

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

2.1.1 Definisi Beton

Beton pada dasarnya adalah campuran yang terdiri dari agregat kasar dan agregat halus yang dicampur dengan air dan semen sebagai bahan pengikat dan pengisi antara agregat kasar (batu pecah) dan agregat halus (pasir) serta kadang-kadang ditambahkan *additive* (Tjokrodimulyo, 2007). Beton merupakan fungsi dari penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolik (*Portland cement*), agregat kasar, agregat halus, air dan bahan tambah (*admixture* atau *additive*) (Mulyono, 2005). Nawy (1985) dalam (Mulyono, 2005) mendefinisikan beton sebagai sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi dari material pembentuknya.

Beton dibentuk dari agregat campuran (halus dan kasar) dan ditambah dengan pasta semen. Agregat kasar berupa kerikil kasar atau batuan hancur seperti batu gamping, atau granit sedangkan agregat halus berupa pasir. Pasta semen mengikat pasir dan bahan-bahan agregat kasar. Rongga di antara bahan-bahan kasar diisi oleh bahan-bahan halus. Campuran beton bilamana dituang dalam cetakan kemudian dibiarkan maka akan mengeras seperti batuan. Pengerasan itu terjadi oleh peristiwa reaksi kimia antara air dan semen, dan hal ini berjalan selama waktu yang panjang.

Penjelasan material pembuatan beton :

1. Semen : bahan ikat hidrolik.
2. agregat campuran : bahan batu-batuan yang netral (tidak bereaksi) dan merupakan bentuk sebagian besar beton (misalnya pasir, kerikil, batu pecah, *basalt*).
3. batuan semen : campuran antara semen dan air (pasta semen) yang mengeras.

5. *mortar* : campuran antara semen, agregat halus dan air yang telah mengeras.
6. *spesi beton* : campuran antara semen, agregat campuran (halus dan kasar) dan air yang belum mengeras.
7. *beton* : campuran semen, agregat campuran dan air yang telah mengeras.
8. *bahan tambahan* : bahan kimia tambahan yang ditambahkan kedalam spesi beton dan atau beton untuk mengubah sifat beton yang dihasilkan (misalnya '*accelerator*', '*retarder*', dan sebagainya). (Mulyono, 2004 dalam Fernando, 2014).

Perbedaan mendasar antara beton normal dengan beton *geopolimer*, yaitu pada penggunaan semen *portland*. Pada beton *geopolimer* tidak menggunakan semen *portland*. Menurut ASTM C-150 (1985) dalam (mulyono, 2005), semen *portland* didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan menggiling klinker yang terdiri dari kalsium silikat hidrolis, yang umumnya mengandung satu atau lebih bentuk kalsium sulfat sebagai bahan tambahan yang digiling bersama-sama dengan bahan utama. Hidrolis berarti sangat mudah bereaksi dengan air, senyawa yang bersifat hidrolis akan bereaksi dengan air secara cepat. Semen *portland* bersifat hidrolis karena didalamnya terkandung kalsium silikat dan kalsium sulfat yang bersifat hidrolis dan sangat cepat bereaksi dengan air. Reaksi semen dengan air berlangsung secara *irreversible*, artinya hanya dapat terjadi satu kali dan tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula.

klinker dibuat dengan cara membakar lempung batu kapur yang memiliki kadar lempung 13%-35%, kadar silica 10%-20%, kadar alumina 10%-20%, serta kadar oksida besi 10%-20%. Setelah dibakar, kapur tersebut dibasahi dengan air untuk mematikan kapur dan menghilangkan kapur bebas (Mulyono, 2005). Pembakaran pada tungku dapat mencapai 1450°C dan menghasilkan CO₂ sebagai hasil sampingan pembakaran.

Semen *portland* mengandung beberapa unsur kimia yaitu kapur (CaO) sebesar 60-65%, silika (SiO₂) 17-25%, alumina (Al₂O₃) 3-8%, besi (Fe₂O₃) 0.5-6%, magnesia (MgO) 0.5-4% , sulfur (SO₃) 1-2%, soda/potash 0.5-1% (Tjokrodimuljo, 2007). Dari beberapa unsur tersebut membentuk beberapa senyawa. Di dalam industry semen senyawa penyusun semen tersebut diistilahkan sebagai mineral C₃S, C₂S, C₃A dan C₄AF yang berarti :

1. C₃S = Trikalsium silikat atau 3CaO.SiO₂
2. C₂S = Dikalsium silikat atau 2CaO.SiO₂
3. C₃A = Trikalsium aluminat atau 3CaO.Al₂O₃
4. C₄AF = Tetrakalsium aluminoforit atau 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃

Fungsi utama semen adalah mengikat butir-butir agregat hingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara diantara butir-butir agregat. Walaupun komposisi semen dalam beton hanya sekitar 10%, namun karena fungsinya sebagai bahan pengikat maka peranan semen menjadi penting (Mulyono, 2005).

Standar industri di Amerika (ASTM) maupun standar di Indonesia (SNI) mengenal 5 jenis semen, yaitu:

1. Jenis I, yaitu semen untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus.
2. Jenis II, yaitu semen untuk penggunaan yang memerlukan ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang.
3. Jenis III, yaitu semen yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi setelah pengikatan terjadi.
4. Jenis IV, yaitu semen yang dalam penggunaannya menuntut panas hidrasi yang rendah.
5. Jenis V, yaitu semen yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan yang sangat baik terhadap sulfat.

Semen *portland* yang digunakan di Indonesia harus memenuhi syarat SH.0013-81 atau standar Uji Bahan Bangunan Indonesia 1986, dan harus memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam standar tersebut (PB.1989:3.2-8 dalam Mulyono, 2005).

