

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. BETON

Beton merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan dalam dunia konstruksi sekarang ini. Beton secara umum terdiri dari dua bagian utama. Bahan pertama adalah bahan matriks yang berfungsi sebagai pengikat antar material (*adhesive*) namun matriks juga memberikan sumbangan kekuatan. Karena apabila campuran bahan ini tidak terdapat dalam kandungan beton maka beton tersebut tidak akan memiliki kekuatan sama sekali. Bagian yang kedua adalah bahan inklusi. Bahan inklusi merupakan agregat yang digunakan dalam beton baik agregat kasar berupa batu-batuan pecah dan juga agregat halus berupa pasir.

2.1.1. Material Penyusun Beton

Material penyusun beton secara umum terdiri dari dua bagian, yaitu matriks dan inklusi. Beton yang sering digunakan di proyek konstruksi terdiri dari pasta semen sebagai pengikat dan agregat sebagai inklusi. Namun, seiring dengan perkembangan perkembangan teknologi, bagian matriks dan inklusi dapat dibuat bervariasi.

2.1.1.1. 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 hidrolik 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: \emptyset 0 – 1 mm

§ Pasir kasar: \emptyset 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.

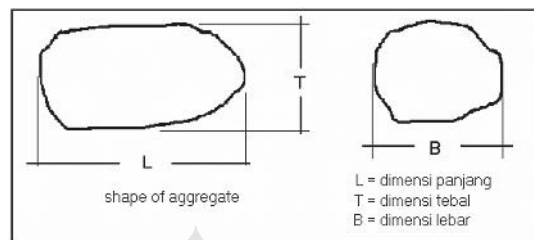
(3) Visual Tekstur Permukaan

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

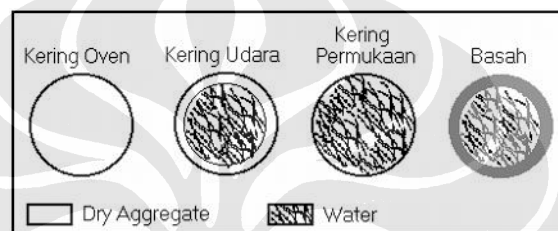
(4) Berat Jenis dan Absorpsi

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 Agregate^[1]



Gambar 2.2 Kadar Air pada Agregat^[1]

2.1.1.2. 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.

2.1.1.3. 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.

2.1.2. Karakteristik Beton

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

Beton dapat menahan kuat tekan hingga 80 Mpa, namun pada umumnya kuat tekan beton berkisar antara 40 Mpa. Besarnya kuat tekan beton bergantung pada komposisi material penyusunnya, jumlah kadar air serta kualitas pematannya.

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.

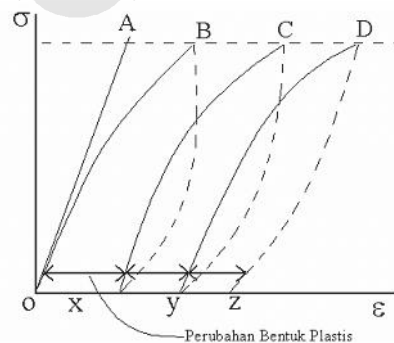
- (3) *Kualitas dari perawatan (curing)*. Kehilangan sampai 40 % dapat terjadi bila pengeringan dilakukan sebelum waktunya.
- (4) *Suhu ikat*. Pada umumnya kecepatan pengerasan beton bertambah dengan bertambahnya suhu. Pada titik beku (0° C) kuat tekan akan tetap rendah pada waktu yang lama.
- (5) *Umur*. 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 sesudahnya^[2]. 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.

2.1.2.3. Regangan

Bila beton dibebani, perubahan bentuk sering terjadi dan bertambah sesuai dengan pertambahan beban. Beton berubah bentuk sebagian mengikuti regangan elastis dan sebagian mengalami regangan plastis atau rangkak (*creep*). Sebagaimana digambarkan berikut:

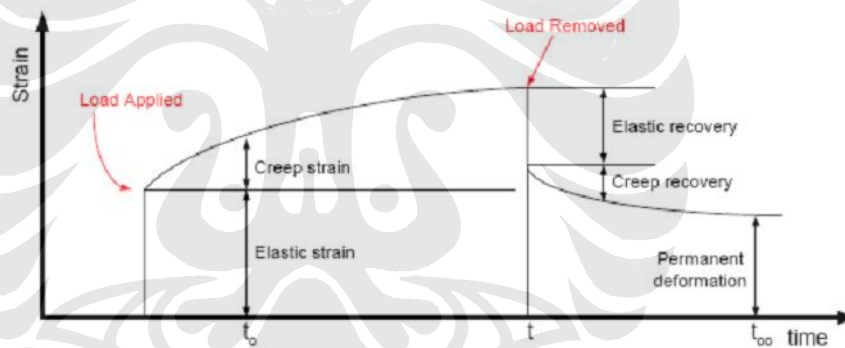


Gambar 2.3. *Stress – Strain Curve*

Pada bahan beton, kurva ditunjukkan oleh kurva OB. Pada waktu beban ditiadakan suatu benda uji beton telah ditekan sampai titik B, kemudian regangan elastis menghilang, tetapi regangan plastis tetap dan diperlihatkan oleh OX. Pengaruh dari beban yang berulang-ulang diperlihatkan juga dimana perubahan bentuk akibat regangan plastis XY, YZ yang berkurang pada tiap pengulangan beban, meskipun jumlah perubahan bentuk atau rayapan OX, OY, OZ akan terus menerus bertambah.

