

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Piropilit

Piropilit merupakan hasil tambang berupa mineral yang termasuk dalam grup silikat. Piropilit termasuk jenis mineral lempung berair (*hydrous aluminium silicate*) dengan rumus kimia $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Mineral yang termasuk pada piropilit yaitu mineral lempung. Piropilit dibedakan menjadi tiga jenis yaitu kianit, andalusit, dan diaspor. Penggolongan jenis tersebut didasarkan atas kandungan mineral lempung dalam piropilit. Material yang termasuk dalam bahan galian golongan C ini, biasa ditemukan dalam formasi andesit tua. Piropilit juga mudah ditemukan di daerah yang berformasi gamping.

Salah satu ciri fisik dari material piropilit adalah warnanya. Piropilit memiliki beberapa jenis warna yaitu putih keabuan, kuning pucat, putih kehijauan, dan coklat kemerahan. Perbedaan warna dalam piropilit berhubungan dengan kandungan material yang tercampur didalamnya. Warna coklat kemerahan disebabkan adanya campuran dari pelapisan mineral feldspar. Sedangkan warna kuning pucat dengan bercak putih terbentuk akibat tercampunya mineral piropilit dengan kotoran yang mengandung potasium. Namun dari berbagai macam warna, piropilit dengan warna putih keabu-abuan merupakan jenis yang paling umum ditemukan. Jenis piropilit yang berkualitas baik adalah piropilit dengan warna putih kehijauan dengan kilap mutiara di permukaan belahannya. Selain warna, piropilit mempunyai sifat fisik yaitu kekerasan 1-2 skala mohs, kilap seperti mutiara, dapat ditembus oleh cahaya, pecahan *uneven/conchoidal*, densitas 2,65-2,85 g/cm^3 , cerat putih, dan belahan 1 arah. Dalam penelitian ini digunakan piropilit dengan ciri fisik warna putih kehijauan dengan kilap mutiara di permukaan belahannya.

Terdapat dua golongan mineral piropilit, yaitu piropilit dengan sistem kristal monoklinik dan piropilit dengan sistem kristal triklinik, tetapi sampai saat ini dilaporkan bahwa tidak ada perbedaan sifat yang berarti dengan perbedaan sistem kristal tersebut. Keduanya dianggap sama (Powel, 1998). Piropilit mempunyai sifat-sifat fisika yang identik dengan talk, talk dan piropilit adalah isomorf. Sifat-sifat fisika piropilit antara lain: berwarna putih keabu-abuan, massa jenis antara 2,65 – 2,85 g/cm^3 , sifat cerat putih, belahan sempurna dan kekerasan antara 1 sampai 1,5 (Bearat *et al.*,

2002). Pemahaman yang baik tentang piropilit pada tingkat atomik sangat penting untuk aplikasinya dalam bidang industri (Wang, *et al*, 2003).

Mineral piropilit Sumbermanjing Malang Selatan mempunyai komposisi kimiawi sebagai berikut: SiO₂ (84,30%), Al₂O₃ (1,80%), MgO (1,26%), CaO (0,68%), K₂O (0,25%), Na₂O (0,64%), Fe₂O₃ (1,56 %). Kemungkinan yang 9,41 % adalah komponen TiO₂, juga pengotor lain seperti senyawa-senyawa Cu, Zn dan asam humat yang sering terdapat dalam mineral. Bersifat padatan kristalin dengan kandungan kwarsa sebesar 25,5% dan rutil sebesar 0,6%. Mineral piropilit tersebut mempunyai serapan-serapan karakteristik pada bilangan gelombang 950-1250 cm⁻¹ untuk vibrasi ulur dari O-Si-O dan Al-O-Al, bilangan gelombang 400-450 cm⁻¹ untuk vibrasi tekuk dari O-Si-O dan Al-O-Al, bilangan gelombang 3478 cm⁻¹ untuk gugus hidroksil dari air dan pada bilangan gelombang 3674,7 cm⁻¹, merupakan spektra spesifik untuk gugus OH dari gipsit (Mutrofin, dkk, 2005).

Mineral piropilit Sumbermanjing Malang selatan mempunyai luas permukaan spesifik sebesar 6,362 m²/g, volume pori sebesar 0,008 cm³/g dan jari-jari pori sebesar 24,116 Å. Ini menunjukkan bahwa piropilit tersebut termasuk dalam kelompok mineral mesopori (Mutrofin, dkk, 2005).

Pada bidang teknik sipil khususnya teknologi material beton, berbagai usaha dilakukan untuk mendapatkan beton dengan kualitas yang baik. Dalam perkembangannya, salah satu bahan yang diperkirakan bisa meningkatkan kualitas beton adalah penggunaan material piropilit sebagai bahan campuran. Dengan mencampur piropilit sebagai bahan pembuatan beton, dimaksudkan untuk tujuan sebagai berikut:

a. Meningkatkan kekuatan tekan beton.

Pada sebuah penelitian yang pernah dilakukan dengan penambahan piropilit dalam campuran beton dapat dihasilkan beton dengan kuat tekan yang meningkat. Setelah dilakukan metode pengujian tekan terhadap benda uji laboratorium dan analisis data dengan uji anova serta regresi, dapat diketahui hubungan antara penambahan piropilit dengan kekuatan beton. Dari hasil penelitian tersebut terlihat bahwa penambahan piropilit dengan kadar tertentu dapat memberikan peningkatan kuat tekan yang dihasilkan hingga 42 persen.

b. Penghematan Semen.

Dengan meningkatnya kuat tekan beton berindikasi bahwa adanya penghematan dalam pemakaian semen.

c. Menurunkan biaya produksi beton.

Penggunaan piropilit bisa menurunkan f'_c target yang bisa berdampak pada pengurangan penggunaan semen, oleh karena itu juga berpengaruh pada biaya produksi beton.

d. Mewujudkan beton ramah lingkungan (*green concrete*).

Hal ini disebabkan karena mengurangi penguapan CO₂ ke udara sebagai salah satu penyebab rusaknya lapisan ozon.

Tabel 2.1 Perbandingan piropilit dan pasir sebagai pengisi beton

Pasir	Piropilit
Indeks kekerasan < 2,2	Indeks kekerasan 1-1,5
Berat jenis 2,2-2,7	Berat jenis 2,65-2,85
Gradasi Zona 1-4	Dapat disesuaikan dengan gradasi pasir
Komposisi kimia	
SiO ₂ (80,35%)	SiO ₂ (84,30%)
Al ₂ O ₃ (1,66%)	Al ₂ O ₃ (1,80%)
Fe ₂ O ₃ (8,96%)	Fe ₂ O ₃ (1,56%)
CaO (3,37%)	CaO (0,68%)
MgO (1,64%)	MgO (1,26%)
	K ₂ O (0,25%)
	Na ₂ O (0,64%)
	TiO ₂ , Cu, Zn dan asam humat (9,41%)

Beton biasa tersusun dari material berupa agregat kasar, agregat halus, dan pasta semen. Antara agregat dan mortar terdapat *interface zone* (zona antar permukaan). *Interface zone* merupakan daerah yang paling lemah pada beton. Kehancuran pada beton biasanya terjadi pada daerah tersebut, yaitu bidang kontak antara pasta semen dengan agregat. Untuk memperbesar bidang kontak tersebut didapat dilakukan dengan mengurangi jumlah pori-pori dalam beton. Pori dalam beton dapat dikurangi dengan cara penggunaan agegrat halus dengan ukuran yang sangat halus sebagai pengisi pori dalam beton. Dengan cara tersebut dimungkinkan pori-pori dalam beton dapat berkurang sehingga beton menjadi lebih padat.