2.1.2 Jenis-Jenis Beton

Beton sering kali digunakan sebagai salah satu bahan konstruksi yang telah umum digunakan untuk bangunan gedung, jembatan, jalan, dan lainnya. Terdapat beberapa jenis beton yang dapat dipakai dalam konstruksi suatu bangunan yaitu (Mulyono, 2005):

1. Beton normal adalah beton yang menggunakan agregat normal.
2. Beton bertulang adalah beton yang menggunakan tulangan dengan jumlah dan luas tulangan tidak kurang dari nilai minimum yang diisyaratkan, dengan atau tanpa pratekan dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja.
3. Beton pracetak adalah beton yang elemen betonnya tanpa atau dengan tulangan yang dicetak di tempat yang berbeda dari posisi akhir elemen dalam struktur.
4. Beton *prestress* (pratekan) adalah beton bertulang dimana telah diberikan tegangan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat pemberian beban yang bekerja.
5. Beton ringan struktural adalah beton yang memakai agregat ringan atau campuran antara agregat kasar ringan dan pasir alami sebagai pengganti agregat halus ringan dengan ketentuan tidak boleh melampaui berat isi maksimum beton 1850 kg/m^3 kering udara dan harus memenuhi ketentuan kuat tekan dan kuat tarik beton ringan untuk tujuan struktural.
6. Beton ringan total atau beton ringan berpasir adalah beton yang seluruh agregat halus dengan berat normal.

2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan Beton

Dalam keadaan yang mengeras, beton bagaikan batu karang dengan kekuatan tinggi. Dalam keadaan segar beton mudah dibentuk sesuai yang diinginkan guna mendapatkan nilai seni dan arsitektur dengan tujuan dekoratif. Selain itu beton juga tahan terhadap serangan korosi dan api. Secara umum kelebihan dan kekurangan beton dalam (Mulyono, 2005) :

Kelebihan beton adalah sebagai berikut :

1. Dapat dengan mudah dibentuk sesuai dengan kebutuhan konstruksi.
2. Mampu memikul beban yang berat.
3. Tahan terhadap temperatur yang tinggi.
4. Biaya pemeliharaan yang kecil.

Kekurangan beton adalah sebagai berikut :

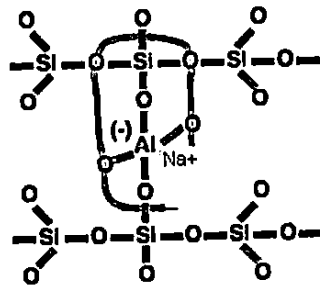
1. Bentuk yang telah dibuat sulit diubah.
2. Pelaksanaan pekerjaan membutuhkan ketelitian yang tinggi.
3. Berat.
4. Daya pantul suara yang keras.

2.2 Beton Geopolimer

2.2.1 Definisi Beton Geopolimer

Terminology *geopolimer* pertama kali digunakan oleh Profesor Joseph Davidovits pada tahun 1978 untuk menjelaskan tentang mineral *polimer* yang dihasilkan melalui *geochemistry*. *Geopolimer* adalah bentuk anorganik alumina-silika yang disintesa melalui material yang banyak mengandung Silika (Si) dan Alumina (Al) yang berasal dari alam atau material hasil sampingan industri. Beton *geopolimer* adalah beton yang dibuat tanpa menggunakan semen sebagai bahan pengikat, dan bahan pengganti digunakan material *prekursor* yang bersifat *pozzolanik* yang kaya akan Silika (Si) dan Alumina (Al) yang dapat bereaksi dengan cairan alkali untuk menghasilkan bahan pengikat (*binder*). Silika dan Alumina dalam *prekursor* akan bereaksi dengan bantuan cairan sodium hidroksida dan sodium silikat untuk mengikat agregat pasir dan material lainnya menjadi

Pada geopolimer, terjadi polimer jaringan silikon-oksigen-aluminium dengan mengubah tetrahedral silikon dan aluminium sehingga bergabung bersama secara tiga arah dengan pemakaian bersama seluruh atom O (Gambar 2.1). Polimer silikon-okso-aluminat dapat disebut sialat sehingga geopolimer dapat disebut poli(sialat). Sialat adalah kependekan dari silicon-okso-aluminat. Bentuknya amorf sampai semi-kristal (Davidovits, 1991 dalam Azkia, 2013).



Gambar 2.1 Ikatan yang terjadi dalam geopolimer (Davidovits, 2008 dalam Azkia, 2013)

Geopolimerisasi melibatkan reaksi kimia dari alumina-silikat oksida (Si_2O_5 , Al_2O_2) dengan alkali polisilikat yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Polisilikat umumnya berupa natrium atau kalium silikat yang disuplai oleh industri kimia atau bubuk silika halus sebagai produk sampingan dari proses *ferro-silicon metallurgy*.

Beton geopolimer dikatakan ramah lingkungan, karena selain dapat menggunakan bahan-bahan buangan industri, proses pembuatan beton *geopolimer* tidak terlalu memerlukan banyak energi, seperti halnya proses pembuatan klinker yang setidaknya memerlukan suhu 1450°C . Dengan pemanasan lebih kurang 60°C selama satu hari penuh sudah dapat dihasilkan beton berkekuatan tinggi.

Untuk melarutkan unsur-unsur silika dan alumina, serta memungkinkan terjadinya reaksi kimiawi, digunakan larutan alkali. Material ini digabungkan dengan agregat batuan kemudian menghasilkan beton geopolimer tanpa menggunakan semen lagi.

2.2.2 Material Penyusun Beton *Geopolimer*

Material penyusun beton *geopolimer* terdiri dari agregat kasar, agregat halus, *prekursor*, alkali aktivator, dan air. Salah satu yang membedakan beton normal dengan beton *geopolimer* adalah penggunaan bahan perekatnya. Bahan perekat *geopolimer* terdiri dari *prekursor* dan alkali aktivator. Bahan perekat inilah yang nantinya akan direaksikan dengan air membentuk pasta *geopolimer*.

2.2.2.1 Agregat

Agregat adalah butiran mineral yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat kira-kira menempati sebanyak 70% volume mortar atau beton. Walaupun namanya sebagai bahan pengisi, akan tetapi agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mortar atau betonnya, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan mortar/beton (Tjokrodimuljo, 2007).

Pada umumnya campuran beton menggunakan 2 macam agregat yaitu:

1. Agregat halus (Pasir)

Pada percobaan ini pembuatan beton menggunakan pasir sebagai agregat halusnya. Agregat halus mempunyai ukuran butiran 0,15 mm – 5 mm. Beton pada umumnya menggunakan pasir sebagai agregat halusnya namun terdapat beberapa jenis beton yang tidak menggunakan pasir sebagai agregat halus pada kondisi khusus atau sesuai dengan kebutuhan.

Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5%. Apabila kadar lumpur melampaui 5% maka agregat perlu dicuci dahulu sebelum digunakan dalam adukan beton (Mulyono, 2005). Menurut Tjokrodimuljo (2007) Agregat yang dipakai dalam pembuatan beton harus bersih dari kotoran karena berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Pada agregat halus kandungan kotoran tidak lebih dari 5% untuk beton sampai 10 MPa, dan 2,5 % untuk beton mutu yang lebih tinggi. Pada agregat kasar kandungan kotoran ini dibatasi sampai maksimum 1%. Jika agregat

SK SNI 03-1968-1990 mengklasifikasikan distribusi ukuran butiran agregat halus (pasir) menjadi empat daerah yaitu daerah 1 (kasar), daerah 2 (agak kasar), daerah 3 (agak halus) dan daerah 4 (halus) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Batas-Batas Gradasi Agregat halus

Lubang Ayakan		% Berat Butir Yang Terlewat Ayakan			
Britis (mm)	ASTM (No)	Daerah 1	Daerah 2	Daerah 3	Daerah 4
4,75	3/16 inc	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,36	8	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,18	16	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	30	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	50	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	100	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

(Sumber : SK SNI 03-1968-1990)

2. Agregat Kasar (Krikil)

Pemilihan agregat yang digunakan dalam pencampuran beton dalam keadaan jenuh kering muka. Keadaan jenuh kering muka lebih disukai sebagai standar dalam campuran beton (*mix design*), hal ini disebabkan karena keadaan jenuh kering muka merupakan kebasahan agregat yang hampir sama dengan agregat dalam beton, sehingga agregat tidak akan menambah maupun mengurangi air dari pastinya, selain itu kadar air di lapangan lebih banyak yang mendekati keadaan *SSD (surface saturated dry)* daripada yang kering tungku (Tjokrodimuljo, 2007).

Agregat kasar yang digunakan dalam pembuatan beton harus diketahui tingkat keausannya karena tingkat keausan agregat kasar berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Berdasarkan Persyaratan Umum

Tabel 2. 2 Persyaratan kekerasan agregat kasar

Kekuatan Beton	Maksimum bagian yang hancur dengan mesin <i>Los Angles</i> , Lolos Ayakan 1,7 mm (%)
Kelas I (sampai 10 MPa)	50
Kelas II (10 MPa - 20 MPa)	40
Kelas III (diatas 20 MPa)	27

Sumber: (Tjokrodinuljo, 2007)

Agregat kasar mempunyai ukuran butiran lebih dari 5 mm. beton pada umumnya menggunakan pecahan batu (*Gravel*) sebagai agregat kasarnya. Agregat kasar merupakan penyumbang sebagian besar kekuatan dari beton.

Krikil dalam penggunaannya harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

1. Butir-butir keras yang tidak berpori serta bersifat kekal yang artinya tidak pecah karena pengaruh cuaca seperti sinar matahari dan hujan.
2. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%, apabila melebihi maka harus dicuci lebih dahulu sebelum menggunakannya.
3. Tidak boleh mengandung zat yang dapat merusak batuan seperti zat-zat yang reaktif terhadap alkali.
4. Agregat yang berbutir pipih hanya dapat digunakan apabila jumlahnya tidak melebihi 20% dari berat keseluruhan.

2.2.2.2 Air

Air diperlukan pada pembuatan beton untuk memicu proses kimiawi semen. Membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Air yang dapat diminum umumnya dapat digunakan sebagai campuran beton, tetapi tidak berarti air untuk pencampur beton harus memenuhi standar persyaratan air minum. Air yang mengandung senyawa-senyawa berbahaya yang terdapat dalam minyak, gula, atau bahan kimia lainnya, bila dipakai untuk

campuran beton akan menurunkan kualitas beton, bahkan dapat mengubah sifat-sifat beton yang dihasilkan. Air yang berlebihan juga akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak tercapai seluruhnya, sehingga akan mempengaruhi kekuatan beton. Proses hidrasi dalam beton segar membutuhkan air kurang lebih 25%-30% dari berat semen yang digunakan.

Proporsi air dinyatakan dalam faktor air semen, yaitu angka yang menyatakan perbandingan antara berat air dibagi berat semen dalam campuran beton. Dalam beton konvensional nilai faktor air semen kurang dari 0,35 membuat adukan beton sulit dikerjakan membuat beton yang dihasilkan menjadi keropos dan memiliki kekuatan yang rendah, sehingga umumnya nilai faktor air semen lebih dari 0,40 (berarti terdapat kelebihan air yang tidak bereaksi dengan semen). Kelebihan air ini diperlukan sebagai pelumas agar adukan beton dapat dikerjakan. Makin banyak air maka adukan beton semakin mudah dikerjakan. Akan tetapi setelah mengeras beton yang dihasilkan menjadi *porous* (keropos) sehingga kekuatannya rendah.

Sementara belum terdapat ketentuan pasti kadar air yang diperlukan dalam beton *geopolimer*, namun jelas kehadiran air dibutuhkan untuk mempermudah pencampuran, karena air berperan sebagai media transportasi ion didalam polimer selama tahap pengerasan.

2.2.2.3 Alkali aktivator

Alkali aktivator dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi. Pada penelitian ini alkali aktivator yang digunakan adalah Natrium silikat dan natrium hidroksida. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sandy dan Johannes (2007) dalam (Fernando, 2014) aktivator yang digunakan dalam pembuatan beton geopolimer adalah natrium hidroksida dengan sodium silikat.

Sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *prekursor* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer

dalam monomer Si(OH)_4 dan Al(OH)_4 . selama proses *curing*, monomer-monomer tadi terkondensasi dan membentuk jaringan polimer tiga dimensi dan berikatan silang. Ion alkali bertindak sebagai penetral muatan (*charger balancer*) untuk tiap molekul tetrahedron Al(OH)_4 (Septia, 2011).

