat air dan berat semen atau dinyatakan dengan faktor air semen (fas), kekuatan agregat serta cara perawatannya. Untuk menghitung komposisi campuran beton banyak metodenya. Di Indonesia telah diperkenankan metode campuran beton normal yang tercantum dalam SK SNI. Metode ini mengacu pada metode DOE dari Inggris.

2.1.2.1. Sifat-Sifat Beton Segar

Sifat beton segar sangat mempengaruhi terhadap sifat beton keras. Apabila beton pada saat plastis tidak ditangani dengan baik, maka beton yang sudah keras tidak dapat diperbaiki lagi. Sifat-sifat beton segar adalah sebagai berikut:

1. Berat isi (*unit weight*)

Berat isi beton adalah perbandingan antara berat beton dengan volume silinder sebagai alat pengukur volume. Berat isi beton sangat dipengaruhi berat jenis agregatnya. Fungsi dari berat isi adalah untuk mengkoreksi susunan campuran beton jika hasil perencanaan berbeda dengan pelaksanaan.

2. Workability

Sifat mudah dikerjakan adalah faktor utama dari beton segar cara mengukur sifat mudah dikerjakan yang paling banyak digunakan adalah dengan alat ukur slump. Alat slump berbentuk kerucut terpancung dengan diameter atas 10 cm dan diameter bawah 20 cm serta tinggi 30 cm. Nilai slump didapat dari membandingkan antara selisih tinggi asal (tinggi alat slump) dengan tinggi jatuhnya beton. Makin besar nilai slumpnya maka *workability*-nya tinggi sebaliknya makin kecil nilai slumpnya *workability*-nya rendah.

Nilai slump untuk setiap konstruksi berbeda. Berdasarkan SK SNI nilai slump yang harus dipenuhi untuk pengecoran pada beton segar adalah sebagai berikut:

Tabel 2.3. Besar Nilai Slump Untuk Pekerjaan Beton⁵

Uraian	Slump Maks cm	Slump Min cm
Dinding pelat pondasi telapak bertulang	12,5	5
Pondasi telapak tidak bertulang kaisan dan konstruksi di bawah tanah	9	2,5
Pelat, balok, kolom, dinding	15	7,5
Pekerjaan jalan	7,5	5
Pembetonan masal	7,5	2,5

3. Waktu ikat

Lamanya waktu ikat dipengaruhi oleh jenis semen, suhu disekitarnya, dan adanya admixture, serta cara perawatannya. Waktu pengikatan pada beton ada dua macam yaitu waktu ikat awal dan waktu ikat akhir. Waktu ikat awal adalah waktu yang dibutuhkan sejak semen bereaksi dengan air sampai adukan hasil penyaringan beton memberikan tahanan sebesar 500 psi. Waktu ikat akhir adalah waktu yang dibutuhkan sejak semen bereaksi dengan air sampai adukan hasil penyaringan beton memberikan tahanan sebesar 4000 psi.

2.1.2.2. Sifat-Sifat Beton Keras

2.1.2.2.1. Kuat tekan

Kuat tekan dipengaruhi oleh faktor air semen, yaitu perbandingan antara berat air dengan berat semen. Selain itu kekuatan agregat juga sangat menentukan mutu beton. Untuk menentukan mutu beton menurut SK SNI dibuat berbentuk silinder 15 cm dan tinggi 30 cm.

Dalam perencanaan pembuatan beton, mutu beton yang akan dibuat harus diketahui terlebih dahulu. Mutu beton berdasarkan Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 dibagi menjadi tiga kelas, seperti tabel dibawah ini :

⁵ A. Gunawan Y, Yacob Yunizar, *Penuntun Praktis Praktikum pada Laboratorium Teknik Sipil*, Jakarta, Intermedia, 1987

Tabel 2.4. Kelas dan Mutu Beton

Kelas	Mutu	s' bk kg/cm ²	s' bk (s=46) kg/cm ²	Tujuan	Pengawasan Terhadap	
					Mutu Agregat	Kuat Tekan
I	Bo	-	-	Non	Ringan	Tanpa
				Struktural	Sedang	Kontinu
II	B1	-	-	Struktural	Sedang	Kontinu
	K-125	125	200	Struktural	Ketat	Kontinu
	K-175	175	250	Struktural	Ketat	Kontinu
	K-225	225	300	Struktural	Ketat	Kontinu
III	K>225	>225	>300	Struktural	Ketat	Kontinu

Kuat tekan beton merupakan besaran mekanik yang sangat penting karena besaran ini digunakan sebagai acuan dasar dalam perencanaan struktur bangunan sipil. Besarnya kuat tekan beton pada umur tertentu dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$f_c' = \frac{P}{A}$$