Menurut penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa, setelah dilakukan metode pengujian tekan terhadap benda uji laboratorium dan analisis data dengan uji anova serta regresi sehingga dapat diketahui hubungan antara penambahan piropilit dan kekuatan beton yang dihasilkan mencapai hingga 42 persen dari kekuatan awal pada penambahan piropilit 15% (Anggraini, 2008).

2.2 Beton

Beton adalah campuran agregat halus dan agregat kasar sebagai bahan pengisi. Ditambah semen dan air yang digunakan sebagai bahan pengikat dan atau menggunakan bahan tambahan. Terdiri dari campuran agregat kasar dan agregat halus berupa pasir, kerikil, batu pecah, atau jenis agregat lainnya dengan atau tanpa bahan campuran serta semen yang dipersatukan oleh air dalam perbandingan tertentu.

Dengan melakukan analisa bahan maka dalam hal pembuatan beton harus lebih teliti dengan berbagai macam material-material yang digunakan dalam pembuatan tersebut, dikarenakan apabila suatu material dalam beton itu tidak bagus maka hasil dari beton tersebut tidak akan mencapai pada hasil yang diinginkan. Sehingga dengan diadakannya analisa bahan terhadap material yang akan digunakan untuk pembuatan beton maka hasil dapat diperoleh dengan baik.

Sifat beton yang sudah mengeras memiliki arti penting selama masa gunanya. Beberapa sifat-sifat penting dari beton yang telah mengeras adalah kekuatan tekanya, deformasi setelah menerima beban, keawetan, permeabilitas dan penyusutan. Dari beberapa sifat penting tersebut, kuat tekan merupakan sifat yang paling penting dari beton karena mutu beton sering kali dinilai berdasarkan kuat tekannya.

Untuk menjamin agar mutu beton yang dihasilkan memenuhi persyaratan yang diinginkan, dianjurkan agar dilakukan pengujian terlebih dahulu pada agregat yang akan digunakan, kemudian membuat uji coba beton atau membuat uji campuran beton setelah rancangan campuran di laksanakan.

2.2.1 Komposisi beton

Material pembentuk beton secara umum terdiri dari bahan semen, agregat halus, agregat kasar, air.

a. Semen

Semen adalah suatu jenis bahan yang memiliki sifat adhesif dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen-fragmen mineral menjadi satu massa yang padat. Semen merupakan salah satu bahan perekat yang jika dicampur dengan air mampu mengikat bahan-bahan padat seperti pasir dan batu menjadi suatu kesatuan kompak. Sifat pengikatan semen ditentukan oleh susunan kimia yang dikandungnya. Adapun bahan utama yang dikandung semen adalah kapur (CaO), silikat (SiO_2), alumunia (Al_2O_3), ferro oksida (Fe_2O_3), magnesit (MgO), serta oksida lain dalam jumlah kecil (Lea & Desch, 1940).

Menurut SNI 15-1049-2004, semen portland merupakan semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan satu atau lebih bentuk Kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain.

Kekuatan semen merupakan hasil dari proses hidrasi. Proses kimiawi ini berupa kristalisasi dalam bentuk *interlocking-crystals* (ikatan kristal) sehingga membentuk gel semen yang akan mempunyai kekuatan tekan yang tinggi apabila mengeras. Jika semen portland dicampur dengan air, maka komponen kapur dilepaskan dari senyawa. Banyaknya kapur dilepaskan ini sekitar 20% dari berat semen.

Sifat fisis semen portland ditentukan dari beberapa faktor yaitu kehalusan butir, waktu pengikatan, dan kepadatan.

- **Kehalusan butir**

Kehalusan butir semen mempengaruhi proses hidrasi. Kehalusan butir semen yang tinggi dapat mengurangi naiknya air ke permukaan, tetapi menambah kecenderungan beton untuk menyusut lebih banyak dan mempermudah terjadinya retak susut.

- **Waktu pengikatan**

Waktu pengikatan adalah waktu yang dibutuhkan semen untuk mencapai keadaan kaku tahap pertama dan cukup kuat untuk menerima tekanan.

- **Kepadatan**

Massa jenis semen yang disyaratkan oleh ASTM adalah 3,15g/cm³. Pada kenyataannya massa jenis semen yang diproduksi berkisar antara 3,05 g/cm³ sampai 3,25 g/cm³. Variasi ini akan berpengaruh pada proporsi campuran semen dalam campuran. Pengujian massa jenis dapat dilakukan menggunakan *Le Chatelier Flask* menurut standar ASTM C-188.

Komposisi kimia dalam setiap semen portland mempunyai empat unsur utama berupa:

- *Trikalsium Silikat* (C₃S)

Senyawa ini dapat mengeras dalam beberapa jam dan disertai dengan pelepasan sejumlah energi panas. C₃S mulai berhidrasi bila semen terkena air secara eksotermis, berpengaruh besar terhadap pengerasan semen, terutama sebelum mencapai umur 14 hari dan membutuhkan air 24% dari beratnya.

- *Dikalsium Silikat (C₂S)*

Reaksi berlangsung sangat lambat dan disertai dengan pelepasan sejumlah energi panas secara lambat. Senyawa berpengaruh terhadap perkembangan kekuatan beton dari umur 14 sampai seterusnya. Semen Portland yang mempunyai kandungan C₂S yang cukup banyak ketahanan terhadap agresi kimia dan penyusutan kering relatif rendah dan memberikan kontribusi terhadap umur beton.

- *Trikalsium Aluminat (C₃A)*

Senyawa C₃A mengalami proses hidrasi dengan cepat dan disertai dengan pelepasan sejumlah energi panas. Senyawa ini mempengaruhi proses pengikatan awal tetapi kontribusinya terhadap kekuatan beton kecil. Dan kurang tahan terhadap agresi kimia dan paling berpeluang mengalami disintegrasi (perpecahan) oleh sulfat yang dikandung air tanah dan kecenderungan yang tinggi mengalami keretakan akibat perubahan volume.

- *Tetrakalsium Aluminate (C₄AF)*

Sekalipun proporsinya C₄AF cukup besar dari semen, kontribusi terhadap sifat-sifat beton tidak ada. Senyawa C₄AF dapat merubah reaksi kimia C₂F menjadi C₄AF. Semen portland yang mempunyai zat kapur dengan kadar yang berlebihan menyebabkan perpecahan semen setelah timbul ikatan. Kadar kapur yang banyak tetapi tidak berlebihan, cenderung memperlambat proses pengikatan oleh semen tetapi mempertinggi kuat tekan awal dari beton. Bila kandungan kapurnya kurang pengikatan yang terjadi berlangsung cepat, namun pengikatan yang terjadi menjadi lunak.

b. Agregat halus

Agregat halus dalam beton adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batu-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh pemecah batu. Agregat halus berperan penting sebagai pembentuk beton dalam pengendalian *workability*, kekuatan dan keawetan beton, oleh karena itu pemakaian pasir sebagai pembentuk beton harus dilakukan secara selektif.

Menurut standar nasional Indonesia SNI 03-1750-1990 disebutkan mengenai persyaratan pasir atau agregat halus yang baik sebagai bahan bangunan adalah sebagai berikut:

- Agregat halus harus terdiri dari butiran yang tajam dan keras dengan indeks kekerasan < 2,2.