2.2.2.4 Prekursor

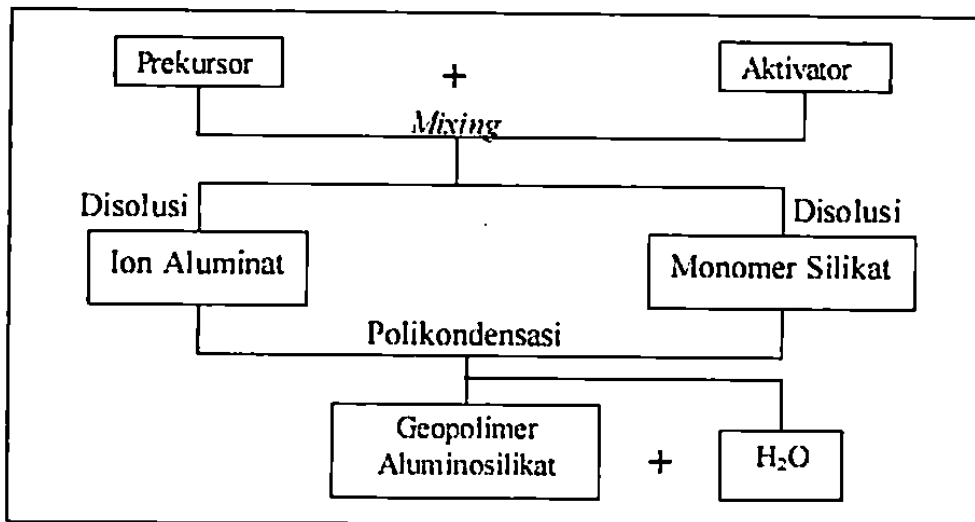
Prekursor merupakan bahan dasar yang digunakan dalam pembuatan beton *geopolimer* yang banyak mengandung unsur silika dan alumium. *Prekursor* dapat berupa mineral alami dan limbah industri. Salah satu contoh *prekursor* yang berasal dari mineral alami adalah kaolin dan bubuk lumpur lapindo, sedangkan yang berasal dari limbah industri yaitu abu sekam padi, *blast furnace slag*, abu terbang (*fly ash*), serbuk granit dan lumpur merah (*red mud*). Jenis *prekursor* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* yang berasal dari CV. Lestari. *Fly ash* merupakan limbah hasil pembakaran pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berbahan bakar batu bara.

Sifat mengikat bahan baku *geopolimer* merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi sifat *geopolimer* yang dihasilkan. Apabila sifat bahan baku diketahui maka hasil *geopolimer* dapat diprediksikan Berbagai jenis abu terbang sebagai bahan geopolimer telah diselidiki oleh Fernandez-Jimenez (2004) dalam (Fernando, 2014). Penelitian ini mengklaim bahwa untuk mendapat sifat mengikat (*binding properties*) optimal, maka kandungan CaO harus rendah, memiliki silika reaktif antara 40-50%, Fe_2O_3 tidak melebihi 10%, material tak terbakar (LOI) kurang dari 5 %, dan 80-90 % partikelnya lebih kecil daripada $45\mu\text{m}$.

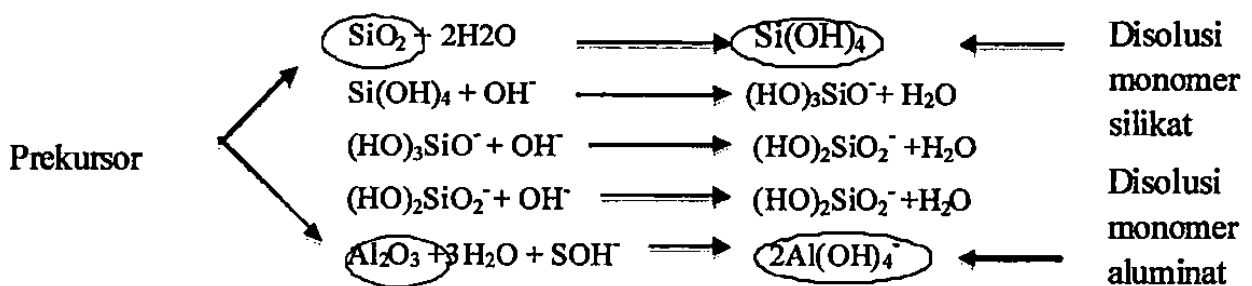
2.2.3 Proses Polimerisasi

Sintesa *geopolimer* membutuhkan dua konsistuen utama dalam reaksi penyampuran, yaitu prekursor yang kaya akan kandungan silika dan alumina dan alkali aktivtor. Meskipun mekanisme polimerisasinya masih belum dapat dipastikan, davidovit mengemukakan reaksi polimerisasi awal adalah berupa disolusi prekursor untuk membentuk monomer silika dan alumina di

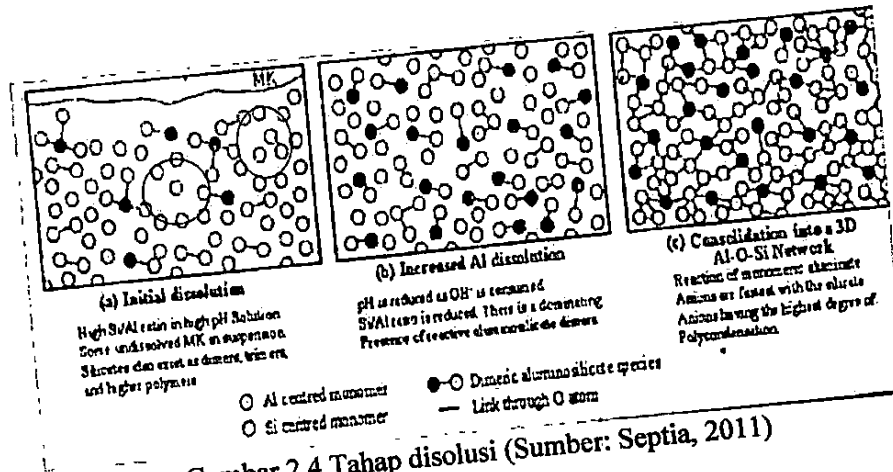
Prekursor dan aktivator akan bersintesa membentuk material padat melalui proses polimerisasi, dimana proses polimerisasinya yang terjadi adalah disolusi yang diikuti oleh polikondensasi. Dalam reaksi polimerisasi ini aluminium (Al) dan silika (Si) mempunyai peranan penting dalam ikatan polimerisasi (Davidovits, 1994 dalam Septia, 2011). Reaksi Al dan Si dengan alkali akan menghasilkan $\text{Al}(\text{OH})_4$ dan $\text{Si}(\text{OH})_4$. Diagram alur proses polimerisasi ditunjukkan pada gambar 2.2 sampai 2.6.