Dimana :

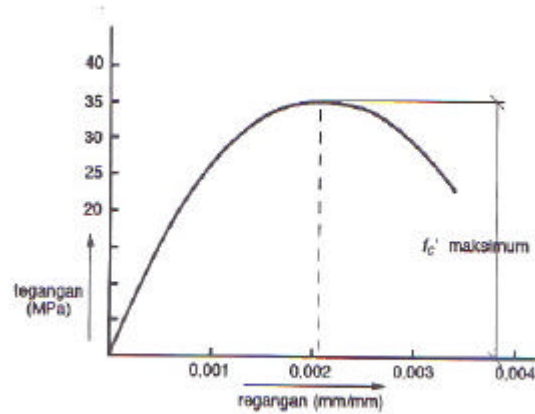
f_c' = kuat tekan beton pada umur rencana (Mpa)

P = beban uniaksial tekan maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm²)

Kuat tekan masing-masing benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tertinggi (f_c') yang dicapai benda uji umur 28 hari akibat beban tekan selama percobaan. Tegangan f_c' bukanlah tegangan yang timbul pada saat benda uji hancur melainkan tegangan maksimum pada saat regangan beton (e_b) mencapai nilai $\pm 0,002$.⁶

⁶ Istimawan Dipohusodo, *Struktur Beton Bertulang*, Gramedia Pustaka Utama, 1994



Gambar 2.8. Tegangan Tekan Benda Uji Beton Normal

Dengan mengamati bermacam kurva tegangan-regangan kuat beton berbeda, tampak bahwa umumnya kuat tekan maksimum tercapai pada saat nilai satuan regangan tekan e' mencapai $\pm 0,002$. Selanjutnya nilai tegangan fc' akan turun dengan bertambahnya nilai regangan sampai benda uji hancur pada nilai e' mencapai 0,003-0,005. Beton kuat tinggi lebih getas dan akan hancur pada nilai regangan maksimum yang lebih rendah dibandingkan dengan beton kuat rendah.

2.1.2.2.2. Kuat tarik

Kuat tarik pada beton ada dua macam, yaitu kuat tarik belah (*Splitting Test*) dan kuat tarik lentur (*Modulus of Rupture*).

2.1.2.2.2.1. Kuat tarik belah

Kuat tarik benda ujinya berupa silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, kemudian ditekan sampai beton maksimum (P kN)

Kuat tarik dapat ditentukan dengan rumus :

$$f_{ct} = \frac{2.P}{p.L.d}$$

Dimana :

- f_{ct} = kuat tarik (N/mm²)
- P = beban maksimum (N)
- L = panjang benda uji (mm)
- d = diameter benda uji (mm)

Pada umumnya kuat tarik pada beton lebih kecil dibandingkan kuat tekan, kurang lebih besarnya 10% - 15% dari kuat tekannya. Hubungan antara kuat tarik dengan kuat tekannya menurut ACI adalah :

$$f_{ct} = 6\sqrt{f_c'} \text{ sampai } 7\sqrt{f_c'} \text{ psi atau dalam satuan SI}$$

$$f_{ct} = 0,5\sqrt{f_c'} \text{ sampai } 0,6\sqrt{f_c'} \text{ Mpa}$$

2.1.2.2.2. Kuat tarik lentur

Kuat tarik lentur benda uji nya berbentuk balok beton tanpa tulangan, dengan ukuran 15 x 15 x 55 cm, kemudian balok tersebut diletakkan pada dua tumpuan dan dibebani pada dua titik dengan jarak 1/3 bentang sampai benda uji patah. Tegangan yang bekerja adalah tegangan tekan pada serat atas dan tegangan tarik pada serat bawah, dapat dihubungkan dengan rumus balok biasa yaitu :

$$s = \frac{M \cdot y}{I}$$

Dimana :

- s = tegangan pada serat balok
- M = besarnya momen
- y = jarak vertikal antara titik yang dicari tegangannya
- I = momen inersia penampang

2.2. GEOPOLIMER

2.2.1. Definisi Beton Geopolimer

Geopolimer merupakan sintesa bahan-bahan alam nonorganik lewat proses polimerisasi. Bahan dasar utama yang diperlukan untuk pembuatan material geopolimer ini adalah bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silikon dan aluminium. Unsur-unsur ini banyak didapati, di antaranya pada material buangan hasil sampingan industri, seperti misalnya abu terbang dari sisa pembakaran batu bara. Selama ini, abu terbang-disebut demikian karena kecilnya ukuran partikel dan karenanya mudah beterbangan di udara-lebih banyak tidak dimanfaatkan dengan semestinya ataupun dipakai hanya sebagai bahan timbunan. Penimbunan yang sembarangan bahkan berpotensi mengancam kelestarian lingkungan, selain mudah beterbangan dan mengotori udara, partikel-partikel

logam berat yang dikandungnya dengan mudah larut dan mencemari sumber-sumber air.

