

BAB II

STUDI LITERATUR

2.1 BETON

2.1.1 Pendahuluan

Beton adalah material yang telah banyak digunakan sebagai bahan konstruksi. Secara umum beton terdiri dari dua bagian utama. Bagian pertama adalah bahan matriks yang berfungsi sebagai pengikat antar material (*adhesive*), namun selain sebagai pengikat bahan matriks juga memberikan sumbangan kekuatan, apabila bahan ini tidak hadir pada beton maka beton tersebut tidak akan memiliki kekuatan sama sekali. Bagian yang kedua adalah bahan inklusi yang menyumbangkan sebagian besar kekuatan dari beton itu sendiri. Agregat terdiri dari material anorganik yang biasanya berupa mineral alami seperti batu/kerikil dan pasir.

Ada banyak tipe beton yang telah dikenal, beton semen adalah beton yang terdiri dari pasta semen sebagai matriks dan agregat sebagai inklusi. Beton semen sangat kuat menahan gaya tekan namun lemah apabila diberikan gaya tarik. Terdapat juga beton aspal yang terdiri dari aspal sebagai matriks dan agregat sebagai inklusi. Perbedaan dari kedua tipe beton tadi terdapat pada peruntukannya, beton semen biasa digunakan dalam konstruksi bangunan dan jalan, sedangkan beton aspal secara umum hanya digunakan sebagai bahan perkerasan jalan. Perbedaan penggunaan bahan matriks akan memberikan karakteristik yang berbeda untuk tiap beton. Hal ini akan berpengaruh pada sifat-sifatnya, seperti kuat tekan, kuat tarik, waktu ikat, suhu ikat, workabilitas, modulus elastisitas dan lainnya.

2.1.2 Karakteristik

Untuk mempermudah penggunaan dan pengerjaan beton, banyak pihak telah melakukan penelitian terhadap karakteristik beton serta faktor-faktor yang mempengaruhinya. karakteristik tersebut, yang akan dijabarkan di bawah ini.

2.1.2.1 Kuat Tekan

Kuat tekan dari beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

- 1) *Jenis semen dan kualitasnya.* Mempengaruhi kekuatan rata-rata dan kuat batas beton.
- 2) *Jenis dan lekak-lekuk bidang permukaan agregat.* Penggunaan agregat akan menghasilkan beton dengan kuat desak maupun tarik lebih besar daripada penggunaan kerikil halus dari sungai.
- 3) *Kualitas dari perawatan (curing).* Kehilangan sampai 40 % dapat terjadi bila pengeringan dilakukan sebelum waktunya.
- 4) *Suhu ikat.* Pada umumnya kecepatan pengerasan beton bertambah dengan bertambahnya suhu. Pada titik beku (0° C) kuat tekan akan tetap rendah pada waktu yang lama.
- 5) *Umur.* Pada keadaan normal, kekuatan beton akan bertambah seiring dengan bertambahnya umur. Kecepatan pertambahan kekuatan tergantung pada jenis semen. Misalnya semen dengan kadar alumina tinggi menghasilkan beton dengan kuat tekan pada 24 jam setara dengan kuat tekan semen portland pada 28 hari.

2.1.2.2 Kuat Tarik

Kuat tarik beton umumnya adalah sekitar seperdelapan kuat tekan pada waktu masih muda, dan berkisar antara seperduapuluh kuat tekan sesudahnya¹⁾.

Kuat tarik berperan penting dalam menahan retak-retak akibat perubahan kadar air dan suhu. Namun dalam perhitungan desain, biasanya kuat tarik hanya menyumbangkan sedikit sumbangsih terhadap gaya tarik dan digantikan fungsinya dengan menggunakan penulangan pada daerah tarik.

2.1.3 Material Penyusun

2.1.3.1 Agregat

Dalam SNI T-15-1991-03 Agregat didefinisikan sebagai material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton semen hidrolis atau adukan. 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. Kriteria agregat bergantung pada karakteristik – karakteristik di bawah ini :

1) Ukuran Agregat

Berdasarkan ukurannya, agregat dibedakan menjadi :

a] Agregat halus (*fine aggregate*) diameter 0–5 mm disebut pasir, yang dapat dibedakan lagi menjadi :

- Pasir halus: \varnothing 0 – 1 mm

- Pasir kasar: \varnothing 1 – 5 mm

b] Agregat kasar (*coarse aggregate*) diameter > 5 mm, biasanya berukuran antara 5 hingga 40 mm, disebut kerikil.

2) Visual Bentuk

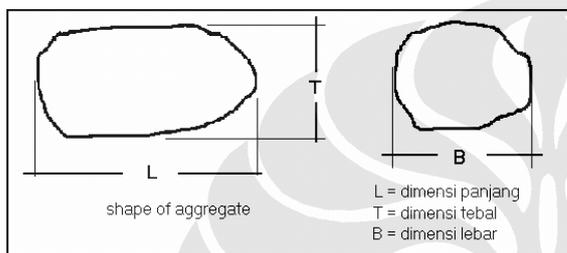
Oleh karena bentuknya yang bervariasi, agregat diklasifikasikan bentuk menjadi bulat, lonjong, pipih atau kubikal. Bentuk yang paling baik dalam pembuatan beton adalah kubikal, karena bentuk ini memiliki kekuatan yang lebih besar dari bentuk yang pipih dan akan saling mengunci antar agregat (*interlocking*). Namun bentuk kubikal akan mempersulit pekerjaan, karena kemampuan mengalir (*flowability*) yang rendah.