Gambar 2.2 Alur Polimerisasi (Sumber: Septia, 2011)



Gambar 2.3 Disolusi ion aluminat dan monomer silikat (Sumber: Septia, 2011)

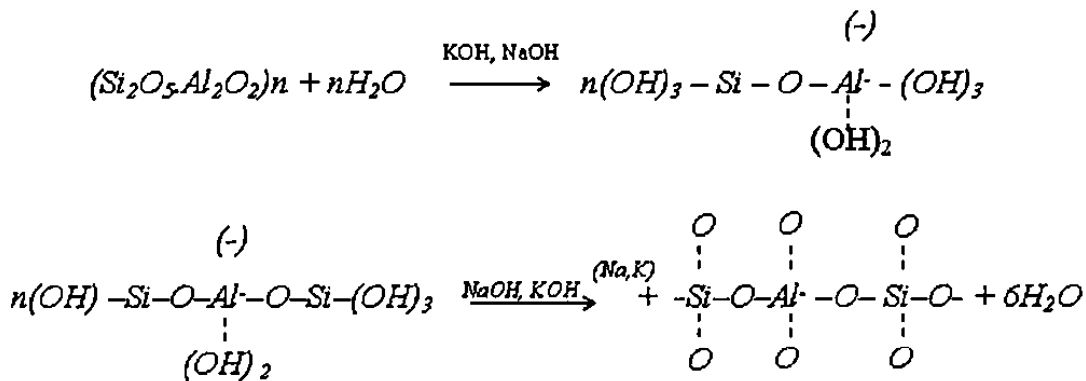


Gambar 2.4 Tahap disolusi (Sumber: Septia, 2011)

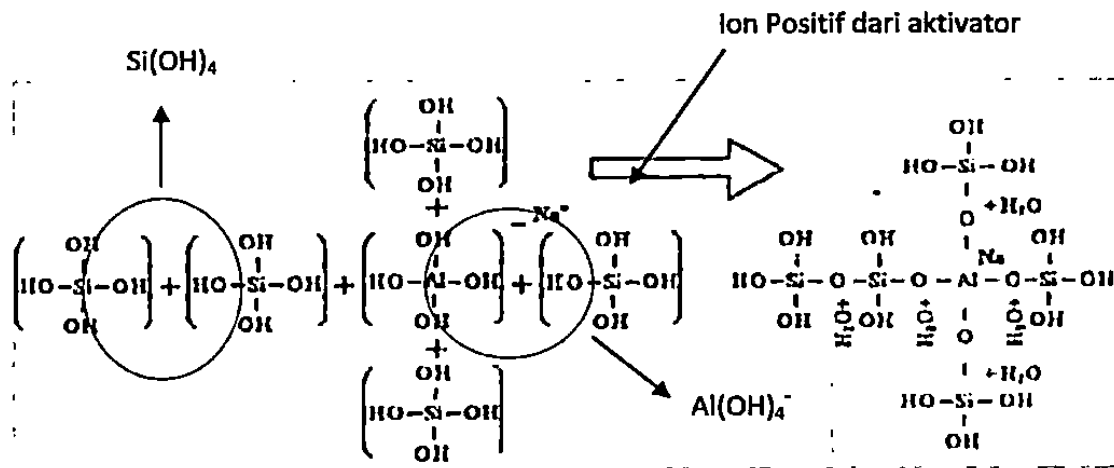
Keterangan Gambar

- Permulaan disolusi**
Tahap awal dimana rasio Si/Al tinggi, karena kecepatan pelepasan Al dari prekursor bersifat lambat. Lebih dari satu monomer berinti Si yang berikatan dengan satu anion Aluminat, sehingga hanya terdapat beberapa ikatan.
- Penambahan disolusi Al**
Penambahan disolusi Al menyebabkan pengurangan rasio Si/Al sehingga OH semakin dikonsumsi dan pH campuran akan turun. Hal ini menyebabkan pengurangan monomer berinti -Si dan peningkatan grup hidroksil (OH) yang terikat pada monomer berinti -Si.
- Konsolidasi kedalam tiga dimensi**
Peningkatan grup hidroksil (OH) meningkatkan kemungkinan reaksi polikondensasi antara monomer berinti -Si dengan $\text{Al}(\text{OH})_4$. Seiring dengan waktu, produk polikondensasi akan terkonsolidasi ke dalam jaringan aluminosilikat yang mengandung rantai -Si-O-Si dan -Si-O-Al.

Proses polikondensasi oleh alkali menjadi poly(sialate-siloxo) adalah sebagai berikut.



Gambar 2.5 Proses polikondensasi oleh alkali (Rashif, 2014)



Gambar 2.6 Skema reaksi polikondensasi monomer $Al(OH)_4^-$ dan $Si(OH)_4$ (sumber: Septia, 2011)

Pada disolusi alumina, OH dikonsumsi untuk menghidrolisis unsur Al untuk membentuk anion aluminat $Al(OH)_4^-$. Maka, untuk mencapai disolusi yang sempurna pada pembentukan monomer aluminat dan silikat dibutuhkan larutan alkali aktivator yang mencukupi.

Proses sintesis terbagi atas proses aktivasi bahan alumina-silikat oleh ion alkali dan proses curing untuk mendorong terjadinya polimerisasi dari monomer alumina-silikat menjadi struktur jaringan molekul tiga dimensi. Dari persamaan reaksi tersebut terlihat bahwa pada reaksi kimia pembentukan senyawa

2.2.4 Perawatan Beton *Geopolimer* (*curing*)

Perawatan beton dilakukan setelah beton dicetak kedalam cetakan. Ada beberapa metode perawatan beton *geopolimer* yang dilakukan, diantaranya:

1. Melakukan perawatan dengan cara perendaman ke dalam bak air dengan suhu $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.
2. Menutup beton *geopolimer* dengan menggunakan plastik atau kertas yang tidak tembus air. Hal ini menjaga agar air di dalam beton *geopolimer* tidak cepat menguap keluar.
3. Pemanasan beton *geopolimer* di dalam oven dengan suhu 60°C . Hal ini bertujuan untuk mempercepat proses hidrasi dan mempercepat pencapaian kekuatan.

Dari ketiga metode yang menghasilkan kuat tekan paling bagus yaitu dengan cara pemanasan. (Cahyati, 2013).

Reaksi polimerisasi membutuhkan panas dalam prosesnya, oleh karena itu metode *curing* dengan menggunakan oven atau microwave dengan suhu *curing* yang lebih tinggi lebih baik menghasilkan beton *geopolimer* dengan kuat tekan yang tinggi. Namun, dalam kondisi tertentu suhu *curing* yang tinggi dapat menyebabkan penurunan kuat tekan beton *geopolimer*.(Septia, 2012)

2.2.5 Kelebihan dan Kekurangan Beton *Geopolimer*

Kelebihan beton *geopolimer* adalah sebagai berikut:

1. Beton *geopolimer* mempunyai nilai susut yang kecil.
2. Geopolimer lebih hemat energi, karena proses perawatannya hanya menggunakan suhu 60°C .
3. *Geopolimer* lebih ramah lingkungan, karena pembuatannya menggunakan bahan dasar hasil industri yang tidak tembakau dan tembakau.