- Jika dipakai natrium sulfat bagian hancur maksimal 12%.
- Jika dipakai magnesium sulfat bagian halus maksimal 10%.
- Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% dan apabila pasir mengandung lumpur lebih dari 5% maka pasir harus dicuci.
- Pasir tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak.
- NaOH 3%. Susunan besar butir pasir mempunyai modulus kehalusan antara 1,5 sampai 3,8 dan terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam.
- Untuk beton dengan tingkat keawetan yang tinggi reaksi pasir terhadap alkali harus negatif.
- Pasir laut tidak boleh digunakan sebagai agregat halus untuk semua mutu beton kecuali dengan petunjuk dari lembaga pemerintahan bahan bangunan yang diakui.
- Agregat halus yang digunakan untuk plesteran dan spesi terapan harus memenuhi persyaratan pasir pasangan.

Menurut SNI 03-1750-1990 gradasi agregat halus dikelompokkan menjadi empat zonasi yaitu zona 1 pasir kasar, zona 2 pasir agak kasar, zona 3 pasir halus, dan zona 4 pasir agak halus. Pembagian zonasi tersebut didasarkan atas persentase berat agregat halus yang lolos pada saringan tertentu.

Tabel 2.2 Syarat batas gradasi agregat halus

Lubang Ayakan (mm)	Berat Lolos Kumulatif (%)							
	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Bawah	Atas	Bawah	Atas	Bawah	Atas	Bawah	Atas
9,6	100	100	100	100	100	100	100	100
4,8	90	100	90	100	90	100	95	100
2,4	60	95	75	100	80	100	95	100
1,2	30	70	55	90	75	100	90	100
0,6	15	34	35	59	60	79	80	100
0,3	5	20	8	30	12	40	15	50
0,15	0	10	0	10	0	10	0	15

Sumber: SNI 03-1750-1990

c. Agregat kasar

Agregat kasar dalam beton dapat berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alam dari batuan atau batuan pecah yang diperoleh dari pemecahan batu. Pada umumnya yang dimaksud dengan agregat kasar adalah agregat dengan butiran lebih dari 5 mm.

Untuk memilih agregat yang digunakan sebagai campuran beton ditentukan dari mutu, jenis konstruksi dan ketersediaan bahan.

Menurut SNI 03-1750-1990 syarat-syarat agregat kasar adalah:

- Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir-butir pipih hanya dapat dipakai apabila jumlah butir-butir pipih tersebut tidak melebihi 20% dari berat agregat seluruhnya. Butir-butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% yang ditentukan terhadap berat kering. Apabila kadar lumpur melampaui 1% maka agregat kasar harus dicuci.
- Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton, seperti zat-zat yang reaktif alkali.
- Kekerasan butir-butir agregat kasar yang diperiksa dengan bejana pengujian Rudelof dengan beton pengujian 20 ton harus memenuhi syarat-syarat:
 - a) Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5-19 mm lebih dari 24% berat.
 - b) Tidak terjadi pembubukan sampai 19-30 mm lebih dari 22% berat.Kekerasan ini dapat juga diperiksa dengan mesin pengawas Los Angeles. Dalam hal ini tidak boleh terjadi kehilangan berat lebih dari 50%.
- Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beranekaragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan SNI 03-1750-1990 harus memenuhi syarat sebagai berikut:
 - a) Sisa di atas ayakan 31,5 mm harus 0% berat .
 - b) Sisa di atas ayakan 4 mm harus berkisar antara 90% dan 98% berat.
 - c) Selisih antara sisa-sisa kumulatif diatas dua ayakan yang berurutan, maksimum 60% dan minimum 10% berat.

Batasan susunan butiran agregat kasar dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.3 Syarat batas gradasi agregat kasar

Lubang Ayakan (mm)	Berat Lolos Kumulatif (%)		
	Max 10mm	Max 20mm	Max 40mm
38,1	-	100	95-100
19,1	100	95-100	35-70
9,52	50-85	30-60	10-40
4,76	0-10	0-10	0-5

Sumber: SNI 03-1750-1990

d. Air

Menurut SNI 03-2847-2002 tentang tata cara perhitungan beton untuk bangunan gedung, air yang dapat digunakan dalam proses pencampuran beton adalah sebagai berikut:

- Air yang digunakan pada campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan-bahan merusak yang mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tulangan.
- Air pencampur yang digunakan pada beton prategang atau pada beton yang didalamnya tertanam logam aluminium, termasuk air bebas yang terkandung dalam agregat, tidak boleh mengandung ion klorida dalam jumlah yang membahayakan.
- Air yang tidak dapat diminum tidak boleh digunakan pada beton, kecuali ketentuan berikut terpenuhi:
 - a) Pemilihan proporsi campuran beton harus didasarkan pada campuran beton yang menggunakan air dari sumber yang sama.
 - b) Hasil pengujian pada umur 7 dan 28 hari pada kubus uji mortar yang dibuat dari adukan dengan air yang tidak dapat diminum harus mempunyai kekuatan sekurang-kurangnya sama dengan 90% dari kekuatan benda uji yang dibuat dengan air yang dapat diminum. Perbandingan uji kekuatan tersebut harus dilakukan pada adukan serupa, terkecuali pada air pencampur, yang dibuat dan diuji sesuai dengan “Metode uji kuat tekan untuk mortar semen hidrolis (Menggunakan spesimen kubus dengan ukuran sisi 50 mm)” (ASTM C 109).

2.2.2 Faktor air semen (FAS)

Faktor Air Semen adalah perbandingan antara berat air dan berat semen dalam campuran adukan beton. Secara umum diketahui bahwa semakin tinggi nilai FAS, maka semakin rendah mutu/kekuatan beton. Nilai FAS yang rendah di

tambah dengan kekuatan agregat yang baik dipercaya dapat meningkatkan mutu beton. Tapi nilai FAS yang terlalu rendah dapat mengurangi kemudahan pekerjaan pada beton itu sendiri.

Hubungan FAS dengan Kuat Tekan Beton Teori Feret pada tahun 1896 (Neville, 1975) mengemukakan suatu rumusan umum hubungan matematis antara kuat tekan beton dengan volume Absolut semen, udara dan air sebagai berikut:

$$s = K \left(\frac{c}{c+e+a} \right)^2 \quad (2.1)$$

dengan:

- s = Kuat tekan beton
- K = Konstanta
- C = Volume Absolut semen
- e = Volume absolut air
- a = Volume absolut udara

Teori Abrams yang pada tahun 1919 (Neville, 1975) mengemukakan teorinya yang terkenal dengan nama Abram's law. Teori ini dijabarkan dalam bentuk matematis sebagai berikut:

$$f'_c = \frac{A}{B^{1,5} w/c} \quad (2.2)$$

dengan:

- f'_c = Kuat tekan beton (kg/cm^2)
- A = Konstanta empirik biasanya diambil 984
- B = Konstanta yang tergantung pada jenis semen dan biasa diambil 4
- w/c = Faktor air semen

Dalam praktek untuk mengatasi kesulitan pekerjaan karena rendahnya nilai FAS maka digunakan bahan tambah "*Admixture Concrete*" yang bersifat menambah keenceran "*Plasticity Plasticizer Admixture*".

2.2.3 Perawatan beton (*Curing*)

Reaksi kimia antara semen dan air membutuhkan waktu. Fungsi semen sebagai perekat mulai berkembang pada saat umur beton masih muda, karena itu untuk pekerjaan beton baik konvensional maupun precast perlu dilakukan perawatan beton.