3) Visual Tekstur Permukaan

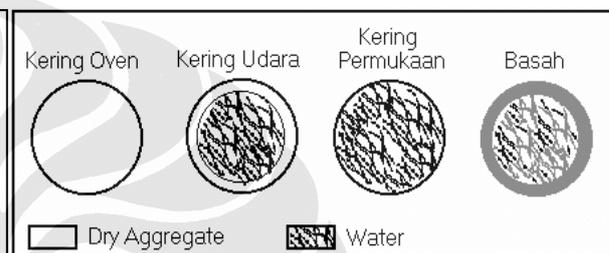
Secara visual dapat dibedakan menjadi kasar, halus, rata atau bergelombang. Tekstur yang kasar akan memberikan pengikatan yang lebih baik oleh semen, hal ini disebabkan karena luas permukaan yang lebih besar pada agregat bertekstur kasar

4) Berat Jenis dan Absorpsi

Berat jenis dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan kondisinya. Kondisi tersebut adalah kering oven (*oven dry*), kering permukaan (*saturated surface dry*), kering udara dan kondisi basah. Biasanya pada pekerjaan beton digunakan kondisi kering permukaan karena pada saat pencampuran pasta semen akan diserap masuk oleh permukaan agregat, namun karena bagian dalam agregat terisi air maka penyerapan air tidak berlebihan. Hal ini akan memperkuat ikatan antar agregat.



Gambar 2.1 Shape of Agregat²⁾



Gambar 2.2 Kadar Air pada Agregat²⁾

2.1.3.2 Material Pengikat (Semen)

Material pengikat yang sering digunakan pada beton konstruksi secara umum adalah semen. Namun tidak menuntut kemungkinan adanya penggunaan material pengikat lain selain semen.

Semen ini dibuat dengan menghaluskan kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan dicampur bahan gips. Pembakaran pada tungku dapat mencapai 6000° C dan menghasilkan CO₂ sebagai hasil samping pembakaran.

Semen adalah bahan hidrolis yang dapat bereaksi secara kimia dengan air, reaksi yang terjadi adalah reaksi hidrasi sehingga menghasilkan material batu padat. Pada umumnya semen yang digunakan adalah tipe semen portland. Ketika semen bercampur dengan air, semen portland berubah menjadi agen pengikat, dimana komponen silika dan alumina pada semen membentuk produk hasil hidrasi yang seiring dengan waktu mengeras membentuk benda padatan.

2.1.3.3 Air

Proporsi air yang sedikit pada beton akan memberikan kekuatan yang tinggi pada beton, sebaliknya kadar air yang berlebihan akan mengurangi kekuatan beton. Namun faktor kadar air akan sangat berpengaruh dalam

kemudahan pekerjaan beton. Semakin encer beton akan semakin mudah dikerjakan, dan sebaliknya semakin sedikit kadar air maka beton akan semakin sukar dikerjakan. Sifat ini digambarkan oleh workabilitas.

Proporsi air dinyatakan dalam *rasio air-semen (water-cement ratio)*, yaitu angka yang menyatakan perbandingan antara berat air (kg) dibagi berat semen (kg) dalam campuran beton.

Kualitas air yang digunakan juga harus baik, yaitu terlepas dari kadar garam yang tinggi, dan material organik yang dapat merusak beton seperti alkali. Dalam beton air berfungsi sebagai campuran untuk membuat bahan pengikat, yaitu melalui bereaksi dengan semen.

2.2 BETON GEOPOLIMER

2.2.1 Pendahuluan

Dilihat dari material penyusun beton, maka sangatlah mungkin untuk mencari variasi bahan matriks yang dapat menggantikan penggunaan semen sebagai bahan matriks beton konvensional. Hal ini bertujuan untuk memenuhi isu lingkungan yaitu mengurangi produksi CO₂ sebagai hasil samping produksi semen portland. Selain itu, diharapkan akan dapat ditemukan beton baru yang memiliki karakteristik lebih baik dari beton yang telah ada.

Bahan matriks yang akan dibuat pada penelitian ini adalah geopolimer, yang selama 30 tahun terakhir telah banyak dilakukan penelitian. Bahan geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Davidovits. Karakteristik dari beton geopolimer bermacam-macam tergantung dari bahan pembentuk geopolimernya, diantaranya : *fly ash, blast furnace slag, pozzolan* dan lainnya.

Dari beberapa penelitian terakhir, beton geopolimer memberikan performa luar biasa pada waktu ikat, susut, rangkai dan ketahanan bahan korosif. Beton geopolimer tertentu dapat mencapai kekuatan hingga 100 MPa, dan dalam 4 jam dapat mencapai kekuatan 20 MPa³⁾.

Davidovits (1988) memperkenalkan istilah '*geopolymer*' pada tahun 1978 sebagai gambaran bahwa mineral polymer tersebut adalah hasil ilmu geokimia. Geopolimer, suatu polimer alumina-silika anorganik, dibentuk dari sebagian besar unsur silikon (Si) dan aluminium (Al). Komposisi kimia dari material geopolymer

adalah serupa dengan zeolit, tetapi geopolimer memiliki *amorphous microstructure*⁴⁾. Sepanjang proses sintesis, silika dan aluminium digabung untuk membentuk blok bangunan, yang secara kimiawi dan struktural dapat dibandingkan dengan ikatan batu alam.