2.1.2.4. Rangkak (Creep)

Rangkak adalah perubahan bentuk yang non-elastis dibawah suatu pembebanan tetap dalam waktu tertentu. Rangkak diduga disebabkan oleh penutupan pori-pori dalam, aliran dari pasta semen, pergerakan kristal di dalam agregat, dan terjadinya penekanan air dari gel semen karena adanya tekanan.



Gambar 2.4. Elastic and Creep Strain

2.1.2.5. Susut (Shrinkage)

Penyusutan pada beton adalah variasi volume akibat faktor struktur beton maupun lingkungan seperti suhu. Terdapat bermacam susut yang terjadi pada beton, diantaranya : *Autogenous Shrinkage* (akibat reaksi kimia semen pada beton), *Drying Shrinkage* (akibat penguapan air pada saat reaksi hidrolisis berlangsung cepat), dan *Thermal Shrinkage* (akibat perubahan suhu lingkungan).

Penyusutan yang berlebihan dapat menyebabkan retak pada beton. Retak-retak rambut pada beton akan menjadi celah bagi zat luar untuk masuk. Hal ini menyebabkan korosi pada tulangan logam yang terkena proses oksidasi.

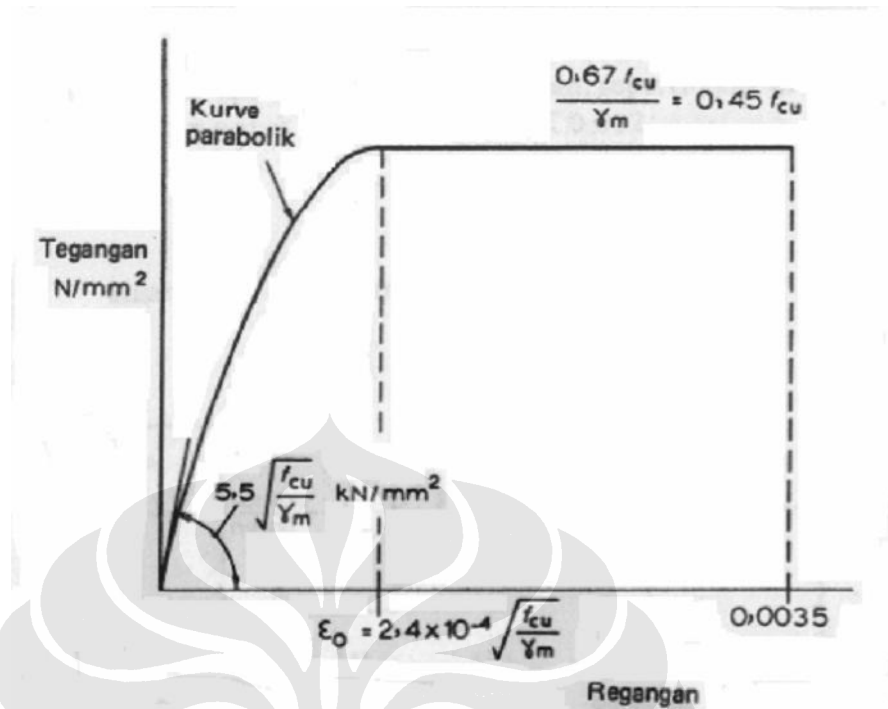
2.1.3. Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Untuk mengetahui besarnya kekuatan beton, maka perlu dilakukan pengujian laboratorium kuat tekan beton. Pengujian kuat tekan beton pada laboratorium dapat menggunakan sample berupa sample silinder atau sample kubus. Dari hasil percobaan tersebut maka kita bisa membuat kurva tegangan-regangan beton.

Kelakuan dari beton struktural dapat diwakili oleh hubungan tegangan-regangan parabolik sampai ke sebuah regangan e_o , dari titik mana regangan meningkat sedangkan tegangan tetap konstan. Regangan e_o dispesifikasikan sebagai suatu fungsi dari kekuatan karakteristik beton (f_{cu}), begitu pula dengan modulus tangens pada permulaan. Tegangan rencana ultimit dapat ditentukan dengan persamaan

$$\frac{0,67 f_{cu}}{\gamma_m} = \frac{0,67 f_{cu}}{1,5} = 0,45 f_{cu} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana faktor sebesar 0,67 menyesuaikan perbedaan antara kekuatan lentur dan kekuatan hancur kubus dari beton, dan $\gamma_m=1,5$ adalah faktor keamanan parsial yang biasa untuk kekuatan beton apabila merencanakan bagian konstruksi yang dicor setempat. Regangan ultimit sebesar 0,0035 adalah standar untuk semua mutu beton.