Tujuan perawatan beton yaitu:

- a. Mencegah kehilangan *moisture* pada beton.
- b. Mempertahankan suhu yang baik selama durasi tertentu (diatas suhu beku dan di bawah 50 derajat celcius).

Jenis-jenis prawatan beton antara lain:

a. *Steam Curing*

Menguntungkan bila menginginkan kekuatan awal. Panas tambahan dibutuhkan untuk menyelesaikan hidrasi.

b. Penyemprotan/*Fogging*

Metode yang baik untuk kondisi dengan suhu di atas suhu beku dan humiditas rendah. Kekurangannya yaitu biaya dan dapat menyebabkan erosi pada permukaan beton yang baru mengeras.

c. Penggenangan/Perendaman

Ideal untuk mencegah hilangnya *moisture*. Mempertahankan suhu yang seragam. Kekurangannya yaitu membutuhkan tenaga kerja yang banyak, perlu pengawasan, dan tidak praktis untuk proyek yang besar.

d. Lembaran Plastik (sesuai ASTM C171)

Lapisan *polythylene* dengan ketebalan 4 ml.kelebihannya yaitu ringan, efektif sebagai penghalang hilangnya *moisture*, dan mudah diterapkan. Kekurangannya yaitu dapat menyebabkan *discoloration* permukaan, lebih terlihat bila lapisan plastik bergelombang dan diperlukan penambahan air secara periodik.

e. Penutup Basah (sesuai ASTM C171)

Menggunakan bahan yang dapat mempertahankan *moisture* seperti burlap (karung goni) yang dibasahi. Kelebihannya yaitu tidak terjadi *discoloration* dan tahan terhadap api. Kekurangannya yaitu memerlukan penambahan air secara periodik dan diperlukan lapisan plastik penutup burlap untuk mengurangi kebutuhan penambahan air.

f. *Curing Compound* (sesuai ASTM C171)

Membentuk lapisan tipis pada permukaan untuk menghalangi penguapan. Efisiensinya dites dengan ASTM C156.

2.3 Beton Bertulang

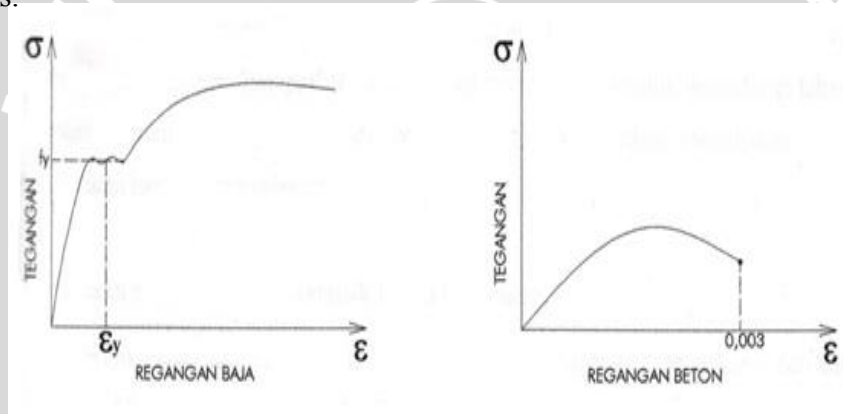
2.3.1 Pengertian beton bertulang

Beton bertulang merupakan suatu komposit material yang berasal dari penggabungan antara material beton dengan tulangan berupa batangan baja. Pemasangan tulangan pada beton difungsikan untuk memperbaiki sifat mekanis dari beton. Beton kuat terhadap tekan, tetapi lemah terhadap tarik (Nawy, 1990). Sedangkan baja mempunyai ketahanan terhadap gaya tarik yang bagus tapi dalam menahan tekan

tidak sebaik beton. Oleh karena itu, komposit beton dan tulangan baja dapat membentuk suatu material yang kuat baik dalam menerima gaya tekan maupun gaya tarik. Sesuai dengan sifat tersebut, tulangan baja dipasang pada serat tarik beton. Hal ini dimaksudkan agar gaya yang terjadi pada serat tarik tersebut diterima oleh tulangan baja.

Beberapa alasan yang dapat dijadikan dasar dari gabungan beton dan tulangan baja dalam menahan beban yaitu:

- lekatan (*bond*) antara baja dan beton dapat berinteraksi mencegah selip pada beton keras.
- Campuran beton yang baik mempunyai sifat kedap air yang dapat mencegah korosi pada baja tulangan.
- Angka kecepatan muai antara baja dan beton hampir sama yaitu antara 0,000010-0,000013 untuk beton per derajat Celcius sedangkan baja 0,000012 per derajat Celcius.



Gambar 2.1 Hubungan regangan-tegangan pada baja tulangan dan beton

Kekuatan tarik beton besarnya kira-kira 10% dari kekuatan tekan. Oleh karena itu hampir semua konstruksi beton bertulang direncanakan dengan anggapan bahwa beton sama sekali tidak memikul gaya tarik. Tulangan bajalah yang direncanakan memikul gaya tarik tersebut, yang dipindahkan oleh pelekatan diantara bidang singgung kedua bahan tersebut.

Baja tulangan untuk beton terdiri dari batang, kawat, dan jaring kawat baja las yang seluruhnya dirakit saesuai dengan standar ASTM. Sifat-sifat terpenting baja tulangan adalah sebagai berikut (Nawy, 1990):

- Modulus young (E_s)
- Kekuatan leleh (f_y)
- Kekuatan batas (f_u)
- Mutu baja yang ditentukan
- Ukuran atau diameter batang atau kawat

Walaupun dalam perhitungan tidak diperlukan adanya tulangan baja, suatu jumlah minimum dari tulangan ditempatkan pada elemen struktur tekan untuk melindungi terhadap efek dari momen lentur yang terjadi secara tiba-tiba yang dapat meretakkan bahkan meruntuhkan bagian yang tidak diberi tulangan.

2.3.2 Sifat-sifat mekanis beton

Perilaku mekanik beton merupakan kemampuan beton di dalam memikul beban pada suatu struktur. Kinerja beton yang baik ditunjukkan oleh kuat tekan beton yang tinggi, kuat tarik yang lebih baik, perilaku yang lebih duktail, kekedapan air dan udara, ketahanan terhadap sulfat dan klorida, penyusutan rendah dan keawetan jangka panjang.

a. Kekuatan Tekan (f'_c)

Kuat tekan beton merupakan kekuatan tekan maksimum yang dapat dipikul beton per satuan luas. Kuat tekan beton normal antara 20 – 40 MPa. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh faktor air semen (*water cement ratio* = w/c), sifat dan jenis agregat, jenis campuran, kelecakan (*workability*), perawatan (*curing*) beton dan umur beton.

Faktor air semen sangat mempengaruhi kuat tekan beton. Semakin kecil nilai w/c nya maka jumlah airnya sedikit yang akan menghasilkan kuat tekan beton yang besar. Sifat dan jenis agregat yang digunakan juga berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Semakin tinggi tingkat kekerasan agregat yang digunakan akan dihasilkan kuat tekan beton yang tinggi. Gradasi besar butiran agregat yang baik dan tidak seragam dapat memungkinkan terjadinya interaksi antar butir sehingga rongga antar agregat data terisi penuh.