Untuk melarutkan unsur-unsur silikon dan aluminium, serta memungkinkan terjadinya reaksi kimiawi, digunakan larutan yang bersifat alkalis. Material geopolimer ini digabungkan dengan agregat batuan kemudian menghasilkan beton geopolimer, tanpa menggunakan semen lagi.

Polimer⁷ adalah senyawa-senyawaan yang tersusun sangat besar yang terbentuk dari penggabungan dari banyak molekul kecil (monomer). Polimer dapat dibedakan berdasarkan material penyusunnya, yaitu polimer organik dan polimer anorganik. Polimer organik adalah polimer yang penyusun monomernya adalah atom C dan H, seperti getah karet untuk pembuatan ban mobil. Sedangkan polimer anorganik adalah polimer yang monomer penyusunnya bukan berasal dari hidrokarbon, seperti mineral atau logam.

Pencarian terhadap material pengganti semen telah menghangat karena beton makin sering mendapatkan kritik, khususnya dari kalangan yang peduli dengan kelestarian lingkungan hidup. Hal pertama yang sering dijadikan sasaran perhatian adalah emisi gas rumah kaca (karbon dioksida) yang dihasilkan pada proses produksi semen. Gas ini dilepaskan ke atmosfer kita dengan bebas dan kemudian merusakkan lingkungan hidup kita, di antaranya menyebabkan pemanasan global. Isu kedua yang kerap dipersoalkan adalah masalah keawetan beton itu sendiri. Bangunan beton pada umumnya sudah memerlukan perbaikan karena sudah mulai mengalami kerusakan ketika usia bangunannya baru mencapai 20 tahun, walaupun telah direncanakan dan dibuat sesuai dengan standar-standar yang berlaku.

Beton Geopolimer dikatakan ramah lingkungan, karena selain dapat menggunakan bahan-bahan buangan industri, proses pembuatan beton geopolimer tidak terlalu memerlukan energi, seperti halnya proses pembuatan klinker semen yang setidaknya memerlukan suhu hingga 1450 derajat Celsius. Dengan pemanasan lebih kurang 60 derajat Celsius selama satu hari penuh sudah dapat dihasilkan beton yang berkekuatan tinggi.⁸ Karenanya, pembuatan beton

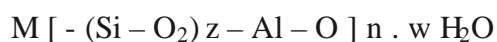
⁷ Feldman Dorel; Hartomo J Anton. Bahan Polimer Konstruksi Bangunan. Gramedia : Jakarta.

⁸ Djwantoro Hardjito, *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*, Sinar Harapan, 29 Oktober 2001

geopolimer mampu menurunkan emisi gas rumah kaca yang diakibatkan oleh proses produksi semen hingga tinggal 20 persen saja.

Hasil-hasil riset selama ini telah menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki sifat-sifat teknik yang amat mengesankan, di antaranya kekuatan dan keawetan yang tinggi. Sebuah perusahaan beton pracetak di Australia bahkan sudah mulai memproduksi prototipe beton geopolimer pracetak dalam bentuk bantalan rel kereta, pipa-pipa beton untuk saluran pembuangan air kotor, dan lain-lain. Hal yang memberikan perbedaan cukup penting antara beton geopolimer dengan beton polimer organik yang sudah lebih dulu diperkenalkan, terutama adalah biaya pembuatannya. Beton geopolimer bisa diproduksi dengan biaya yang setara dengan beton biasa, yang jauh lebih murah dibanding biaya untuk menghasilkan beton polimer organik.

Material polimer anorganik alkali aluminosilikat dapat disintesis (dibuat) dari prekursor yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Prekursor adalah bahan utama dalam pembentuk polimer. Prekursor tersebut dapat berupa mineral alami ataupun limbah industri. Proses sintesis tersebut terbagi atas proses aktivasi bahan alumina-silika oleh ion alkali dan proses curing untuk mendorong terjadinya polimerasi dari monomer alumina-silika menjadi struktur jaringan molekul tiga-dimensi. Kesempurnaan dari polimerasi, sedemikian hingga struktur dan properti dari polimer anorganik telah tersintesis, tergantung pada proses aktivasi dan proses ikat. Hal penting yang berkaitan dengan sintesis polimer anorganik adalah derajat polimerisasinya, dimana hal ini menentukan formasi struktur dan sedemikian hingga menentukan karakteristik akhir dari benda uji. Sebagaimana dijelaskan oleh persamaan polimer di bawah:⁹