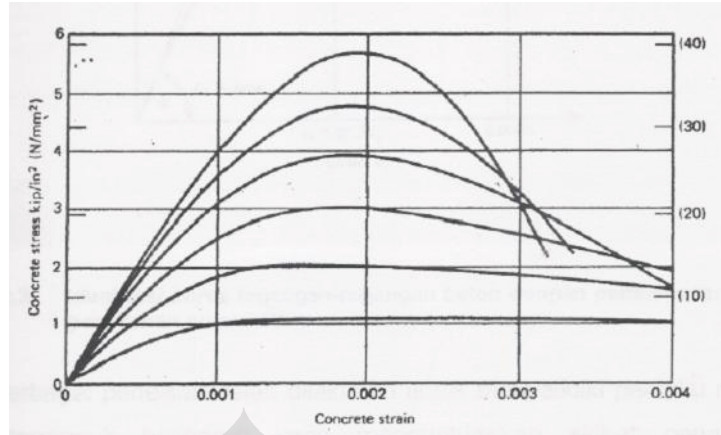
Gambar 2.5. Kurva tegangan-regangan rencana jangka pendek beton

Modulus elastisitas beton E_C dirumuskan sebagai berikut :

$$E_c = w^{1.5} 33 \sqrt{f_c'} \dots\dots\dots(2.2)$$

- Dimana :
- w = Berat jenis beton (lb/ft³)
 - f_c' = Kuat tekan silinder beton (psi)
 - 1 lb/ft³ = 16,02 kg/m³
 - 1 psi = 0,00689 N/mm²

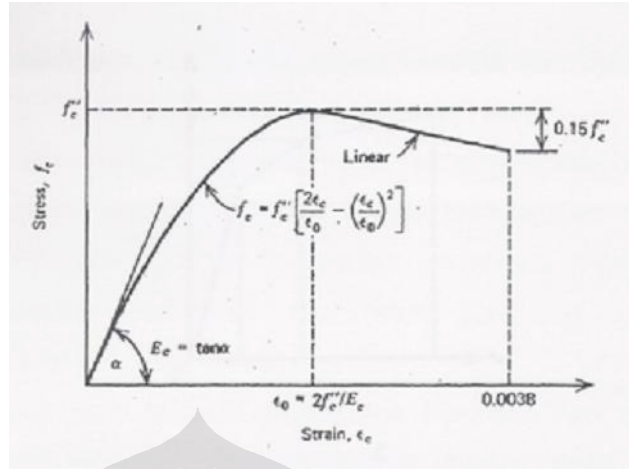
Persamaan 2.2 berlaku untuk nilai w antara 90 dan 155 lb/ft³. Untuk beton dengan berat normal, E_c umumnya bernilai $57000vf_c'$ psi atau sama dengan $4730vf_c'$ N/mm².



Gambar 2.6. Kurva tegangan-regangan silinder beton dengan pembebanan berupa penekanan uniaxial.

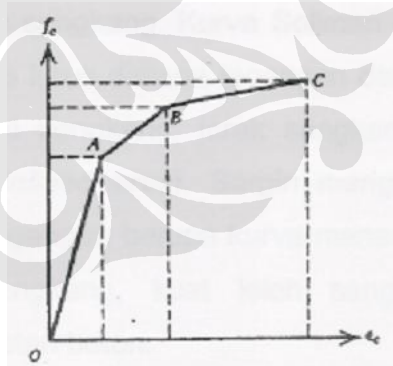
Pada gambar 2.6 diperlihatkan kurva tegangan-regangan berbentuk parabola untuk silinder beton yang diberi pembebanan berupa penekanan satu arah (unaxial) selama beberapa menit. Kurva yang hampir linier terbentuk hingga tegangan beton mencapai setengah dari maksimumnya. Pada beton mutu tinggi, puncak kurva yang terbentuk relatif lebih tajam, sedangkan pada beton mutu rendah puncak kurva yang terbentuk lebih datar. Nilai regangan yang berkorelasi dengan tegangan maksimum diperkirakan sebesar 0,002. Pada regangan yang lebih besar tegangan masih dapat ditahan walaupun retak paralel pada arah pembebanan mulai tampak pada beton.

Sebelum mencapai tegangan maksimum, bentuk kurva tegangan-regangan tergantung dari kuat tekan beton. Kurva yang umum digunakan berbentuk parabola berderajat dua. Kurva tersebut merupakan kurva tegangan-regangan oleh Hognestad. Kurva diperlihatkan pada gambar 2.7 dimana f_c'' adalah tegangan maksimum beton.



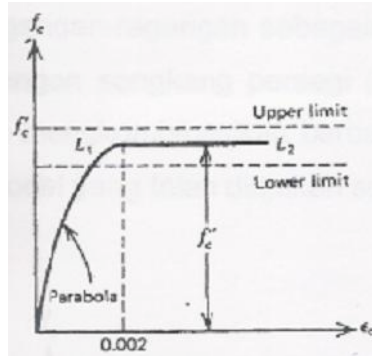
Gambar 2.7. Idealisasi kurva tegangan-regangan beton dengan pembebanan berupa penekanan uniaxial.

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, terdapat pula beberapa model kurva hubungan tegangan-regangan lainnya. Kurva Chan (gambar 2.8) menjelaskan garis OAB adalah kurva untuk beton tanpa sengkang dan garis BC merupakan kurva yang bergantung pada karakteristik sengkang. Kurva yang hampir sama dengan Kurva Chan adalah Kurva Blume. Dimana garis OA merupakan kurva untuk beton tanpa sengkang hingga mencapai $0,85f'_c$ dan garis ABC tergantung pada mutu dan tegangan leleh sengkang.