Jenis campuran beton akan mempengaruhi kuat tekan beton. Jumlah pasta semen harus cukup sebagai pengikat seluruh permukaan butiran agregat dan mengisi rongga-rongga diantara agregat sehingga dihasilkan beton dengan kuat tekan yang diinginkan. Untuk memperoleh beton dengan kekuatan seperti yang diinginkan, maka beton yang masih muda perlu dilakukan perawatan dengan tujuan agar proses hidrasi pada semen berjalan dengan sempurna. Pada proses hidrasi semen dibutuhkan kondisi dengan kelembaban tertentu.

Apabila beton terlalu cepat mengering, akan timbul retak-retak pada permukaannya. Retak-retak ini akan menyebabkan kekuatan beton turun, juga akibat kegagalan mencapai reaksi hidrasi kimiawi penuh. Kuat tekan beton mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton. Kuat tekan beton dianggap mencapai maksimum setelah beton berumur 28 hari. Menurut SNI T-15-1991,

perkembangan kekuatan beton dengan bahan pengikat PC tipe 1 berdasarkan umur beton disajikan pada **Tabel 2.4** sebagai berikut:

Tabel 2.4 Perkembangan kuat tekan beton

Umur beton (hari)	3	7	14	21	28
PC tipe 1	0,46	0,7	0,88	0,96	1,0

Sumber: SNI T-15-1991

Kuat tekan beton diawali oleh tegangan tekan maksimum f'_c dengan satuan N/m^2 atau Mpa. Sebelum dibelakukannya sistem satuan SI di Indonesia, nilai tegangan menggunakan kg/cm^2 . Kekuatan tekan beton (f'_c) ditentukan dengan silinder standar (diameter 150 mm, tinggi 300 mm) yang dirawat di bawah kondisi standar laboratorium pada kecepatan pembebanan tertentu, pada umur 28 hari. Untuk struktur beton bertulang pada umumnya menggunakan beton dengan kuat tekan berkisar 17-30 MPa. Kekuatan beton pada struktur aktual dapat saja tidak sama dengan kekuatan silinder karena perbedaan pemadatan dan kondisi perawatan.

b. Kekuatan tarik (f_{ct})

Beton mempunyai kemampuan yang baik dalam menerima gaya tekan. Namun kelemahan beton berada saat menerima beban tarik. Nilai kuat tekan dan tarik beton tidak berbanding lurus, setiap usaha perbaikan mutu kekuatan tekan hanya disertai peningkatan kecil nilai kuat tariknya. Kuat tarik beton sangat kecil bila dibandingkan dengan kuat tekannya yaitu sekitar 10%-15% f'_c . Kuat tarik beton berpengaruh terhadap kemampuan beton di dalam mengatasi retak awal sebelum dibebani. Suatu perkiraan kasar dapat dipakai, bahwa nilai kuat tarik beton normal adalah:

- 9% - 15% f'_c (Diphohusodo, 1999)
- 10% - 20% f'_c (Nawy, 1990)
- 10% f'_c (W.H.Mosley, 1989)

Kekuatan tarik beton yang tepat sulit untuk diukur. Suatu nilai pendekatan yang umum dilakukan dengan menggunakan *modulus of rupture*, adalah tegangan tarik lentur beton yang timbul pada pengujian hancur beton polos (tanpa tulangan), sebagai pengukur kuat tarik sesuai teori elastisitas. Kuat tarik beton juga ditentukan melalui *pengujian split cylinder* yang umumnya memberikan hasil yang lebih baik dan lebih mencerminkan kuat tarik yang sebenarnya.

c. Kuat lentur beton

Kuat lentur beton merupakan kuat tarik tak langsung pada beton akibat adanya momen lentur. Dari pengujian kuat lentur dapat diketahui pola retak dan lendutan yang terjadi pada balok yang memikul beban lentur. Kuat lentur beton juga dapat menunjukkan tingkat daktilitas beton. Kuat lentur beton dapat di hitung dengan persamaan $\sigma_{lt} = \frac{M}{Z}$. Dengan M adalah nilai momen maksimum saat beton mengalami runtuh, dan Z adalah modulus penampang arah melintang. Menurut SNI-03-2847 (2002) nilai kuat lentur beton bila dihubungkan dengan kuat tekannya adalah $f_r = 0,7\sqrt{f'_c}$ MPa.

d. Kekuatan geser

Kekuatan geser lebih sulit diperoleh secara eksperimental dibandingkan dengan percobaan-percobaan kuat tekan dan tarik, karena sulitnya mengisolasi geser dari tegangan yang lainnya. Banyak variasi kekuatan geser yang dituliskan dalam berbagai literatur, mulai 20% dari kekuatan tekan pada pembebanan normal sampai sebesar 85% dari kekuatan tekan, pada kombinasi geser langsung dan tekan. Desain struktural yang ditentukan oleh kekuatan geser seringkali diabaikan karena tegangan besar biasanya dibatasi sampai harga yang cukup rendah untuk mencegah betonnya mengalami kegagalan tarik diagonal.

e. Perilaku tegangan-regangan beton normal

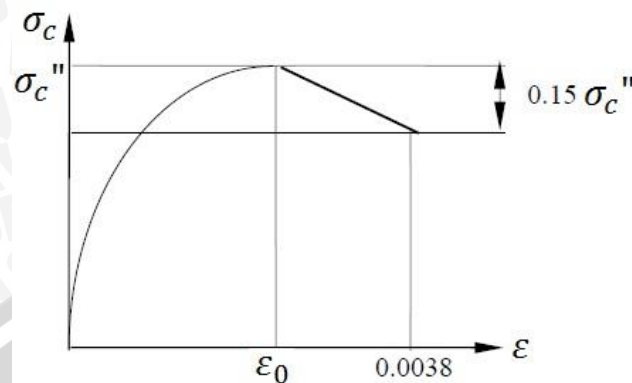
Hubungan tegangan-regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan dalam analisis maupun desain struktur beton. Untuk mengetahui perilaku hubungan tegangan-regangan beton didapat dari hasil pengujian tekan terhadap silinder beton. Hubungan tegangan regangan beton normal pada pembebanan uniaksial yang diusulkan oleh E. Hognestad diperlihatkan pada **Gambar 2.3**. Pada daerah $0 < \varepsilon_c < \varepsilon_0$, E. Hognestad memberikan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_c = \sigma_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

dengan:

- σ_c = Tegangan beton
- σ_c'' = Tegangan maksimum beton
- ε_0 = Regangan yang terjadi pada saat terjadi tegangan maksimum
- ε_c = Regangan yang terjadi pada saat tegangan mencapai 85% tegangan maksimum.

Pada daerah $\varepsilon_c > \varepsilon_{0c}$, persamaan hubungan tegangan regangannya merupakan persamaan linier yang bergantung pada nilai ε_c dan f'_c .



Gambar 2.2 Hubungan tegangan-regangan beton normal
Sumber: Dipohusodo, 1994

Dari **Gambar 2.3** terlihat bahwa pada kondisi tegangan mencapai $\pm 40\% f'_c$ pada umumnya berbentuk linier. Pada saat tegangan mencapai $\pm 70\% f'_c$ material beton banyak kehilangan kekakuannya yang menyebabkan diagram menjadi tidak linier. Dari beberapa hasil penelitian menyebutkan bahwa tegangan maksimum beton dicapai pada regangan tekan 0,002-0,0025. Regangan ultimit pada saat beton hancur 0,003 – 0,008. Untuk perencanaan, SNI 03-2847 (2002) menggunakan regangan tekan maksimum beton sebesar 0,003.

f. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas beton merupakan kemiringan garis singgung dari kondisi tegangan nol ke kondisi tegangan $0,45 f'_c$ pada kurva tegangan-regangan beton. Nilai ini pada perhitungan desain disebut sebagai nilai modulus elastisitas, modulus ini memenuhi asumsi bahwa regangan yang terjadi selama pembebanan pada dasarnya dapat dianggap elastis. Terdapat sejumlah pilihan definisi, tetapi yang paling umum dipakai adalah $E = E_c$, E_c dikenal sebagai modulus elastisitas sekan atau modulus elastisitas statik.