M : elemen alkali

n : derajat polimerisasi

z : 1, 2, dan 3

w : derajat kristalisasi

- : simbol ikatan

⁹ Daniel Agustinus Hartanto, *Pembuatan Beton Geopolimer dengan Menggunakan Sisa Beton Semen*, Bachelor Thesis, Universitas Indonesia, Indonesia, 2006

Dalam hal penggunaan material polimer sebagai bahan pengikat pada beton, maka hal yang perlu diperhatikan adalah ikatan yang dihasilkan antara material polimer dengan agregat (*interface*). Ikatan tersebut dapat berupa ikatan mekanis ataupun ikatan kimia. Ikatan kimia dapat pula terjadi apabila matriks yang digunakan adalah polimer, walaupun sebagaimana kita ketahui bahwa mineral agregat akan bersifat inert pada beton semen. Selain memberikan ikatan, material polimer juga diharapkan memberikan sumbangan kekuatan pada beton.

Joseph Davidovits, sebagai pemegang paten pertama terhadap material polimer anorganik menyebut material tersebut geopolimer, ini disebabkan karena prekursor berasal dari mineral, baik alami atau hasil suatu produk. Dalam penelitian ini akan dibuat geopolimer alkali alumino silikat yang berasal dari prekursor yang mengandung alumino dan *silica* dengan aktivator larutan alkali-silikat. Dibawah ini adalah beberapa campuran untuk membuat beton geopolimer:

1. Natural pozzolan.

Pozzolan asli adalah material yang dihasilkan dari erupsi gunung berapi. Material ini telah lama digunakan oleh bangsa romawi kuno untuk membuat semen romawi dengan mencampur batu kapur dengan pozzolan. Karakteristik semen campuran didapat dengan menggantikan semen portland dengan pozzolan telah diteliti di cina sejak 30 tahun terakhir.

2. Iron Blast Furnace Slag

Jumlah Iron *Blast Furnace Slag* sebagai bahan pencampur semen portland semakin bertambah pesat pada daerah industri, terutama pada daerah industri metalurgi. *Blast Furnace Slag* sebagai hasil samping produksi logam telah lama digunakan sebagai bahan tambahan pembuat beton karena memberikan karakteristik tertentu pada beton.

3. Coal *Fly ash*

Fly ash adalah hasil sampingan dari penggunaan batu bara. Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik telah lama digunakan, sebagaimana pada tahun 1988 produksi listrik dunia menghasilkan 290 juta *fly ash*, dimana hanya sekitar 10-15 % yang digunakan sebagai bahan campuran semen. Ada beberapa alasan mengapa hanya sedikit *fly ash* yang digunakan sebagai bahan campuran semen, adalah dikarenakan sulitnya mendapatkan

hasil yang seragam pada tiap produk. Abu terbang adalah abu sisa pembakaran batu bara yang dipakai dalam banyak industri. Abu terbang sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen. Tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang dikandung oleh abu terbang akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat.

Adanya kalsium hidroksida dalam beton selama ini ditengarai sebagai sumber perusak beton sebelum waktunya, khususnya bila beton berada di lingkungan yang agresif. Karenanya, penambahan atau penggantian sejumlah semen dengan abu terbang berpotensi menambah keawetan beton tersebut. Selama ini abu terbang tidak dimanfaatkan dan dibuang begitu saja, sehingga memiliki potensi mencemari lingkungan.

Beton yang dihasilkan dari *fly ash* ternyata menunjukkan tenaga tekan tinggi dan memiliki keawetan atau durability yang lebih baik dibandingkan beton biasa yang sepenuhnya dibuat dengan menggunakan Semen Portland.

Upaya penggunaan *fly ash* bisa dikembangkan lebih lanjut dengan memanfaatkan bahan-bahan sisa lainnya yang mempunyai kandungan oksida silika tinggi seperti *silica fume*, *slag* atau bahkan abu sekam dan jerami.

2.2.2 Bahan Penyusun Geopolimer

Bahan penyusun geopolimer sebagaimana telah dijelaskan di atas adalah prekursor dan aktivator. Kedua bahan tadi akan bersintesa membentuk material padat, dimana proses polimerasinya yang terjadi adalah disolusi dan diikuti dengan proses polikondensasi.