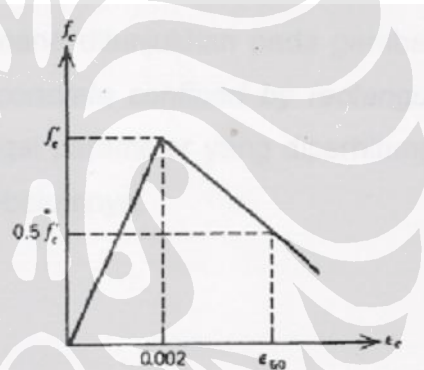
Gambar 2.8. Kurva tegangan-regangan Chan dan Blume

Kurva Baker berbentuk parabola hingga mencapai tegangan maksimum. Bagian dari kurva ini tergantung pada gradien regangan penampang. Kemudian kurva dilanjutkan dengan garis horizontal yang juga tergantung pada gradien regangan dan mutu sengkang.



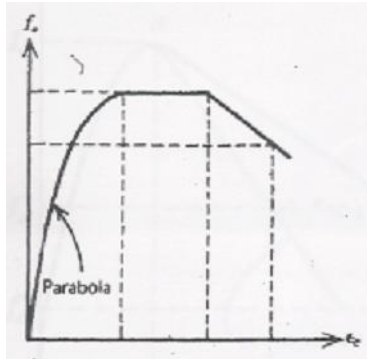
Gambar 2.9 Kurva tegangan-regangan Baker

Kurva Roy dan Sozen sedikit berbeda dengan Kurva Baker. Dimana Roy dan Sozen menyarankan untuk mengganti bagian kurva yang menurun dengan garis lurus hingga mencapai regangan tertentu pada tegangan $0,5 f'_c$, secara linear dipengaruhi oleh mutu sengkang.



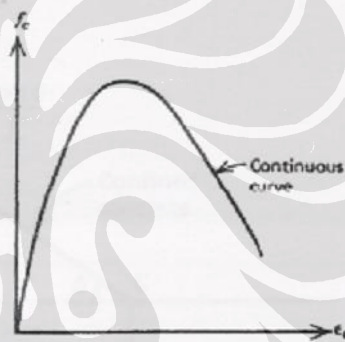
Gambar 2.10. Kurva tegangan-regangan Roy dan Sozen

Kurva Soliman dan Yu terdiri dari sebuah parabola dan dua garis lurus dimana tegangan dan regangan pada titik kritis dipengaruhi oleh mutu sengkang, jarak sengkang dan luas daerah yang ditahan sengkang.



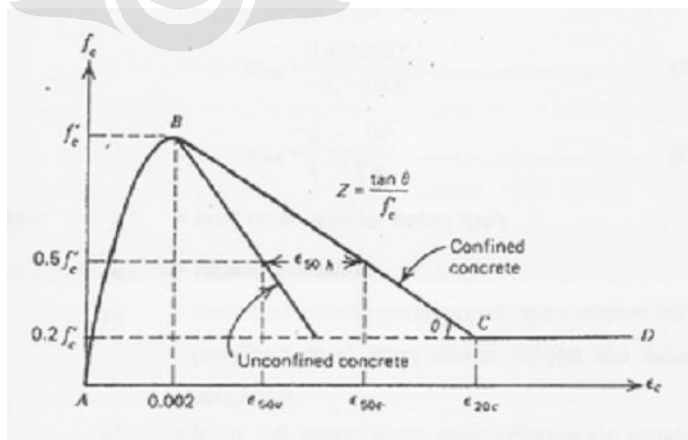
Gambar 2.11. Kurva tegangan-regangan Soliman dan Yu

Kurva Sargin menunjukkan persamaan umum hubungan tegangan-regangan berupa kurva menerus, dipengaruhi oleh mutu baja, jarak antar sengkang, kuat leleh sengkang, gradien regangan penampang dan kekuatan beton.



Gambar 2.12. Kurva tegangan-regangan Sargin

Kurva Kent dan Park merupakan kurva yang mengkombinasikan beberapa parameter yang diperhitungkan dalam model-model yang telah diajukan sebelumnya.



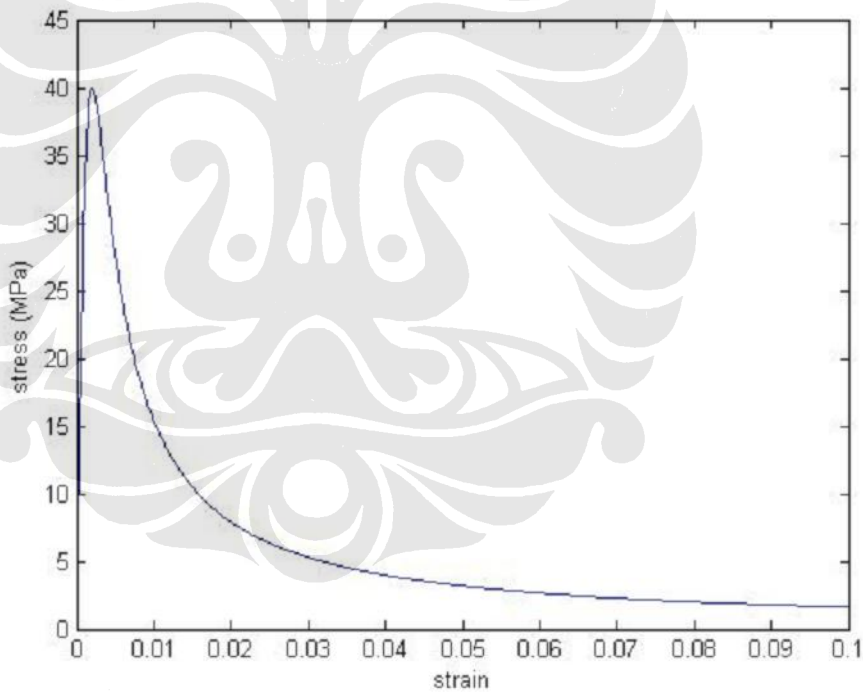
Gambar 2.13. Kurva tegangan-regangan Kent dan Park