Banyak literatur tersedia tentang material ini sehubungan dengan pasta geopolimer. Davidovits dan Sawyer (1985) menggunakan *ground blast furnace slag* untuk menghasilkan produk geopolimer. Mereka mematenkan produk mereka dengan didokumentasikan ke dalam jurnal ilmiah di AS dengan judul “*Early High-Strength Mineral Polymer Was Used As A Supplementary Cementing Material In The Production Of Precast Concrete Products*”. Sebagai tambahan suatu mortar semen siap pakai, dimana hanya perlu tambahan campuran air untuk menghasilkan material yang tahan lama dan cepat mengeras, telah diproduksi dan dimanfaatkan pada renovasi airport baik untuk landasan pacu, landasan hubung, dan apron, pada pembangunan jalan raya dan geladak jembatan, dan untuk beberapa konstruksi ketika kekuatan awal beton yang besar sangat diperlukan.

Geopolimer telah digunakan pula untuk menggantikan polimer organik sebagai suatu zat adhesive untuk memperkuat struktur. Geopolimer ditemukan untuk menjadi material tahan api dan bersifat awet tahan lama di bawah sinar UV⁵⁾.

Van Jaarsveld, van Deventer, dan Schartzman (1999) melakukan eksperimen tentang geopolimers menggunakan dua jenis *fly ash*. Mereka menemukan bahwa kuat tekan geopolimer setelah 14 hari adalah sekitar 5 - 51 MPa. Faktor yang mempengaruhi kuat tekan itu adalah saat proses pencampuran bahan dan komposisi kimia dari *fly ash*. Senyawa CaO yang lebih tinggi akan mengurangi porositas dari mikro-struktur, dan meningkatkan kuat tekan. Di samping itu, rasio perbandingan air : *fly ash* juga mempengaruhi kekuatan material. Jika rasio air : *fly ash* lebih sedikit, hal ini akan meningkatkan kekuatan tekan dari material.

Palomo, Grutzeck, dan Blanco (1999) mempelajari pengaruh temperatur, waktu dan rasio larutan alkali *fly ash* pada kekuatan tekan material geopolimer. Dilaporkan bahwa faktor temperatur dan waktu perawatan mempengaruhi kekuatan tekan material geopolimer tersebut. Penggunaan larutan natrium

hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat (Na_2Si_3) merupakan solusi dalam menghasilkan kekuatan tekan yang paling tinggi. Kuat tekan dapat mencapai hingga 60 MPa jika di-*curing* pada suhu 85°C selama 5 jam.

Xu dan van Deventer (2000) meneliti proses geopolimerisasi dari 15 unsur alami Al-Si. Telah ditemukan bahwa mineral dengan tingkat disolusi yang tinggi akan menghasilkan kuat tekan lebih baik setelah proses polimerisasi. Persentase dari kalsium dioksida (CaO), kalium dioksida (K_2O), rasio molaritas Si-Al pada *fly ash*, jenis larutan alkali dan rasio molaritas Si/Al di dalam larutan alkali selama proses disolusi merupakan faktor – faktor penting yang mempengaruhi kuat tekan dari material geopolimer.

Swanepoel dan Strydom (2002) melakukan suatu penelitian tentang geopolimer yang diproduksi dengan pencampuran *fly ash*, kaolin, larutan natrium silikat, NaOH dan air. Kedua faktor waktu dan temperatur masa curing mempengaruhi kuat tekan tersebut, dan kekuatan optimum terjadi ketika material di-*curing* pada suhu 60°C selama 48 jam.

Van Jaarsveld, van Deventer dan Lukey (2002) mempelajari hubungan timbal balik dari berbagai parameter yang mempengaruhi kekuatan material geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Mereka melaporkan bahwa properti material geopolimer dipengaruhi oleh proses disolusi yang tidak sempurna. Jumlah air, waktu dan temperatur masa *curing* mempengaruhi properti material geopolimer, khususnya faktor temperatur saat di-*curing* mempengaruhi kuat tekan material tersebut. Ketika benda uji di-*curing* pada suhu 70°C selama 24 jam, terjadi suatu peningkatan kuat tekan. *Curing* untuk suatu periode yang lebih lama justru mengurangi kuat tekan material.

Palomo et. al (2004) menyelidiki karakteristik mekanis dari beton geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Ditemukan bahwa karakteristik material kebanyakan ditentukan oleh metode *curing*, terutama faktor waktu dan temperature masa *curing*.

2.2.2 Karakteristik

Beton geopolimer adalah beton yang terbuat dari material geopolimer sebagai matriks dan mineral agregat sebagai inklusi. Seperti halnya beton semen portland pada umumnya, penggunaan agregat 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 dapat digunakan juga material pengisi (*filler*) yang berukuran mikron seperti *fly ash*. Dengan terisinya pori-pori pada beton, maka kemungkinan rangkai dapat dikurangi.

2.2.2.1 Ikatan Matriks-Inklusi

Beton adalah material yang disusun dari matriks dan inklusi. Bahan matriks berfungsi sebagai *adhesive* bagi material inklusi, sehingga membentuk ikatan antara agregat kasar dengan pasta matriks. Ikatan yang terjadi antara matriks dan inklusi dapat bersifat mekanis ataupun kimia.