Penting untuk menentukan secara tepat besarnya harga yang akan diambil sebagai modulus elastisitas.

$$E = \frac{\text{Tegangan } (\sigma)}{\text{Regangan } (\varepsilon)} \quad (2.4)$$

Modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh jenis agregat, kelembaban benda uji beton, faktor air semen, umur beton dan temperaturnya. Secara umum, peningkatan kuat tekan beton seiring dengan peningkatan modulus elastisitasnya. Menurut SNI-03-2847 (2002)

hubungan nilai modulus elastisitas beton normal dengan kuat tekan beton adalah $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$. Nilai modulus elastisitas diperlukan untuk peninjauan lentur dan retak dari konstruksi.

2.4 Balok Persegi Tulangan Tunggal

Elemen struktur akan mengalami lentur dan deformasi akibat beban luar yang bekerja. Lentur yang terjadi pada balok merupakan akibat adanya regangan yang timbul karena adanya beban dari luar. Jika beban luar yang bekerja terus meningkat, maka balok akan mengalami deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur di sepanjang bentang balok. Bila bebannya terus bertambah sampai batas kapasitas baloknya, maka balok akan runtuh.

Tingkat pembebanan seperti ini disebut dengan keadaan limit dari keruntuhan pada lentur. Oleh karena itu, pada saat perencanaan, balok harus didesain sedemikian rupa sehingga tidak terjadi retak berlebihan pada saat beban bekerja dan mempunyai keamanan cukup. Selain itu balok juga direncanakan dengan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami runtuh.

Suatu balok beton bertulang dapat mengalami keruntuhan akibat gaya lintang maupun akibat momen yang terjadi akibat beban luar. Keruntuhan yang terjadi ketika gaya geser yang terjadi melebihi kapasitas balok dalam menahan gaya lintang disebut dengan keruntuhan geser. Untuk mengatasi keruntuhan geser ini balok biasa di pasang dengan tulangan geser atau sengkang.

Keruntuhan lentur pada balok terjadi akibat adanya momen lentur yang terjadi pada balok, melebihi dari kekuatan balok tersebut dalam menahan momen. Berdasar jenis keruntuhan yang dialami, keruntuhan balok dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok sebagai berikut (Nawy, 1990):

a. Keruntuhan tarik (*Under Reinforced*)

Jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan kecil (jumlah tulangannya sedikit), sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan sudah mencapai regangan lelehnya sedangkan beton belum hancur. Dalam kondisi ini beton belum mencapai regangan maksimumnya yaitu 0,003. Balok dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat daktail.

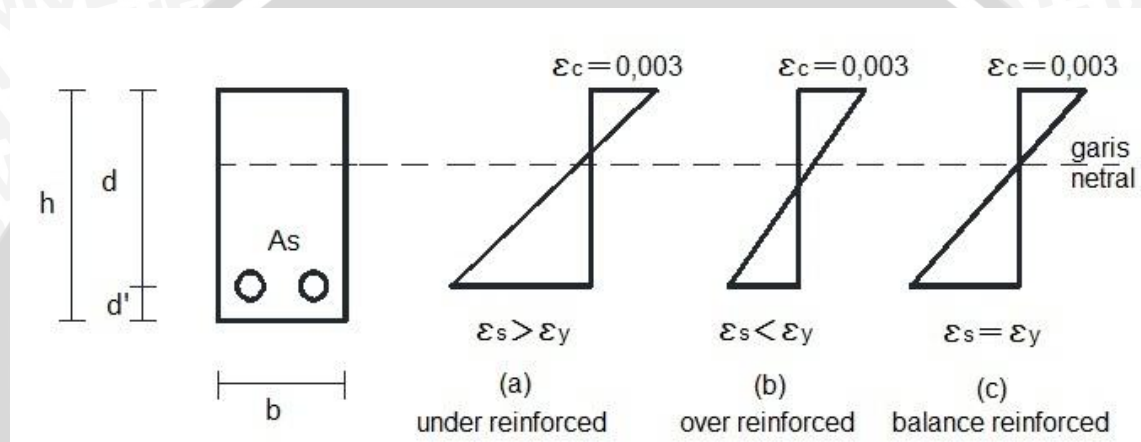
b. Keruntuhan tekan (*Over Reinforced*)

Jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan besar (jumlah tulangannya banyak), sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan

belum mencapai regangan lelehnya sedangkan beton sudah hancur (beton sudah mencapai regangan maksimumnya = 0,003). Balok dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat getas.

c. Keruntuhan seimbang (*Balance*)

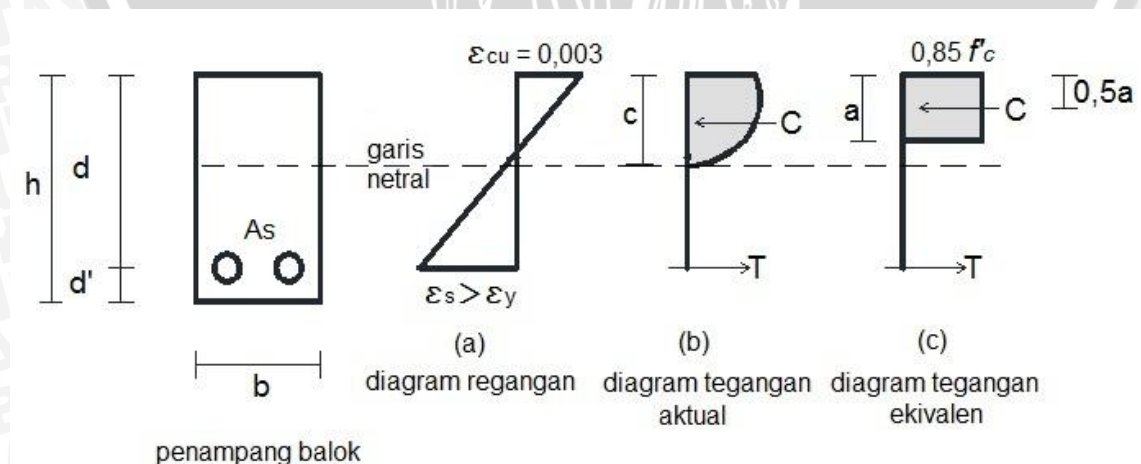
Jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan yang seimbang sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan dan beton hancur secara bersamaan. Tulangan sudah mencapai regangan lelehnya dan beton sudah mencapai regangan maksimumnya. Balok dengan kondisi keruntuhan seperti bersifat getas.