Kurva Desayi dan Krishnan merupakan salah satu kurva yang memiliki persamaan yang paling berhasil. Persamaan kurva Desayi dan Krishnan adalah

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

- e = regangan
 - e_0 = regangan maksimum
 - s = tegangan
 - E = Modulus tangensial
- $$E = \frac{2 \cdot \sigma_{\max}}{\varepsilon_0}$$



Gambar 2.14. Kurva Desayi dan Krishnan

2.2. BETON GEOPOLIMER

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.

2.2.1. Sejarah Beton Geopolimer

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 dg zeolit, tetapi geopolimer memiliki *amorphous microstructure*^[3]. 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 UV^[4].

Van Jaarsveld, van Deventer, dan Scharzman (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 kekyatan 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 sodium hidroksida (NaOH) dan larutan sodium 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 sodium 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.

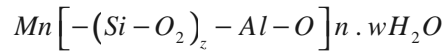
Palomo et. al (2004) menyelidiki karakteristik mekanis dari beton geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Ditemukan bahwa karakteristik material kebanyakan ditentukan oleh metode *curing*, terutama faktor waktu dan temperature masa *curing*.

2.2.2. Material Penyusun Beton Geopolimer

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.

2.2.2.1. 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.

2.2.2.2. Aktivator

Sebagaimana telah dijelaskan di atas, aktivator dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. Alkali mengaktifkan prekursor dengan mendissolusikan 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.

2.2.3. 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 ini^[3] :

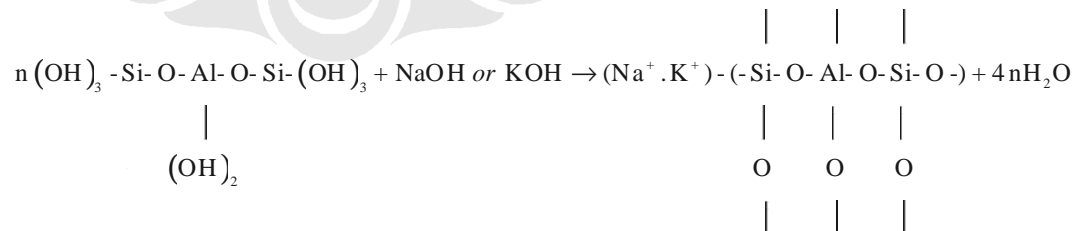
- § Poly (sialate), formula monomer [-Si-O-Al-O-]
 - § Poly (sialate-siloxo), formula monomer [-Si-O-Al-O-Si-O-]
 - § Poly (sialate-disiloxo), formula monomer [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]
- (*sialate = silicon-oxo-aluminate, siloxo = silicon-oxo*)

Reaksi kimia yang terjadi pada proses polimerisasi terbagi dalam 3 tahapan^[5]. Ketiga tahap di bawah ini dapat saling bergantian dan terjadi bersamaan, membuat ini menjadi sulit ditelaah secara terpisah^[6]. 3 tahap proses polimerisasi tersebut adalah :

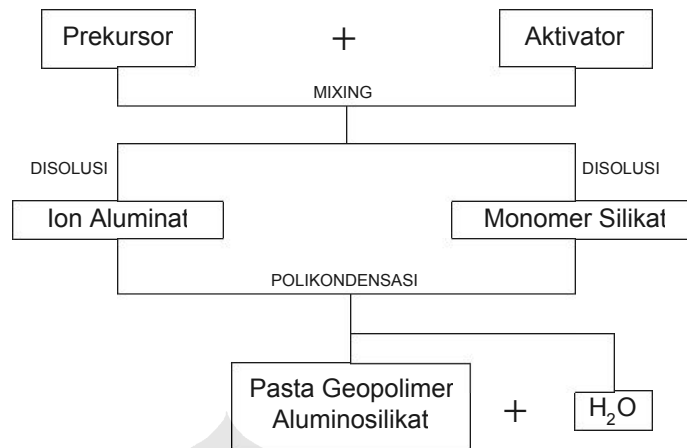
- (1) disolusi atom Si dan Al dari sumber material prekursor disebabkan oleh ion hidroksida
- (2) penguraian ion prekursor menjadi monomer



- (3) polikondensasi dari monomer – monomer menjadi struktur polimer



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



Gambar 2.15. Proses Pembuatan Pasta Geopolimer

2.2.4. Karakteristik Beton Geopolimer

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.