1) Ikatan Mekanis

Pada beton semen, pasta semen bercampur dengan pasir membentuk mortar. Mortar inilah yang mengisi void antar agregat kasar sembari menyelimutinya. Agregat kasar yang baik digunakan untuk beton adalah yang memiliki permukaan kasar dan bentuk kubikal, agregat yang seperti ini akan saling mengunci (*interlocking*) sehingga menyusun kekuatan yang lebih besar.

Pada beton dengan gradasi agregat yang baik, terdapat keseimbangan antar jumlah agregat halus dengan agregat kasar. Namun bagaimanapun juga, keseimbangan tersebut bergantung pada beberapa faktor, seperti ukuran maksimum partikel, bentuk partikel, kandungan semen, metode pemadatan dan kehalusan dari pasir.

Dalam rangka membuat pendekatan secara numerik, sebuah analisa sederhana tentang struktur internal makro beton keras dibuat dengan melakukan pengamatan terhadap ikatan (*intercepts*) antara lapisan mortar dengan agregat kasar. Semakin besar gradasi rataaan agregat, semakin kecil ikatan yang terjadi, tergantung pada tebal selimut mortar yang menyelimuti partikel agregat.

Ikatan mortar (*mortars intercepts*) dapat diukur dengan metode *linear traverse*, yaitu serupa dengan prosedur yang digunakan dalam petrograph sebagaimana dijelaskan dalam ASTM C 457-71 (untuk determinasi kandungan udara pada beton keras). Prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Sebuah potongan dibuat secara acak pada beton
2. Alat ukur panjang diletakkan secara acak pada permukaan potongan
3. Ikatan linier (*linear intercepts*) diukur dengan menggunakan alat ukur (mengikuti mortar yang menyelimuti agregat)
4. Pengukuran ini dijumlahkan dan dibuat rataaan.
5. Angka rataaan tersebut dinamakan ikatan mortar rata-rata (*average mortar intercepts*)

Berdasarkan pada hasil pengujian di dapat beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Ikatan mortar rata-rata minimum pada beton umum (beton dengan agregat kasar dan halus yang bergradasi kontinu dan dengan kandungan semen menengah) adalah 3.5 mm.
2. Kriteria ini dianggap valid, bukan hanya untuk beton dengan batu pecah, tapi juga untuk agregat alami. Lebih lanjut kriteria ini tampaknya bersifat independen terhadap bentuk partikel agregat.

Ikatan mekanis yang terjadi pada struktur internal beton semen dapat pula terjadi pada beton geopolimer, mengingat material geopolimer bersifat *adhesive*. Ikatan yang dihasilkan oleh geopolimer akan sangat berpengaruh pada kekuatan beton.

Beberapa parameter yang berkaitan dengan penyusunan kekuatan mekanik beton geopolimer adalah sebagai berikut :

- Kemampuan geopolimer mengikat agregat kasar.
- Kemampuan geopolimer memasuki void antar agregat dan membuat selimut agregat (*interception ability*).

- Kemampuan geopolimer (*inner strength*) dalam menahan tekanan dan tarikan/lentur.

2) Ikatan Kimia

Pada beton semen, walaupun mineral agregat bersifat tidak reaktif (*inert*), terkadang terdapat kandungan substansi yang berbahaya bagi beton apabila hadir dalam kadar yang berlebihan. Substansi tersebut dinamakan material perusak (*deleterious material*).

Material perusak sering muncul pada partikel yang lebih kecil dari saringan No. 200. Kandungan maksimum yang diperbolehkan tergantung pada tujuan penggunaan beton, komposisi perusak, dan tergantung pada kehadiran pengganggu apakah terdispersi dalam agregat (sebagai gumpalan atau menyelimuti agregat). Pada beton semen, salah satu reaksi kimia yang timbul adalah antara material perusak (yang terdapat pada agregat) dengan alkali semen portland dalam kelembaban tertentu. Reaksi seperti ini dapat menyebabkan keretakan (*cracking*) pada beton melalui ekspansi yang berlebihan. Retak ini disebabkan oleh pengembangan atau ekspansi gel yang mengandung sodium dan potassium silika. Ekspansi yang dihasilkan pada beton dapat melebihi 0.5 % dan retak dapat selebar 25 mm. Kasus yang sering terjadi adalah reaksi alkali-silika, ketika semen bereaksi dengan partikel bersilika.

Ekspansi ini dapat dicegah atau dikurangi dengan beberapa cara. Misalnya dengan menggunakan semen dengan kandungan alkali rendah, atau dengan menggantikan sejumlah semen dengan pozolan. Secara umum, reaksi kimia perusak (*deleterious chemical reaction*) yang terjadi adalah antara alkali semen.

Pada beton geopolimer, reaksi polimerisasi adalah polikondensasi membentuk aluminosilikat. Apabila dibandingkan dengan reaksi perusak di atas, maka proses polimerisasi geopolimer memiliki kemiripan, dimana sejumlah Si dan Al terdisolusi dengan alkali aktivator membentuk monomer-monomer. Monomer-monomer tadi akan terkondensasi membentuk jaringan tetrahedral -Si-O-Al-O-Si- dan -Si-O-Si-.