2.2.2.1 Prekursor

Bahan mentah (*raw material*) atau prekursor yang digunakan untuk membentuk geopolimer dapat berupa mineral aluminosilikat alami seperti lempung atau limbah industri. Tanah lempung perlu dikalsinasi (*calcined*) pada suhu sekitar 650° C sebagai pengolahan awal untuk sintesis geopolimer. Karena

jumlahnya yang berlimpah, lempung telah digunakan di banyak negara sebagai bahan baku membuat bata, gerabah, keramik, perkerasan jalan dan lainnya. Limbah industri yang memiliki banyak kandungan alumina dan *silica* dapat digunakan sebagai prekursor. Limbah industri yang termasuk ke dalam klafisikasi ini diantaranya adalah blast furnace slag, abu terbang (*fly ash*), serbuk granit dan lumpur merah (*red mud*). Dengan menggunakan proses rekayasa, bahan mentah aluminosilikat tersebut dapat disintesis menjadi geopolimer. Sebagai bahan pengikat untuk beton, geopolimer alkali aluminosilika memiliki perbedaan dengan semen Portland, baik dalam mekanisme pengikatan juga dalam sifat teknis (*engineering properties*) produk akhir.

2.2.2.2 Aktivator

Sebagaimana telah dijelaskan diatas, aktivator dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan *silica*. Alkali mengaktifkan prekursor dengan mendisolusikan mereka ke dalam monomer $[\text{SiO}_4]$ dan $[\text{AlO}_4]$. Selama proses *curing*, monomer-monomer tadi terkondensasi dan membentuk jaringan polimer tiga-dimensi yang berikatan silang. Ion alkali bertindak sebagai penetral muatan (*charge balancer*) untuk tiap molekul tetrahedron $[\text{AlO}_4]$.

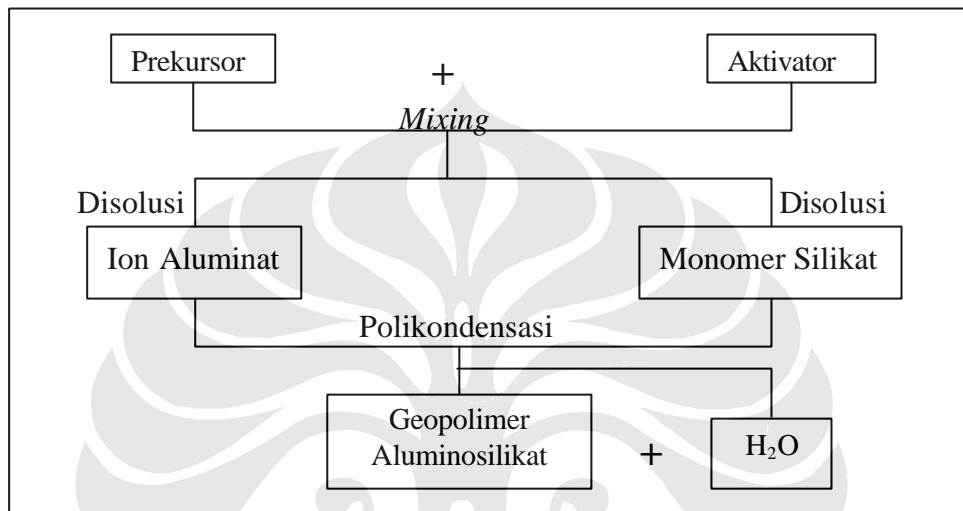
Larutan natrium silikat (*waterglass*) adalah aktivator yang secara umum digunakan karena mudah didapat dan ekonomis. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan digunakan natrium silikat dan natrium hidroksida. Penambahan aktivator sodium hidroksida bertujuan untuk menambah ion Na^+ pada proses polimerisasi.

Kandungan sodium silikat menyediakan kation berikatan valensi satu (*monovalent*) $[\text{Na}^+]$ sebagai spesies aktivator dimana ion resirkopalnya, Si^{4+} , adalah komposisi utama geopolimer. Sodium silikat terlarut dalam air, menyediakan lingkungan reaksi cairan-padatan yang ideal untuk pelarutan material prekursor.

2.2.2.3. Proses Polimerisasi

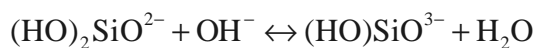
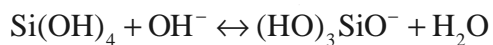
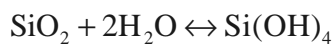
Sintesa geopolimer aluminosilikat membutuhkan dua konstituen utama dalam reaksi pencampuran, yaitu: (1) Prekursor yang kaya akan kandungan Al

dan Si; dan (2) larutan alkali silikat. Meskipun mekanisme polimerisasinya masih belum dapat dipastikan, Davidovits mengemukakan reaksi polimerisasi awal adalah berupa disolusi prekursor untuk membentuk monomer aluminat dan silikat. Kemudian dilanjutkan dengan proses polikondensasi. Sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.9, proses polimerisasi akan menghasilkan geopolimer dengan hasil samping H₂O.