2.2.4.1. 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.

(I) 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 rata-rata.
5. Angka rata-rata 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*.

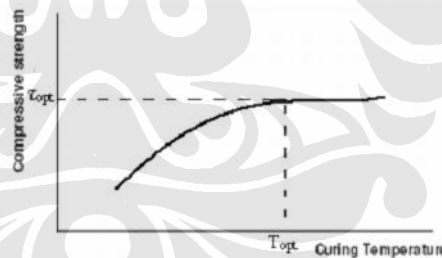
2.2.4.2. Kekuatan Mekanis

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 $60 \text{ Mpa}^{[7]}$.

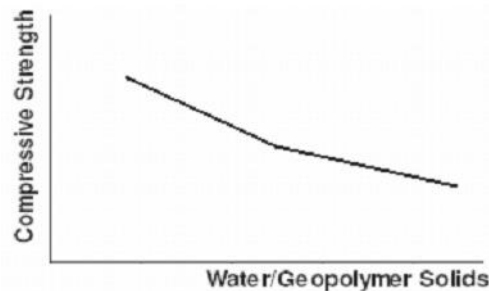


Gambar 2.16. Pengaruh suhu ikat terhadap kuat tekan

(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 $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 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 2.17. Pengaruh kadar air terhadap kuat tekan

(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 kation Al^{3+} .

2.2.4.3. 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.

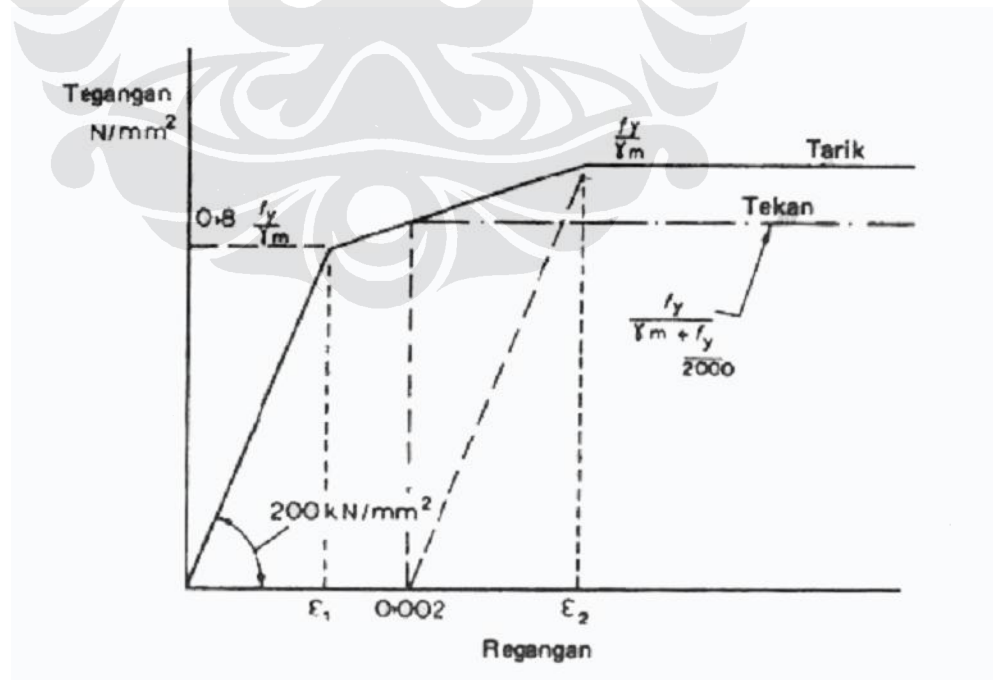
Berdasarkan penelitian tentang material geopolimer, disebutkan bahwa material tersebut memiliki karakteristik yang luar biasa terhadap ketahanan serangan asam. Hardjito Djiwanoro, dkk. (2004) melaporkan, geopolimer berbahan dasar *fly ash* menunjukkan ketahanan terhadap serangan sulfat setelah benda 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.

2.3. BAJA

Baja lebih banyak digunakan dalam konstruksi beton bertulang dikarenakan oleh sifatnya yang mampu menahan gaya tarik. Kurva tegangan-regangan rencana jangka pendek yang mewakili, untuk tulangan ditunjukkan oleh gambar 2.17. Di dalam tarikan, kekuatan rencana adalah kekuatan karakteristik (f_y) dibagi dengan faktor keamanan parsial (γ_m), tetapi di dalam tekanan kekuatan rencana dikurangi sampai ke harga yang sesuai dengan regangan sebesar 0,002 yang berhubungan dengan standar tegangan beton puncak dan juga menyesuaikan kemungkinan melekungnya batang tulangan. Berhubung hubungan tegangan-regangan adalah linear maka besarnya tegangan dan regangan pada setiap titik dapat ditentukan.