Oleh sebab mineral agregat bersifat tidak reaktif, maka dapat dibuat hipotesa bahwa antara polimer dengan agregat tidak akan terjadi reaksi kimia. Namun, apabila terdapat kandungan material perusak pada agregat, maka akan ada kemungkinan terjadi disolusi material perusak oleh alkali-aktivator, karena kandungannya yang terdiri dari lempung (*clay consist of metakaolin*). Karena jumlahnya yang sedikit, maka reaksi tersebut tidak akan mengganggu bahkan sebaliknya dapat menambah ikatan polimer selain dari monomer prekursor *fly ash*.

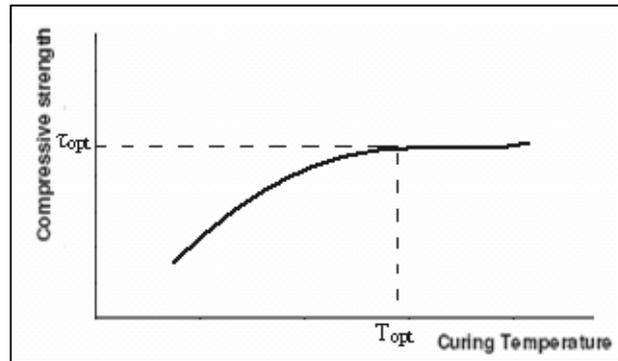
2.2.2.2 Kekuatan Mekanis

Kekuatan mekanis yang akan dibahas pada penelitian ini adalah kuat tekan dan kuat tarik. Kekuatan mekanis tersebut disusun oleh material geopolimer dan mineral agregat. Beberapa hal yang mempengaruhi kekuatan beton keras diantaranya : kekuatan agregat, kekuatan geopolimer, susunan agregat, serta ikatan geopolimer dengan agregat.

Faktor penting yang mempengaruhi kekuatan mekanis beton geopolimer diantaranya suhu ikat, waktu ikat, tipe alkali aktivator, kadar air dan jumlah relatif Si, Al, dan Na.

1) Suhu Ikat dan Waktu Ikat

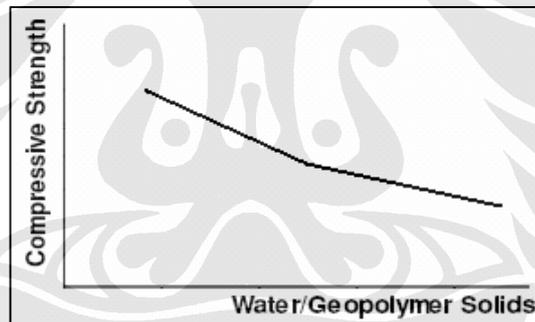
Semakin lama waktu ikat dan semakin tinggi suhu ikat akan memperkuat kuat tekan dari beton, walaupun pada beberapa penelitian kenaikan kuat tekan tidak signifikan untuk suhu ikat diatas 60°C dan waktu ikat lebih dari 48 jam. Kuat tekan geopolimer berbahan dasar *fly ash* yang diperkeras pada suhu 60°C dan waktu ikat 24 jam adalah sekitar 60 Mpa⁶⁾.



Gambar 2.3 Pengaruh Suhu Ikut Terhadap Kuat Tekan²⁾

2) Kadar Air

Beberapa eksperimen mengenai geopolimer berbahan dasar *fly ash* menemukan bahwa rasio molar H_2O dengan Na_2O pada campuran adalah parameter signifikan yang mempengaruhi kuat tekan beton. Kenaikan rasio molar H_2O/Na_2O menyebabkan turunnya kuat tekan. Namun sama halnya dengan beton semen, kondisi ini memberikan workabilitas yang baik. Sebagai catatan, total kandungan air dalam beton geopolimer adalah massa air yang terkandung pada larutan alkali-aktivator (sodium silikat dan sodium hidroksida) ditambah dengan massa air ekstra.



Gambar 2.4 Pengaruh Kadar Air Terhadap Kuat Tekan²⁾

3) Jumlah Si, Al, dan Na

Jumlah Si, Al dan Na dalam hal ini berpengaruh pada jumlah dan kerapatan monomer yang terkondensasi. Semakin rapat monomer yang terbentuk, maka akan semakin padat beton geopolimer, sehingga meningkatkan kuat tekan.

4) Jenis alkali activator

Jenis alkali aktivator berpengaruh dalam proses disolusi, apabila tidak terdapat cukup grup OH maka tangan monomer berinti-Si akan sedikit, sehingga akan mengurangi kemungkinan terjadinya ikatan dengan anion Al.

2.2.2.3 Ketahanan Kimia

Beton semen memiliki sifat rapuh terhadap serangan kimia sebagaimana mineral agregat yang dikandungnya. Biasanya serangan yang terjadi adalah reaksi yang menyerang kalsium-hidroksida bebas pada beton selama fase hidrasi semen portland. Sebagai contoh, serangan oleh sulfat yang terkandung dalam air atau oleh gula. Asam akan merusak agregat dan juga pasta semen.