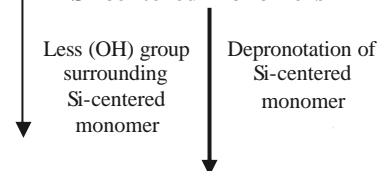
Gambar 2.9. Alur Polimerisasi

Disolusi sodium silikat dan *silica* dari prekursor *fly ash* dapat membentuk beberapa tipe spesies monomer berinti-Si (Si-centred monomeric), sebagaimana diterangkan pada persamaan 1a-1d



Dissolution of silica to form

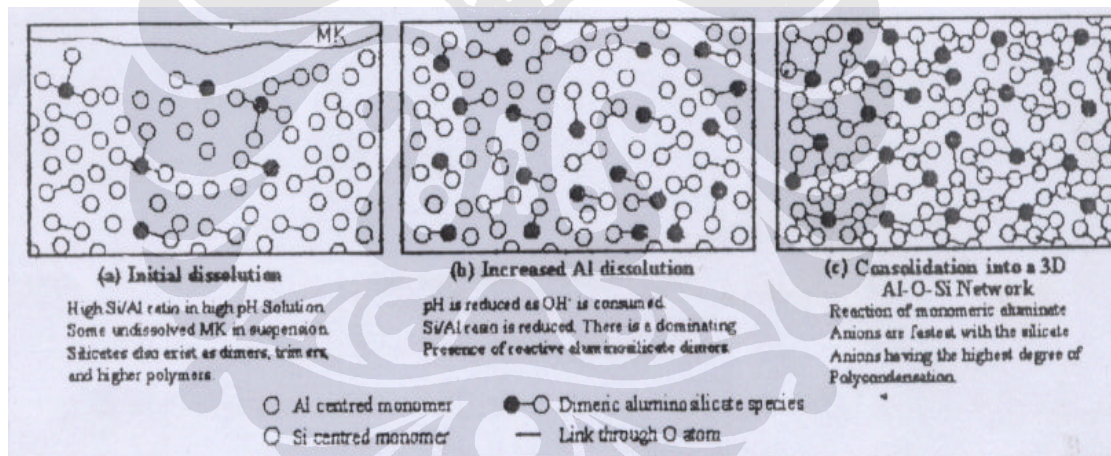
Si-centered monomers



Dissolution of Alumina to form aluminate anion

Perpanjangan lengan monomer $\text{Si}(\text{OH})_4$ untuk membentuk monomer berinti-Si dengan sedikit grup OH, sebagian besar tergantung pada konsentrasi pH larutan tersebut. Kehadiran OH, tidaklah esensial pada proses disolusi silika, namun OH lebih bersifat sebagai katalis. Sebaliknya, pada disolusi alumina dari prekursor, OH dikonsumsi untuk menghidrolisis unsur Al untuk membentuk anion aluminat $\text{Al}(\text{OH})_4$ (pers. 1e). Atas pertimbangan diatas, untuk mencapai disolusi yang sempurna pada pembentukan monomer aluminat dan silikat dibutuhkan larutan alkali aktivator yang mencukupi.

Kecepatan pelepasan Al dari prekursor yang bersifat lambat menyatakan bahwa selama tahap awal disolusi, rasio Al dari terhadap Si pada larutan bersifat rendah. Hal ini menyebabkan terdapat lebih dari ssatu monomer berinti-Si yang berikatan dengan satu anion Aluminat, dimana hanya terdapat beberapa ikatan sebagaimana terlihat pada Gambar 2.10a.



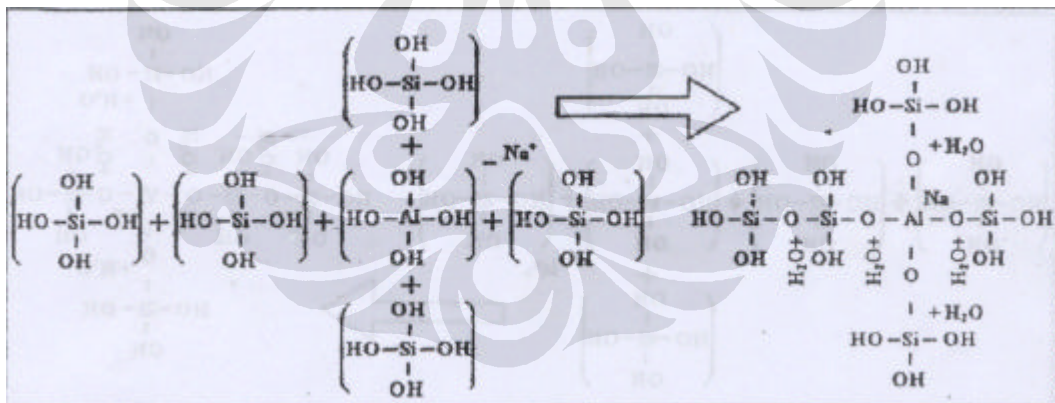
Gambar 2.10. Skema Tahap Disolusi dan Polikondensasi pada Geopolimer