Kekurangan beton *geopolimer* adalah sebagai berikut :

1. Proses pembuatannya lebih rumit dibandingkan beton konvensional karena material yang digunakan lebih banyak dari beton konvensional.
2. Belum adanya *mix design* yang pasti.
3. Beton *geopolimer* mempunyai tingkat pengerjaannya yang lebih susah dibandingkan beton konvensional.

2.3 Perbedaan Beton Geopolimer dan Beton Portland

Beton *geopolimer* memang dapat digunakan untuk menggantikan beton *portland* karena memiliki sifat yang mirip, seperti bentuk pasta dan proses pengerasan yang terjadi. Selain dari perbedaan penggunaan *binder* sering kali terjadi kesalahpahaman mengenai sifat beton *geopolimer* dan beton *portland*. Berikut ini perbedaan mendasar antara sifat beton *geopolimer* dengan beton *portland* yang perlu dipahami.

1. Proses pengerasan Kalsium silikat dalam semen yang dicampur air akan terhidrolisa menjadi kalsium hidroksida Ca(OH)_2 dan kalsium silikat hidrat ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) pada suhu ruang. Sedangkan beton geopolimer mengeras karena reaksi polikondensasi material aluminosilikat (SiO_2 dan Al_2O_3). Perbedaan kimiawi ini menyebabkan sifat fisika dan kimia dari semen portland dan geopolimer berbeda, meskipun keadaan visual dan pengerasannya mirip. (Pramana, 2013).
2. Beton *geopolimer* memiliki nilai *creep* yang rendah penyusutan saat pengerasan sangat kecil. Sedangkan Modulus Young, *Poisson's Ratio* dan *tensile strength* yang relatif sama dengan semen *portland*. Beton *geopolimer* mampu mencapai 70% dari kekuatannya pada 4 jam pertamanya, walaupun hal ini juga tergantung dari sifat bahan baku yang digunakan. (Khale, dan Chaudhary, 2007 dalam Azkia, 2013)
3. PH dari semen *geopolimer* dan korosi baja tulangan. Beberapa insinyur salah sangka bahwa beton *geopolimer* memiliki pH yang tinggi, antara 13-14, karena penggunaan NaOH atau KOH yang memiliki pH tinggi, sehingga menyebabkan korosi pada baja tulangan. Pada kenyataannya

pasta *geopolimer* yang dibuat 5 menit setelah pengadukan memiliki pH yang lebih rendah, antara 11,5-12,5. Bandingkan dengan pasta semen *portland* yang memiliki pH antara 12-13. Nilai pH yang relatif sama antara *geopolimer* dan semen *portland* aman dan tidak merusak baja tulangan (Davidovits, 2008 dalam Azkia, 2013).

4. Karbonasi di sekeliling baja, semen *portland* memiliki ion hidroksil bebas yang mengalami karbonasi dari Ca(OH)_2 menjadi CaCO_3 . Karbonasi semen *portland* dapat menghilangkan ion hidroksil dan menurunkan pH, hal ini dapat menyebabkan korosi di sekeliling baja. Sebaliknya, karbonasi beton geopolimer menghasilkan kalium karbonat atau natrium karbonat, dengan pH minimum 10-10,5, merupakan perlindungan kimia terhadap korosi (Davidovits, 2008 dalam Azkia, 2013).
5. Alkalin pada beton semen *portland* dapat menyebabkan reaksi alkali agregat yang merusak. Reaksi alkali-agregat adalah serangkaian kimia yang melibatkan alkali hidroksida dari semen dengan silika reaktif yang ada pada agregat. Reaksi ini membutuhkan air dalam pembentukan gel alkali-silika, yang jika berada dalam kondisi lembab akan mengembang sehingga menimbulkan *swelling pressure* yang menyebabkan kerusakan pada beton, berupa retak sampai lepas sebagian. Oleh karena itu, alkali selalu dihindari dalam pembuatan semen *portland*. Sedangkan pada *geopolimer*, kandungan alkali tidak menyebabkan reaksi alkali agregat (Davidovits, 2008 dalam Azkia, 2013).
6. Ion klorida dapat menyebabkan korosi dan pengeroposan pada beton *portland* karena ion klorida dapat menyerang sistem pengikat kalsium silikat hidrat. Oleh karena itu, beton *portland* tidak boleh menggunakan air berklorida dan tidak bisa diaplikasikan pada lingkungan yang berklorida tinggi seperti air laut. Sedangkan *geopolimer* memiliki ketahanan (*durability*) terhadap ion klorida (Davidovits, 2008 dalam Azkia,

2.4 Fly Ash (Abu Terbang)

Fly ash (abu terbang) adalah salah satu residu yang dihasilkan dalam pembakaran dan terdiri dari partikel-partikel halus *amorf*. Abu tersebut merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan bahan material karena proses pembakaran batubara. Proses pembakaran batubara pada unit pembangkit uap (*boiler*) akan membentuk dua jenis abu, yaitu *fly ash* (abu terbang) dan *bottom ash* (abu dasar).

Fly ash merupakan salah satu *prekursor* yang dapat digunakan menjadi material dasar dari pembuatan beton *geopolimer*. *Fly ash* sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, tetapi dengan kehadiran air dan alkali aktivator, oksida silika yang dikandung oleh *fly ash* akan bereaksi secara kimia dengan alkali aktivator. Kualitas *fly ash* dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar, teknik penyimpanan, dan penanganannya.

Material ini mempunyai kadar bahan semen yang tinggi dan mempunyai sifat *pozzolanik*, yaitu dapat bereaksi dengan kapur bebas yang dilepas semen saat proses hidrasi dan membentuk senyawa yang bersifat mengikat pada temperature normal dengan adanya air, (Himawan dan Darma, 2005 dalam Fernando, 2014). Komposisi dari *fly ash* sebagian besar terdiri dari silikat dioksida (SiO_2), alumunium (Al_2O_2), besi (Fe_2O_3), dan kalsium (CaO) sedangkan magnesium, potassium, sodium, titanium, dan sulfur juga ada tetapi dalam jumlah yang sedikit. Sebagian besar komposisi *fly ash* ini tergantung dari tipe batu bara.