Berdasarkan penelitian tentang material geopolimer, disebutkan bahwa material tersebut memiliki karakteristik yang luar biasa terhadap ketahanan serangan asam. Hardjito Djiwantoro, dkk. (2004) melaporkan, geopolimer berbahan dasar *fly ash* menunjukkan ketahanan terhadap serangan sulfat setelah benda uji direndam dalam larutan sodium sulfat (Na_2SO_4) berkadar 5 % selama 12 minggu. Setelah diberi perlakuan tersebut, tercatat tidak terdapat perubahan yang signifikan pada kuat tekan, massa dan dimensi.

Beberapa peneliti lain menyebutkan bahwa geopolimer berbahan metakaolin tetap stabil dan tidak menunjukkan tanda-tanda pemburukan pada struktur mikro dan kekuatan, setelah direndam dalam air laut ASTM, sodium sulfat (4.4 % massa) dan larutan asam sulfur (0.001 M) dalam 9 bulan.

2.2.3 Material Penyusun

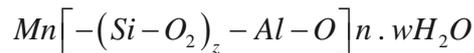
Material polimer anorganik alkali aluminosilikat dapat disintesis (dibuat) dari prekursor yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Prekursor adalah bahan utama dalam pembentuk polimer. Prekursor tersebut dapat berupa mineral alami ataupun limbah industri. Unsur – unsur kimia di dalam prekursor bila dicampur dengan larutan alkali sebagai aktivator, akan menghasilkan material pasta geopolimer dengan kekuatan mengikat seperti pasta semen. Prekursor dan aktivator akan bersintesa membentuk material padat melalui proses polimerisasi, dimana proses polimerisasinya yang terjadi adalah disolusi dan diikuti dengan proses polikondensasi.

Proses sintesis tersebut terbagi atas proses aktivasi bahan alumina-silika oleh ion alkali dan proses *curing* untuk mendorong terjadinya polimerisasi dari monomer alumina-silika menjadi struktur jaringan molekul tiga-dimensi. Kesempurnaan dari polimerisasi, 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 :



dimana :

- M : elemen alkali
- n : derajat polimerisasi
- z : 1, 2, dan 3
- : simbol ikatan

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 tidak reaktif (*inert*) pada beton semen. Selain memberikan ikatan, material polimer juga diharapkan memberikan sumbangan kekuatan pada beton.

Dalam penelitian ini akan dibuat geopolimer alkali aluminosilikat yang berasal dari prekursor yang mengandung alumina dan silika dengan aktivator larutan alkali-silikat.

2.2.3.1 Prekursor

Bahan mentah (*raw materials*) 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 silika dapat

digunakan sebagai prekursor. Limbah industri yang termasuk ke dalam klasifikasi ini diantaranya adalah *blast furnace slag*, abu terbang (*fly ash*), serbuk granit dan lumpur merah (*red mud*). Dalam penelitian ini akan digunakan abu terbang (*fly ash*) sebagai material prekursor. Dengan menggunakan proses rekayasa, bahan mentah aluminosilikat tersebut dapat disintesis menjadi geopolimer.

Aluminosilikat dalam bentuk butiran kaca (*metastable glassy form*) dapat bersifat sebagai pengikat ketika diaduk dengan aktivator, yang biasanya berupa larutan alkali-silikat. 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.

2.2.3.2 Aktivator

Sebagaimana telah dijelaskan di atas, aktivator dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. 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 sodium silikat (*waterglass*) adalah aktivator yang secara umum digunakan karena mudah didapat dan ekonomis. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan digunakan sodium silikat dan sodium hidroksida. Penambahan aktivator sodium hidroksida bertujuan untuk menambah ion Na^+ pada proses polimerisasi.

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

2.2.4 Proses Polimerisasi

Sintesa geopolimer aluminosilikat membutuhkan dua konstituen utama dalam reaksi pencampuran, yaitu: prekursor yang kaya akan kandungan Al dan Si dengan larutan alkali-silikat sebagai activator.

Geopolymer dapat berupa salah satu dari 3 bentuk formula di bawah ini³⁾:

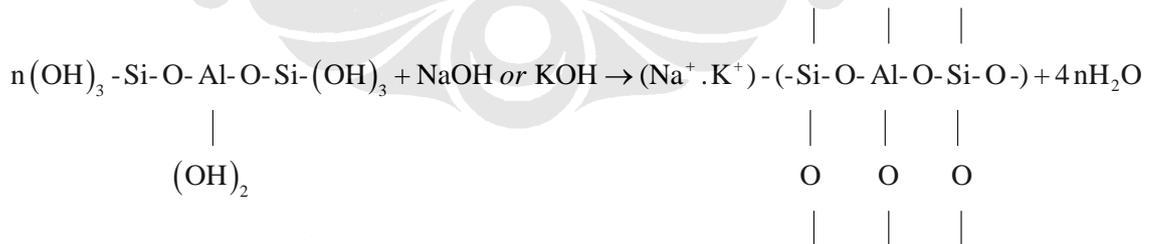
- Poly (sialate), formula monomer [-Si-O-Al-O-]
- Poly (sialate-siloxo), formula monomer [-Si-O-Al-O-Si-O-]
- Poly (sialate-disiloxo), formula monomer [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]
(*sialate = silicon-oxo-aluminate, siloxo = silicon-oxo*)

Reaksi kimia yang terjadi pada proses polimerisasi terbagi dalam 3 tahapan⁷⁾. Ketiga tahap di bawah ini dapat saling bergantian dan terjadi bersamaan, membuat ini menjadi sulit ditelaah secara terpisah⁸⁾. 3 tahap proses polimerisasi tersebut adalah :