Gambar 2.18. Kurva tegangan-regangan rencana jangka pendek untuk tulangan

Jadi
$$\text{regangan } \epsilon_1 = \frac{\text{tegangan}}{\text{Modulus Young}} = \frac{0,8f_y}{\gamma_m \times 200000} = \frac{4f_y \times 10^{-6}}{\gamma_m} \dots\dots(2.4)$$

dan

$$\text{regangan } \epsilon_2 = 0,002 + \frac{f_y}{\gamma_m \times 200000} = 0,002 + \frac{5f_y \times 10^{-6}}{\gamma_m} \dots\dots\dots(2.5)$$

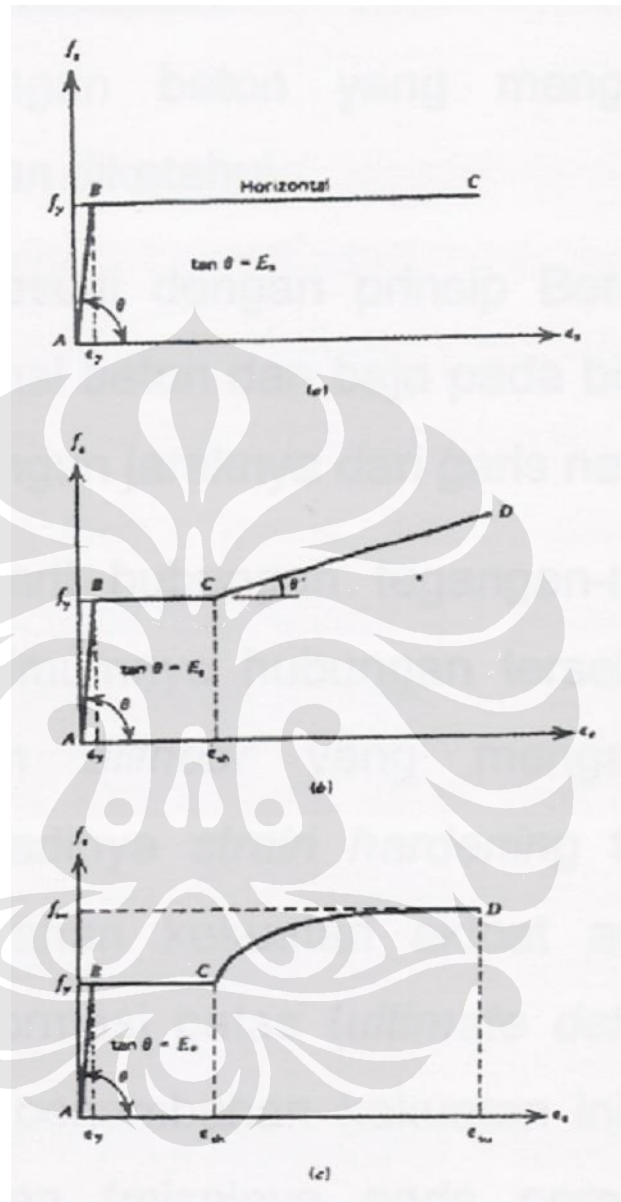
Tabel 2.1 Tegangan dan regangan baja

f_y (N/mm ²)	regangan ($\gamma_m = 1,15$)	
	ϵ_1	ϵ_2
250	0,00087	0,00309
410	0,00143	0,00378
425	0,00148	0,00385
460	0,00160	0,00400

Untuk keperluan perencanaan dan mempermudah perhitungan, hubungan tegangan-regangan tulangan baja perlu dimodelkan menjadi bentuk kurva tertentu. Hubungan tersebut disederhanakan menjadi bentuk kurva tegangan-regangan bilinear (dua garis lurus), diperlihatkan pada gambar 2.18(a). kurva ini mengabaikan adanya tegangan leleh atas dan penambahan tegangan akibat strain hardening. Penyederhanaan ini umumnya cukup akurat untuk baja yang memiliki tegangan leleh rendah.

Pada kasus tertentu, mungkin diperlukan evaluasi tegangan baja pada regangan yang lebih besar setelah leleh, sehingga dengan lebih teliti dapat diketahui kekuatan beton bertulang pada lendutan yang besar. Pada perencanaan gempa, hal ini perlu dilakukan karena adanya persyaratan ductility mempertimbangkan kemungkinan tercapainya regangan yang beberapa kali lebih besar daripada regangan leleh. Permodelan yang lebih teliti juga dapat dilakukan

dengan kurva tegangan-regangan yang diperlihatkan pada gambar 2.18(b) dan 2.18 (c).



Gambar 2.19. Idealisasi kurva tegangan-regangan baja akibat pembebanan tarik dan tekan. (a) Kurva bilinear, (b) Kurva trilinear, (c) Kurva lengkap.

2.4. ASUMSI DASAR ANALISA PENAMPANG BALOK BETON BERTULANG

Analisa penampang balok beton bertulang dilakukan dengan empat asumsi dasar sebagai berikut :

1. penampang datar sebelum mengalami lentur akan tetap datar setelah mengalami lentur.
2. kurva tegangan-regangan baja diketahui
3. kuat tarik beton diasumsikan 10 % dari kuat tekannya
4. kurva tegangan-regangan beton yang menggambarkan besar dan distribusi tegangan tekan diketahui.

Asumsi pertama sesuai dengan prinsip Bernoulli yang menyatakan bahwa regangan longitudinal beton dan baja pada berbagai titik di sepanjang penampang sebanding dengan jaraknya dari garis netral. Sebagian besar pengujian beton bertulang menunjukkan bahwa asumsi ini sangat mendekati kebenaran pada beberapa tahap pembebanan hingga mencapai keruntuhan lentur. Hal ini menunjukkan adanya ikatan yang baik antara beton dan baja. Pada daerah tekan beton, asumsi ini cukup akurat.