Fly ash digolongkan menjadi dua macam menurut jenis batu bara yang digunakan, yaitu tipe C dan tipe F. *Fly ash* tipe C berasal dari pembakaran batu bara jenis *lignite* atau *sub-bituminous* sedangkan *fly ash* tipe F dihasilkan dari *anthracite* atau *bituminous*. Tipe *fly ash* juga dapat dibedakan dari warna fisiknya, *fly ash* tipe C berwarna lebih terang (putih dan abu-abu) sedangkan *fly ash* tipe F berwarna lebih gelap (kuning, coklat dan hitam). Hal ini dikarenakan jumlah karbon yang tidak terbakar pada *fly ash* tipe C lebih sedikit daripada tipe F. Selain itu, klasifikasi *fly ash* dapat diketahui dari persentase komposisi kimia yang

daripada tipe F. Salah satu contoh komposisi kimia dalam *fly ash* tipe C dan tipe F yang di dapat dari PT. Jaya Ready Mix Surabaya tercantum pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Komposisi kimia pada *fly ash* tipe C dan Tipe F

Oksida	<i>Fly Ash</i> tipe C (%)	<i>Fly Ash</i> tipe F (%)
SiO ₂	46,39	54
Al ₂ O ₃	20,08	29,12
Fe ₂ O ₃	13,32	9,81
CaO	13,07	1,33
SO ₃	2,16	0,65
MgO	1,09	0,81
Mn ₂ O ₃	0,15	0,04
Cr ₂ O ₃	0,01	-
Na ₂ O	0,17	< 0,01
K ₂ O	0,77	0,96
TiO ₂	1,64	1,35
P ₂ O ₅	1,03	0,16

Sumber : PT. Jaya ready mix Surabaya (Fernando, 2014)

Selama ini, abu terbang disebut demikian karena kecilnya ukuran partikel dan karena mudah berterbangan di udara, lebih banyak tidak dimanfaatkan dengan semestinya ataupun digunakan sebagai bahan timbunan. Penimbunan yang sembarangan bahkan berpotensi mengancam kelestarian lingkungan, selain mudah berterbangan dan mengotori udara, partikel-partikel logam berat yang dikandungnya dapat mudah larut dan mencemari sumber-sumber air. Oleh karena itu, pemanfaatan *fly ash* akan mendatangkan manfaat ganda yaitu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

2.5 Larutan Alkalin

Larutan alkalin sebagai komponen aktivator yang memiliki alkali hidroksida, silika, alumina, carbon dan sulfat atau kombinasi keduanya. Dalam penelitian ini digunakan 2 larutan alkalin, yaitu:

1. Sodium Silikat

Sodium silikat atau biasa disebut *waterglass* berfungsi untuk mempercepat reaksi polimer. Sodium silikat adalah salah satu bahan yang digunakan dalam campuran semen dan tekstil. Sodium silikat ini bisa digunakan dalam perbaikan logam, perawatan otomotif, pengawetan makanan, perawatan kayu dan juga dalam campuran beton membantu mengurangi porositas beton. Reaksi kimia muncul akibat kandungan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalam beton mengikat silika-silika yang ada untuk menjadi renggang sehingga lebih mudah dipakai dan tahan air.

Bentuk dari sodium silikat berupa padat dan berwarna putih dapat larut dalam air menghasilkan larutan alkali yang bersifat stabil baik dalam bentuk biasa maupun larutan alkali. Komposisi sodium silikat (*Waterglass*) saat kering adalah Na_2SiO_3 , Na_6SiO_7 , $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ dengan komposisi air yang bervariasi. Bentuknya bening sampai putih atau putih keabu-abuan, kristalin atau seperti lem. Natrium silikat juga dapat mengiritasi kulit. sodium silikat dalam bentuk larutannya adalah alkalin kuat (Windholtz, 1976 dalam Azkia, 2013).

Sebagai salah satu komposisi utama beton *geopolimer*. Sodium silikat terlarut dalam air, menyediakan lingkungan reaksi cairan-padatan yang ideal untuk pelarutan material *prekursor*. Campuran antara *prekursor* dan sodium silikat membentuk ikatan yang sangat kuat, namun banyak terjadi retakan - retakan antar *mikrostruktur*.

2. Natrium Hidroksida

Natrium hidroksida ini juga dikenal sebagai soda api, yaitu bahan

hidroksida merupakan senyawa alkali yang sangat reaktif apabila direaksikan dengan air, maka akan melepaskan sejumlah panas.

Natrium hidroksida (NaOH) adalah sejenis basa logam kaustik berfungsi sebagai pereaksi unsur alumina dan silika yang terkandung dalam bahan dasar sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Natrium hidroksida murni berbentuk putih padat dan tersedia dalam bentuk pelet, serpihan, butiran ataupun larutan jenuh 50%. Mempunyai sifat lembab cair dan secara spontan menyerap karbon dioksida dari udara bebas, sangat larut dalam air dan akan melepaskan panas ketika dilarutkan. Campuran *fly ash* dengan natrium hidroksida membentuk ikatan yang sangat kuat tetapi menghasilkan ikatan yang lebih padat dan tidak ada retakan.

Larutan alkalin yang digunakan dalam pembuatan *geopolimer* adalah logam alkali yang larut. Logam alkali yang sering digunakan sebagai reagen reaksi geopolimerisasi adalah Natrium (Na) dan Kalium (K). Massa molekul relatif NaOH adalah 40 gram/mol. Natrium hidroksida dapat mengabsorpsi CO₂ dari udara. Natrium hidroksida menghasilkan panas (eksotermis) saat dilarutkan dalam air atau ketika dilarutkan dengan asam. NaOH berbentuk padat dapat mencapai kemurnian 97-98 % sedangkan NaOH yang berbentuk cair nilai kemurniannya hanya 49%. (Fernando, 2014).