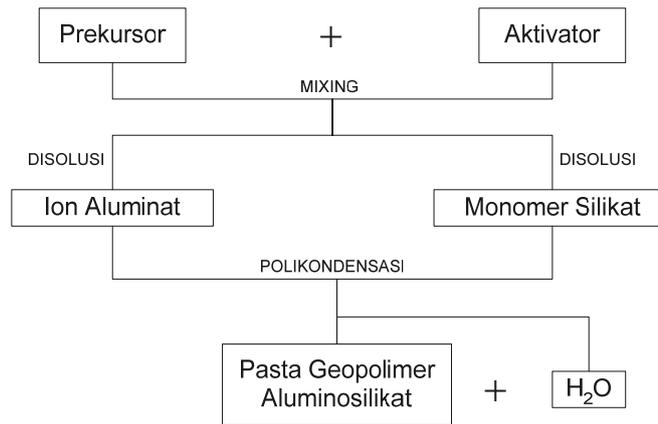
- (1) Disolusi atom Si dan Al dari sumber material prekursor disebabkan oleh ion hidroksida.
- (2) Penguraian ion prekursor menjadi monomer.



- (3) Polikondensasi dari monomer – monomer menjadi struktur polimer.



Sesuai dengan persamaan reaksi kimia (3), proses polimerisasi akan menghasilkan geopolimer dengan hasil samping H₂O.



2.3 PEMBEBANAN DINAMIK

2.3.1 Definisi

Sebuah struktur apabila diberi gaya percepatan akan memiliki respon dinamik, besar atau kecilnya respon tersebut tergantung pada percepatan yang diberikan, massa benda yang bergetar, maupun sifat kekakuannya. Pada penelitian ini, akan diuji suatu balok beton geopolimer dengan diberi gaya singkat, lalu dengan menggunakan alat pengukur percepatan akan dianalisa hasilnya dan akan didapat sifat-sifat dari struktur tersebut.

2.3.2 Aplikasi Pembebanan Dinamik pada Struktur

Rumus-rumus dan persamaan-persamaan yang digunakan akan dijabarkan disini.

Persamaan umum dari gerak untuk sistem satu derajat kebebasan :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

- Frekuensi alami dari sistem :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana : k = *Stiffeness* / Kekakuan.

m = Massa.

- *Damping ratio* :

$$\xi = \frac{c_v}{c_c} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

$$c_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana : c_v = konstanta *damping*.

c_c = *critical damping*.

- Periode dari getaran teredam :

$$T_d = \frac{1}{f_d} = \frac{2\pi}{\omega_d} \dots\dots\dots(2.5)$$

Untuk Underdamped system

$$c_v^2 - 4mk < 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

atau

$$\xi < 1 \text{ or } c_v < c_c \dots\dots\dots(2.7)$$

- Solusi dari *displacement* untuk sistem ini :

$$\begin{aligned} x(t) &= c_1 e^{(-\xi+i\sqrt{1-\xi^2})\omega_n t} + c_2 e^{(-\xi-i\sqrt{1-\xi^2})\omega_n t} \\ &= e^{-\xi\omega_n t} [d_1 \cos(\omega_d t) + d_2 \sin(\omega_d t)] \dots\dots\dots(2.8) \end{aligned}$$

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} [x_0 \cos(\omega_d t) + \frac{v_0 + \xi\omega_n x_0}{\omega_d} \sin(\omega_d t)] \dots\dots\dots(2.9)$$

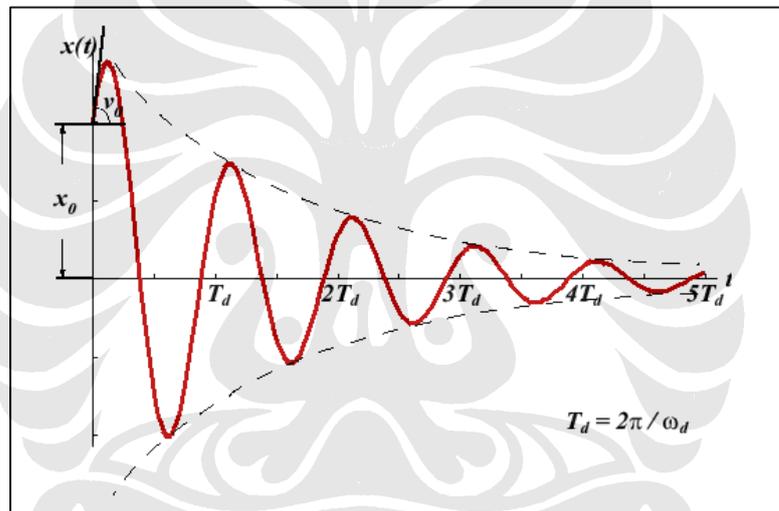
Persamaan (2.9) tersebut juga bisa dijabarkan sebagai berikut :

$$x(t) = A_0 e^{-\xi\omega_n t} \cos(\omega_d t - \varphi_0) \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana :

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \dots\dots\dots(2.11)$$

Gambar dibawah ini menggambarkan efek dari adanya redaman (damping) dari suatu getaran bebas, garis singgung dari titik-titik tertinggi (amplitudo) pada *displacement* tersebut merupakan persamaan dari x(t).