Gambar 2.3 Tipe keruntuhan lentur balok beton

2.4.1 Kapasitas penampang balok

Dalam perencanaan balok beton biasa digunakan asumsi bahwa balok mengalami keruntuhan lentur tarik (*Under Reinforced*). Distribusi regangan tegangan pada balok beton yang mencapai kekuatan nominal adalah sebagai berikut:



Gambar 2.4 Distribusi regangan tegangan balok beton bertulang tunggal
Sumber: Nawy, 1990

Pada kenyataannya distribusi tegangan pada penampang mempunyai pola berbentuk parabola seperti pada **Gambar 2.4(b)**. Namun Whitney menyederhanakan distribusi tegangan tersebut menjadi berbentuk blok tegangan persegi (*Equivalent Stress Block*) dengan tujuan untuk lebih mempermudah perhitungan seperti pada **Gambar 2.4(c)**.

2.4.2 Analisis penampang balok

Analisis penampang merupakan proses menentukan kekuatan penampang berdasar data-data penampang seperti: dimensi, luas tulangan, mutu beton (f'_c), mutu baja (f_y) dan letak tulangan.

Dari **Gambar 2.4(c)** tegangan ekivalen C merupakan gaya tekan beton, dan T gaya tarik baja tulangan. Dengan menggunakan persamaan kesetimbangan, dapat diketahui nilai dari tinggi garis netral, seperti berikut:

$$\begin{aligned} \Sigma H &= 0 \\ C &= T \\ 0,85 f'_c \cdot b \cdot a &= A_s f_y \\ a &= \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c \cdot b} \\ c &= \frac{a}{\beta_1} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Maka momen nominal penampang dapat dihitung berdasar gaya tarik maupun gaya tekan sebagai berikut:

- a. Momen nominal berdasar gaya tarik:

$$\begin{aligned} M_n &= T (d - 0,5a) \\ M_n &= A_s f_y (d - 0,5a) \end{aligned} \quad (2.6)$$

- b. Momen nominal berdasar gaya tekan:

$$\begin{aligned} M_n &= C (d - 0,5a) \\ M_n &= 0,85 f'_c \cdot b \cdot a (d - 0,5a) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Batasan tulangan tarik pada balok tulangan tunggal ditentukan berdasarkan syarat berikut:

- a. Batasan tulangan tarik minimum, SNI-03-2847 (2002) membatasi tulangan tarik minimum adalah sebesar:

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.8)$$

- b. SNI-03-2847 (2002) membatasi tulangan tarik maksimum yang diperbolehkan adalah sebesar $\rho_{\max} = 0,75\rho_b$. Dimana ρ_b atau ρ_{balance} ditentukan berdasar persamaan berikut:

$$\rho_b = \frac{(0,85 \beta_1 f'_c) 600}{f_y (600 + f_y)} \quad (2.9)$$

Dengan nilai β_1 didapat dari ketentuan sebagai berikut

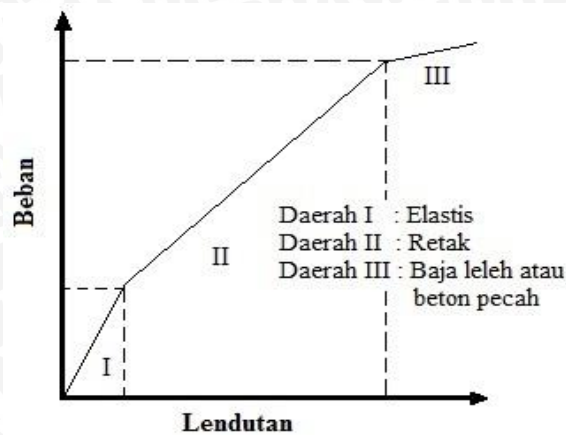
- untuk $f'_c < 30$ MPa $\beta_1 = 0,85$
- untuk $30 < f'_c < 55$ MPa $\beta_1 = 0,85 - 0,008 (f'_c - 30)$
- untuk $f'_c > 55$ MPa $\beta_1 = 0,65$

2.5 Lendutan

Struktur beton bertulang didesain untuk memenuhi kriteria keamanan (*safety*) dan kemampuan layan (*serviceability*). Untuk memenuhi kriteria kemampuan layan maka besarnya retak dan lendutan struktur pada kondisi beban kerja harus dapat diestimasi dan memenuhi kriteria tertentu. Sedangkan untuk memenuhi kriteria keamanan maka struktur harus didesain mempunyai suatu angka keamanan terhadap beban runtuh, karena itu perkiraan besarnya beban runtuh (batas) sangat penting. Selain nilai absolut beban yang menyebabkan keruntuhan, maka perilaku struktur saat runtuh juga perlu diketahui, apakah bersifat daktail (mengalami deformasi besar sebelum runtuh), atau tiba-tiba (non-daktail).

Balok adalah batang yang dominan memikul beban-beban yang bekerja arah transversal. Dengan kondisi ini balok akan mengalami deformasi yang berupa lengkungan atau lenturan yang menimbulkan tegangan dan regangan. Suatu balok dengan sumbu longitudinal lurus dibebani oleh gaya-gaya lateral, maka sumbu tersebut akan terdeformasi menjadi suatu lengkungan, yang disebut kurva defleksi balok. Sumbu sebuah balok akan berdefleksi dari kedudukannya semula apabila berada di bawah pengaruh gaya terpakai. Defleksi (lendutan) diukur dari permukaan netral awal ke permukaan netral setelah balok mengalami deformasi. Karena balok biasanya horizontal, maka defleksi merupakan penyimpangan vertikal.

Perilaku hubungan beban dan defleksi pada balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear. Bentuk kurva trilinear beban-lendutan pada balok beton bertulang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Hubungan beban-lendutan struktur beton

Sumber: Nawy, 1990

Pada daerah I kurva beban-defleksi pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastik penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok dalam daerah I lebih kecil dibanding modulus retak beton (f_r) sehingga tidak terjadi retak pada balok beton. Daerah praretak berhenti pada saat terjadi retak lentur pertama dimana tegangan beton telah mencapai kekuatan modulus retaknya.

Daerah II disebut sebagai taraf retak, yaitu batang struktural mengalami retak terkontrol baik distribusi maupun lebarnya. Suatu balok dapat mengalami berbagai taraf tegangan dan defleksi pada masing-masing bagiannya. Untuk balok di atas tumpuan sederhana, retak akan semakin lebar dan dalam pada daerah lapangan sedangkan pada daerah tumpuan akan terjadi retak minor yang tidak lebar.

Diagram beban pada daerah III terlihat lebih datar dari daerah sebelumnya. Hal ini disebabkan hilangnya kekakuan penampang akibat retak yang cukup banyak dan lebar di sepanjang bentang balok. Pada tahapan plastis ini baja tulangan mengalami leleh atau terjadi pecah pada beton, sehingga daerah III disebut juga sebagai taraf pasca *serviceability* (Nawy, 1990). Defleksi yang diijinkan pada sistem struktur sangat bergantung pada defleksi yang masih bisa ditahan oleh komponen struktur yang berinteraksi tanpa kehilangan esensi dan tanpa kerusakan pada elemen yang terdefleksi.