2.6 Perancangan Campuran Beton Normal (*Mix Design Concrete*)

Perancangan campuran beton (*mix design concrete*) dimaksudkan untuk mengetahui komposisi atau proporsi bahan-bahan penyusun beton. Pada dasarnya perancangan campuran dimaksudkan untuk menghasilkan suatu proporsi campuran bahan yang optimal dengan kekuatan yang maksimum. Pengertian optimal adalah penggunaan bahan yang minimum dengan tetap mempertimbangkan kriteria standar ekonomis dilihat dari biaya keseluruhan untuk membuat struktur beton tersebut Mulyono (2004) dalam (Fernando, 2014). Hal-

hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan beton adalah kuat tekan yang direncanakan, kemudahan pengerjaan (*workability*), keawetan, dan ekonomis.

Dalam perancangan campuran beton (*mix design*) konvensional menggunakan SK SNI : 03-2834-2002 (Tjokrodinuljo, 2007). Langkah-langkah pokok cara perancangan campuran beton (*mix design*) menurut standar ini ialah :

1. Menghitung nilai deviasi standar (S),
2. Menghitung nilai tambah atau *margin* (m),
3. Menetapkan kuat tekan beton yang disyaratkan (f_c') pada umur tertentu,
4. Menetapkan kuat tekan rata-rata (f_{cr}),
5. Menetapkan jenis semen *portland*,
6. Menetapkan jenis agregat,
7. Menetapkan nilai faktor air semen,
8. Menetapkan nilai *slump*,
9. Menetapkan besar butir agregat maksimum,
10. Menetapkan air yang diperlukan per meter kubik beton,
11. Menghitung berat semen yang diperlukan,
12. Menetapkan jenis agregat halus,
13. Menetapkan proporsi berat agregat halus terhadap agregat campuran,
14. Menghitung berat jenis campuran,
15. Memperkirakan berat beton,
16. Menghitung kebutuhan berat agregat campuran,
17. Menghitung berat agregat halus yang diperlukan, berdasarkan hasil langkah 13 dan 16
18. Menghitung berat agregat kasar yang diperlukan, berdasarkan hasil langkah 13-16.

2.7 Perancangan Campuran Beton *Geopolimer*

Standar perancangan bahan susun beton *geopolimer* belum ada sampai saat ini, sehingga dibutuhkan metode pendekatan, salah satunya dapat digunakan

2002. Prinsip utama dalam perancangan campuran beton *geopolimer* yaitu penggantian pasta semen (semen + air) dengan pasta *geopolimer* (*prekursor* + alkali aktivator + Air), sedangkan kebutuhan agregat kasar dan kerikil sama seperti kebutuhan agregat beton konvensional.

Perancangan beton sesuai dengan SK-SNI didapat kebutuhan bahan susun untuk 1 m³ beton konvensional dengan f_c' 25 Mpa :

Agregat Kasar = 914,40 kg

Agregat Halus = 718,50 kg

Semen = 512,25 kg

Air = 204,9 kg

Maka kebutuhan yang harus diganti oleh pasta *geopolimer* yaitu pasta semen (semen + air) sebesar = 512,25 + 204,9 = 717,15 kg, sedangkan kebutuhan agregat kasar dan halus sama. Perhitungan selengkapnya pada lampiran 12.

2.8 Kuat Tekan Beton

Nilai kuat tekan beton merupakan faktor utama untuk mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur, semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton diantaranya nilai perbandingan bahan-bahannya, cara pengadukan beton, proses pemadatan, dan proses perawatan.

Kuat tekan beton dwakili oleh tegangan maksimum f_c' dengan satuan N/mm² atau MPa (Mega Pascal). Kekuatan tekan beton adalah perbandingan beban terhadap luas penampang beton. Kuat tekan beton silinder dapat dihitung dengan persamaan 3.1 (Tjokrodinuljo, 2007).

Notasi f_c' merupakan nilai kuat tekan beton yang diuji dengan menggunakan cetakan silinder dengan ukuran tinggi 30 cm dan diameter 15 cm, sedangkan notasi K merupakan nilai kuat tekan beton yang diuji tes kuat tekan dengan menggunakan cetakan kubus dengan ukuran 15 x 15 cm.. Pemberian gaya biasanya tegak lurus terhadap sumbunya. Nilai kuat tekan beton didapatkan dari hasil pengujian tes kuat tekan beton dapat dilihat seperti pada lampiran gambar.

Pengujian kuat tekan beton biasanya dilakukan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari

Untuk pengujian kuat tekan beton geopolimer sama dengan pengujian kuat tekan beton biasa (*portland*). Kuat tekan silinder beton dapat dihitung dengan Persamaan 3.1 (Tjokrodimuljo, 2007).

$$f_c' = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2. 1)$$

dengan:

f_c' = Kuat tekan silinder beton (MPa)

P = Beban tekan maksimum (N)

A = Luas bidang tekan (mm^2)

Berdasarkan kuat tekannya beton dapat dibagi beberapa jenis sebagaimana terdapat pada Tabel 2.4

Tabel 2.4 Jenis beton menurut kuat tekan

Jenis Beton	Kuat Tekan (MPa)
Beton Sederhana (<i>plain concrete</i>)	0 – 10 Mpa
Beton Normal	15 – 30 MPa
Beton pra-tegang	30 – 40 MPa
Beton tinggi	40 – 80 MPa
Beton sangat tinggi	> 80 Mpa

Sumber : Tjokrodimuljo, 2007

Menurut Tjokrodimuljo (2007), kuat tekan beton akan bertambah tinggi dengan bertambahnya umur, yang dihitung sejak beton dicetak. Laju kenaikan kuat tekan beton mula-mula cepat, lama-lama laju kenaikan itu akan semakin lambat dan laju kenaikan itu akan menjadi relatif sangat kecil setelah berumur 28 hari, sehingga secara umum kekuatan beton tidak naik lagi setelah berumur 28 hari. Sebagai standar kuat tekan beton (jika tidak disebutkan umur secara khusus) adalah kuat tekan beton pada umur 28 hari.

2.9 Faktor Pengali

Berdasarkan SNI-03-2834-2002 mengenai tata cara pembuatan campuran beton normal, bentuk standar benda uji beton untuk menguji kuat tekan beton adalah silinder dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Apabila

bentuk dan ukuran benda uji beton tidak sesuai dengan standar yang telah ditentukan, perlu dikalikan faktor pengali yang tercantum dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Faktor pengali untuk berbagai ukuran silinder beton

Ukuran silinder		Kuat Tekan %	Faktor Pengali
D(mm)	L(mm)		
50	100	108	0,917
75	150	106	0,943
100	200	104	0,962
150	300	100	1,000
200	400	96	1,042

Sumber: Neville, 1977 dalam Triandimulda, 2007)