Ikatan antara anion aluminat dengan monomer silikat via oksigen diperoleh dari proses polikondensasi, yang juga melepaskan molekul air. Spesies aluminosilikat yang terbentuk selama tahap awal polikondensasi bersifat tidak reaktif (inert) sebagaimana monomer-monomer berinti-Si yang mengelilingi Al bersifat lebih stabil dari inti Al sendiri. Akibat dari karakter diatas, terdapat kemungkinan lebih besar bahwa pada proses polikondensasi akan terbentuk ikatan Al-O-Si, dimana ikatan Al-O-Si lebih tahan terhadap serangan hidroksida.

Sebagaimana disolusi Al dan Si meningkat, rasio Al/Si pun meningkat, sehingga monomer-monomer berinti -Si yang berikatan dengan Al menjadi lebih sedikit. Ikatan ini muncul sebagai spesies aluminosilikat dimetrik yang dikenal sangat reaktif (Gambar 2.10b). karena OH semakin dikonsumsi pada saat disolusi alumina, maka pH campuran akan turun. pH yang lebih rendah akan memberikan kontribusi pada reaksi mundur (*reverse reaction*) (pers. 1a -1d), yakni pada protonisasi (*prontonation*) monomer berinti-Si. Hal ini menyebabkan pengurangan pada kehadiran monomer berinti -Si dan peningkatan pada jumlah grup hidroksil (OH) yang terikat pada monomer berinti -Si.

Semakin besar kehadiran grup hidroksil dalam jarak yang saling berdekatan, meningkatkan kemungkinan reaksi polikondensasi antara monomer-monomer berinti-Si dengan Al (OH)₄ yang berdekatan.

Seiring dengan waktu, produk polikondensasi tersebut akan terkonsolidasi ke dalam jaringan aluminosilikat tiga dimensi yang mengandung rantai-Si-O-Si dan -Si-O-Al (Gambar 2.10c) sebagaimana dikemukakan Davidovits, proses kondensasi tidak menghasilkan rantai -Al-O-Al.



Gambar 2.11. Skema Reaksi Polikondensasi Monomer Al(OH)₄⁻ dan Si(OH)₄

Tingkat konektivitas (n) sebuah monomer berinti Si via atom oksigen dinyatakan dengan Qⁿ (n = 0; 1; 2; 3; 4), dimana Q⁰ menyatakan sebuah monomer, dan Q¹ menyatakan sebuah dimer (monomer tingkat dua). Q², Q³, Q⁴, menyatakan atom Si yang berikatan dengan 2, 3 dan 4 atom Si lainnya. Pada tahap awal disolusi, jarang sekali ditemukan spesies *silica* yang muncul sebagai monomer bertingkat Q⁰.

Untuk menjaga koordinasi tetrahedral monomer Al yang terdapat pada larutan alkali, rasio ion logam alkali dengan Al (rasio Na:Al; $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3$; atau k haruslah satu. Nilai 1 pada rasio Na:Al memperlihatkan jumlah minimum kation Na yang dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan muatan (*charge neutrality*) di dalam geopolimer. Apabila terdapat rasio Na:Al yang lebih rendah dari 1, maka akan terjadi disolusi prekursor metakaolin yang tidak sempurna, sebagai akibat dari tingginya rasio Si/Al dalam larutan. Sebagaimana kemungkinan formasi $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ yang lebih rendah dari $-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-$, seperti telah dibahas sebelumnya, reaksi polimerisasi akan berjalan lambat.