Asumsi kedua mengartikan hubungan tegangan-regangan tulangan baja terdefinisi dengan baik. Umumnya hubungan tersebut diasumsikan berupa kurva tegangan-regangan *bilinear* yang mengabaikan adanya *strain hardening*. Penambahan kekuatan akibat adanya *strain hardening* berhubungan dengan deformasi batas yang sangat besar pada struktur.

Asumsi ketiga mengartikan besarnya kuat tarik beton diperhitungkan namun besarnya hanya 10 % dari kuat tekan beton.

Asumsi keempat mengartikan kurva hubungan tegangan-regangan beton diketahui dengan jelas. Serta mengetahui jenis kurva hubungan tegangan-regangan yang akan digunakan. Asumsi ini diperlukan untuk mengetahui perilaku penampang yang sebenarnya. Seberapa besar gaya tekan yang dapat ditahan oleh beton dan besarnya momen akibat gaya tekan tersebut pada garis netral.

2.5. HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN BETON DAN BAJA

Beton bertulang terdiri dari material beton dan tulangan baja. Perilaku beton bertulang dipengaruhi oleh kombinasi sifat dari material beton, tulangan baja dan penggunaan sengkang baja. Sifat material beton dan baja dinyatakan dalam hubungan tegangan-regangan yang menunjukkan sifat non-linier material.

Untuk melakukan analisa fiber model pada balok beton bertulang, diperlukan teori-teori dasar hubungan tegangan-regangan beton dengan sengkang baja persegi dan hubungan tegangan-regangan baja. Hubungan tegangan-regangan tersebut dimodelkan menjadi bentuk kurva tertentu seperti sudah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya.

2.6. ANALISA PENAMPANG BALOK BETON BERTULANG GEOPOLIMER DENGAN METODE *FIBER MODEL*.

Dalam menganalisa penampang balok beton geopolimer ini dengan menggunakan metode fiber model, digunakan teori-teori dasar hubungan tegangan-regangan dari material baik beton dan juga baja. Untuk menggambarkan hubungan tegangan-regangan beton, digunakan model Kurva Kent dan Park. Sedangkan untuk hubungan tegangan-regangan baja kurva yang digunakan merupakan idealisasi kurva *bilinear*.

Pada analisa menggunakan metode fiber model ini, penampang balok dianggap dibagi menjadi beberapa lapisan-lapisan yang paralel terhadap sumbu momen lentur. Pembagian elemen kedalam serat-serat ini dipengaruhi oleh nilai kurvatur (f) dan asumsi jarak terhadap sumbu netral yang berubah-ubah dimulai dari serat atas penampang. Berdasarkan teori Bernoulli, distribusi regangan dapat ditentukan dari nilai kurvatur (f). Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$e_n = \varphi_0 \cdot b \dots\dots\dots(2.6)$$

- Dimana :
- e_n = Regangan dari material beton atau baja
 - f_0 = Nilai kurvatur
 - b = Jarak sumbu netral ke serat atas

Nilai distribusi tegangan setiap material dapat ditentukan setelah diketahui nilai regangan baja dan regangan beton berdasarkan nilai kurvatur yang ditentukan sebelumnya. Berdasarkan distribusi tegangan, gaya dalam dan momen untuk masing-masing material yang bekerja pada balok dapat ditentukan sebagai berikut :

Gaya $F_n = \int f_n dx \dots\dots\dots(2.7)$

Momen $M_n = \int f_n \cdot x dx \dots\dots\dots(2.8)$

Perhitungan gaya pada analisa fiber model bertujuan untuk menentukan nilai kurvatur serta garis netral yang memenuhi kondisi keseimbangan gaya. Dimana jumlah gaya akibat gaya tekan dan gaya tarik adalah nol.

$$\sum F = 0 \dots\dots\dots(2.9)$$

Bila kondisi seimbang telah tercapai, maka besarnya momen untuk suatu nilai kurvatur dapat ditentukan berdasarkan gaya-gaya yang bekerja pada balok dikalikan dengan jarak gaya tersebut terhadap garis netral.

Apabila momen telah diketahui besarnya, nilai momen tersebut diplot dengan nilai kurvatur sehingga dapat dibuat kurva hubungan antara momen dan kurvatur.

2.7. KERUNTUHAN LENTUR

Pada perencanaan penampang balok beton geopolimer, terdapat tiga kemungkinan pola keruntuhan akibat lentur yang terjadi, yaitu :

1. *Over Reinforced* atau keruntuhan tekan, yaitu suatu keadaan dimana beton lebih dulu mencapai tegangan maksimum dibandingkan baja tulangan tarik belum mencapai tegangan leleh.
2. *Under Reinforced* atau kondisi keruntuhan tarik. Kondisi dimana tulangan baja lebih dulu mencapai tegangan leleh, sedangkan beton belum mencapai tegangan maksimumnya.
3. *Balance Reinforced* yaitu suatu kondisi dimana keruntuhan terjadi bersamaan ketika beton mencapai tegangan maksimumnya dan baja mencapai tegangan leleh.