Gambar 2.5 Pengaruh Redaman⁹⁾

- Dari *Underdamped System*, *displacement solution* :

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[x_0 \cos(\omega_d t) + \frac{v_0 + \xi\omega_n x_0}{\omega_d} \sin(\omega_d t) \right] \dots\dots\dots(2.12)$$

- Dengan periode osilasi :

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Maka dengan memperbandingkan nilai titik-titik puncak dalam logaritma untuk mendapatkan δ , diperoleh :

$$\delta = \log \frac{e^{-\xi\omega_n t} [x_0 \cos(\omega_d t) + \frac{v_0 + \xi\omega_n x_n}{v_0} \sin(\omega_d t)]}{e^{-\xi\omega_n (t_n+T)} [x_0 \cos \omega_d (t_n + T) + \frac{v_0 + \xi\omega_n x_n}{v_0} \sin \omega_d (t_n + T)]} \dots\dots\dots(2.14)$$

Didapat :

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \dots\dots\dots(2.15)$$

Maka didapatkan persamaan untuk menghitung ζ dan ω , sehingga bisa didapatkan nilai kekakuan struktur tersebut :

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\omega_n = \frac{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}{T} \dots\dots\dots(2.17)$$

2.3.3 Alat Uji Pembebanan Dinamik

2.3.3.1 Akselerometer

Akselerometer adalah suatu alat *transducer* untuk mengukur percepatan gaya. Percepatan gaya ini bisa statis, seperti gaya konstan dari gravitasi, atau bisa juga dinamis yaitu yang disebabkan oleh gerakan atau getaran dari akselerometer tersebut. Fungsi dari akselerometer sendiri, khususnya pada percobaan ini adalah kita bisa menganalisis gerakan (percepatan) dari suatu struktur yang akan diuji. Secara komersial, telah banyak dibuat akselerometer dengan menggunakan bahan-bahan seperti *piezoelectric* atau *piezoresistive*.

Bahan *Piezoelectric*, yaitu dengan melakukan perubahan pada kapasitansi. Dengan terdapat 2 *microstructures* yang berdekatan dan bersebelahan, mereka akan memiliki sifat kapasitansi diantara mereka. Jika salah satu *microstructure* digerakan dengan percepatan gaya, sementara yang satu diam, maka kapasitansinya akan berubah. Dengan menggunakan suatu *circuit* untuk mengubah dari kapasitansi ke voltase, maka kita bisa mendapatkan akselerometer. Ada juga yang menggunakan *microscopic crystal structures* yang akan tertekan dengan gaya akselerasi, yang mengakibatkan voltase.

2.3.3.2 Pile Integrity Test (*PIT^m Collector*)

Alat pengambil data model *Pile Integrity Tester* adalah alat untuk menganalisa tiang pancang dengan menggunakan tegangan kecil pada permukaan yang dihasilkan dari metode pukulan (*impact method*). Alat ini mudah dioperasikan oleh satu orang dan dengan software PIT dapat diperoleh hasil data dengan langsung. Namun, diharapkan Insinyur yang melakukan test harus memiliki kemampuan yang sangat baik dalam memahami data yang berhubungan dengan teori perambatan gelombang dan bagaimana sifat dari gelombang tersebut dalam melakukan perambatannya, hal ini berkaitan agar data yang dihasilkan dapat dianalisa dengan tepat sesuai pada kondisi di lapangan yang sebenarnya.

Prosesnya adalah gaya yang kecil (*impact*) diberikan pada permukaan atas benda uji, biasanya digunakan palu tangan (*hand-held hammer*) yang khusus, lalu terbentuk gelombang dari tempat *impact* menyebar ke bawah dari benda uji. Refleksi yang dihasilkan dipengaruhi dari bentuk dan kualitas dari material yang digunakan, dimana hal ini diamati berdasarkan saat gelombang tersebut telah kembali ke permukaan. Getaran pada permukaan terekam hingga semua refleksi utama dapat kembali ke permukaan.

Bagian terdalam yang memberi refleksi adalah bagian ujung bawah dari benda uji. Waktu yang diperlukan untuk mencapainya bisa dilihat pada persamaan (2.18), dapat diketahui apabila kita mengetahui cepat rambat gelombang dalam benda padat tersebut (C) dan panjang ke bawah dari benda uji (L).

$$t = \frac{2.L}{C} \dots\dots\dots(2.18)$$

Sementara pada hammer terdapat juga akselerometer yang berfungsi untuk merekam besarnya gaya (*impact*) yang dihasilkan, dengan mengalikan akselerasi hammer dengan massa dari hammer tersebut.

2.3.3.3 *Software Microsoft Excel dan Matlab*

Software Microsoft Excel bermanfaat saat memindahkan data dari *PIT*, yang selanjutnya sebagai sumber pembacaan data untuk program *Matlab*. Pada program *Matlab*, data akselerasi yang diperoleh saat percobaan di integrasi untuk mendapatkan *velocity*, *displacement* dan merubah dari *time domain* ke *frequency domain*. Data-data tersebut dilakukan sebagai data pembanding dari yang dihasilkan oleh *software PIT*. Data yang bisa dibandingkan adalah *velocity* dan *frequency domain*. *Displacement* yang berfungsi untuk mencari kekakuan tidak didapatkan langsung dari data pada *PIT*, sehingga diperlukan integrasi dari data *velocity*.