Kehadiran air dalam polimer organik juga merupakan hal penting. Berdasarkan Barbosa, rasio optimum $\text{H}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$ adalah 1 (dalam campuran polimer Na:Al = 1 dan Si:Al = 2). Sementara belum terdapat ketentuan pasti kadar air yang diperlukan, namun jelas kehadiran air dibutuhkan untuk mempermudah pencampuran, karena air berperan sebagai media transportasi ion di dalam polimer selama tahap pengerasan. Jumlah air yang terlalu sedikit menyebabkan kesulitan dalam pencampuran dan pembasahan partikel metakaolin yang kurang (sementara viskositas campuran tinggi), hal ini menyebabkan reaksi menjadi tidak sempurna. Sebaliknya, kadar air yang berlebihan dapat menghantarkan pada reaksi dilusi (*dilute reaction*), dimana komponen yang dapat melarut (*soluble component*) bergerak menjauhi zona reaksi. Di bawah kadar air yang minimum, sedimentasi prekursor *fly ash* sepanjang reaksi memberikan sampel yang tak-homogen.

2.2.3. Karakteristik Beton Geopolimer

Beton geopolimer adalah beton yang terbuat dari material sebagai matriks dan mineral agregat sebagai inklusi. Seperti halnya beton Portland pada umumnya, penggunaan berfungsi dalam memberikan sumbangan kekuatan yang terbesar pada beton. Agregat yang digunakan pada beton pada umumnya memiliki gradasi yang menerus, mulai dari agregat berukuran 37,5 mm sampai 0,15 mm. Hal ini bertujuan agar terjadi komposisi yang padat pada saat beton telah mengeras. Agregat dengan ukuran kasar (*coarse aggregate*) adalah proporsi yang terbanyak dalam beton, diikuti dengan agregat halus (*fine aggregate*).

Fungsi agregat kasar adalah sebagai penyusun kekuatan, sedangkan agregat halus lebih berfungsi sebagai pengisi ruang kosong. Dalam praktek, agregat halus bekerja dengan bahan matriks membentuk suatu mortar yang melingkupi seluruh permukaan agregat kasar dan memberikan sifat *adhesive* antara inklusi lainnya. Fungsi agregat halus sangatlah penting dalam mengurangi void pada beton, pada beberapa kasus digunakan juga material pengisi (*filler*) yang berukuran mikron seperti *fly ash*. Dengan terisinya pori-pori pada beton, maka kemungkinan rangkai dapat dikurangi.

2.2.4. Abu Terbang (*Fly Ash*)

Fly ash merupakan hasil sampingan dari pembakaran batubara yang mengandung silika *amorf*, aluminium oksida, besi oksida dan oksida lainnya dalam berbagai variasi jumlah. Pozzolan ini digunakan sebagai campuran untuk membuat beton, sehingga menjadi lebih keras.

Abu terbang sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen. Tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang dikandung oleh abu terbang akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat.¹⁰

2.2.5. Abu Dasar (*Bottom Ash*)

Abu dasar adalah hasil samping pembakaran batu bara berbentuk butiran kasar yang dikumpulkan dari tungku pembakaran. Sebagian besar pembakaran batu bara digunakan pada pembangkit listrik untuk menghasilkan uap air, namun terdapat juga sebagian kecil industri yang menggunakan bahan bakar batu bara.

Tipe umum tungku pembakaran batu bara dalam industri energi listrik adalah tungku dasar yang kering (*dry bottom boiler*). Dimana panas dihasilkan dari pembakaran batu bara yang diletakkan pada dasar tungku. Ketika batu bara dibakar pada tungku, sekitar 80 % dari material yang tidak terbakar atau abu terperangkap dalam bentuk gas yang beterbangan, gas ini kemudian ditangkap (*captured*) dan dikumpulkan dalam bentuk abu terbang. Sementara sisa 20 % dari

¹⁰ Djwantoro Hardjito, *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*, Sinar Harapan, 29 Oktober 2001

material tersebut adalah abu dasar kering, berwarna abu tua, berbentuk butiran, berpori dan sebagian besar berupa pasir (*loose*) berukuran kurang dari 12,7 mm.

Abu dasar telah lama digunakan dalam konstruksi jalan raya, sebagai base course ataupun pengisi beton aspal. Berdasarkan data statistik penggunaan hasil samping pembakaran batu bara, sebanyak 30,3 % dari jumlah total abu dasar yang dihasilkan pada tahun 1996 di Amerika Serikat digunakan pada industri jalan dan konstruksi bangunan (EPA USA, 1998). Sementara sisa abu dasar yang dihasilkan dibuang bersamaan dengan abu terbang untuk landfilling.

Abu dasar sebagai sisa pembakaran, memiliki kadar karbon yang tinggi. Oleh karena itu, berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) No. 18 Tahun 1999 dan PP 85 Tahun 1999, abu dasar ditetapkan sebagai limbah B3. Dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk menemukan metode untuk menetralsir abu dasar, sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku industri.