Selanjutnya disajikan kondisi pembebanan suatu balok yang nantinya persamaan-persamaan batas lendutan, $\max \delta$ yang diberikan dapat berguna dalam analisis dan perancangannya khususnya dalam penentuan batas lendutan (lendutan ijin/*allowable deflections*). Defleksi batang-batang struktural merupakan fungsi dari panjang bentang perletakan, atau kondisi ujungnya, jenis pembebanan, dan kekakuan lentur EI dari elemen. Apabila balok bertumpuan sederhana seperti terlihat pada gambar

mengalami dua pembebanan terpusat simetris, balok itu akan terlentur seperti ditunjukkan sebagai bentuk terdefleksi. Persamaan yang digunakan untuk mencari besarnya nilai lendutan pada tengah bentang adalah dengan menggunakan persamaan umum sebagai berikut:

$$\delta = \frac{1}{24EI} P \cdot a (3L^2 - 4a^2) \quad (2.10)$$

dengan:

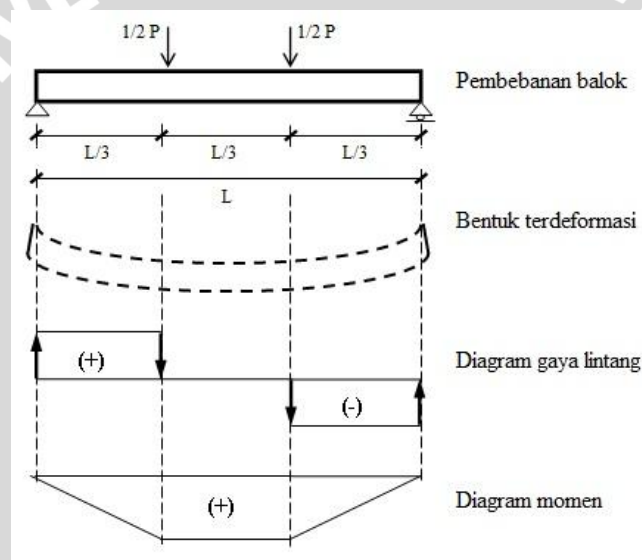
P = Beban yang diterima balok saat pengujian (N)

L = Panjang bentang (mm)

a = jarak tumpuan-beban

= $L/3$ (mm)

EI = Konstanta kekakuan lentur

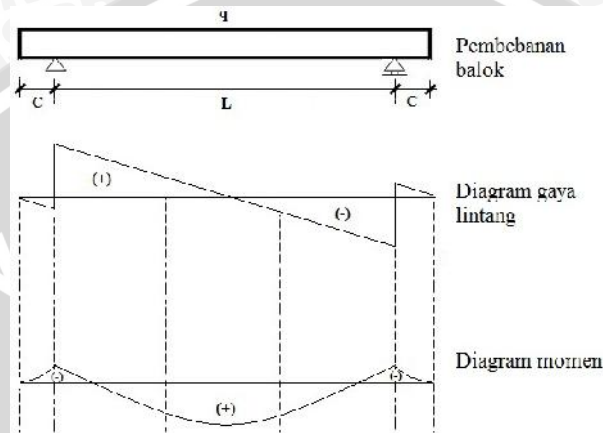


Gambar 2.6 Skema pembebanan balok akibat beban luar

Nilai dari modulus runtuh bergantung pada dimensi balok dan pengaturan pembebanan. Ada dua sistem yang digunakan yaitu satu pembebanan terpusat di tengah, dimana memberikan gambaran bidang momen triangular, jadi tegangan maksimum balok hanya terjadi pada satu tempat saja. Pembebanan kedua adalah dua pembebanan yang simetris seperti pada **Gambar 2.6** yang menghasilkan bidang momen yang konstan diantara dua beban.

Pada pengaturan dengan system *four point bending test*, dua beban yang simetris membagi bentang menjadi 3 bagian yang sama. Sehingga panjang tiap bagian adalah $1/3$ dari total panjang bentang. Hal ini didasarkan pada tegangan maksimum retak kritis yang terjadi pada beberapa bagian akibat tidak kuat untuk menahan tegangan ini. Selain

itu dalam pembebanan terpusat sulit untuk menentukan letak lentur murni dikarenakan tegangan maksimum balok hanya terjadi pada satu tempat saja atau dengan kata lain tanpa ada pengaruh bidang geser (bidang $D = 0$, Momen = maksimum). Sedangkan untuk dua pembebanan terpusat, dapat dicari letak lentur murni karena terjadi pada beberapa bagian bentang diantara dua titik pembebanan dimana bentuk momen ini adalah trapesium.



Gambar 2.7 Skema pembebanan balok akibat beban sendiri

Selain beban luar, lendutan juga dipengaruhi oleh beban sendiri dari balok. Dalam perhitungan beban sendiri digambarkan sebagai beban merata pada keseluruhan bentang balok. Perhitungan lendutan akibat berat sendiri menurut kondisi perletakan benda uji untuk penelitian dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\delta = \frac{q(L+2c)^3}{24EI} \left[\frac{5}{16} - \frac{5c}{2(L+2c)} + 6 \left(\frac{c}{L+2c} \right)^2 - 4 \left(\frac{c}{L+2c} \right)^3 - \left(\frac{c}{L+2c} \right)^4 \right] \quad (2.11)$$

dengan:

- q = Beban merata akibat berat sendiri (N)
- c = Panjang kantilever (mm)
- L = Panjang bentang (mm)
- EI = Konstanta kekakuan lentur

Lendutan seketika pada komponen struktur terjadi apabila segera setelah beban bekerja seketika itu pula terjadi lendutan. Lendutan yang terjadi seketika (*immediate deflection*) dihitung dengan metode atau formula standar untuk lendutan elastis, dengan memperhitungkan pengaruh retak dan tulangan terhadap kekakuan struktur. Pada SNI

03-2847-2002 ditetapkan bahwa lendutan seketika dihitung dengan nilai momen inersia efektif I_e berdasar persamaan berikut:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left\{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right\} I_{cr} \quad (2.12)$$

dengan:

- I_e = Momen inersia efektif
- I_{cr} = Momen inersia penampang retak transformasi
- I_g = Momen inersia penampang utuh terhadap sumbu berat penampang, seluruh batang tulangan diabaikan
- M_a = Momen maksimum pada saat lendutan maksimum dihitung
- M_{cr} = Momen pada saat timbul retak pertama kali

Nilai M_{cr} dihitung dengan persamaan:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (2.13)$$

dengan:

- f_r = Modulus retak beton, untuk beton normal $f_r = 0,7\sqrt{f'_c}$.
- y_t = jarak dari garis netral penampang utuh ke serat tepi tarik

Nilai I_{cr} dihitung dengan persamaan:

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b y^3 + n A_s (d - y)^2 \quad (2.14)$$

dengan:

- b = Lebar penampang balok
- y = Garis netral daerah tekan terhadap serat tarik daerah tekan
- n = Jumlah tulangan
- A_s = Luas tulangan tarik
- d = Tinggi efektif balok

Nilai y dihitung dengan persamaan:

$$\frac{nA_s}{b} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{2bd}{nA_s}\right) - 1} \right] \quad (2.15)$$

Dari persamaan momen inersia efektif I_e tersebut dapat disimpulkan bahwa apabila nilai momen maksimum kurang dari momen retak M_{cr} , maka momen inersia penampang utuh menjadi faktor yang dominan. Sedangkan apabila momen maksimum lebih tinggi dari momen retak, momen inersia I_{cr} lebih menentukan. Nilai momen inersia efektif ini I_e terletak di antara I_{cr} dan I_g ($I_{cr} \leq I_e \leq I_g$).

2.6 Pengaruh Piropilit Pada Lendutan Balok Beton

Berdasar dari persamaan lendutan balok beton diketahui bahwa lendutan dipengaruhi oleh kondisi tumpuan yaitu panjang bentang perletakan, atau kondisi ujungnya. Selain itu juga dipengaruhi oleh jenis pembebanan, dan kekakuan lentur EI dari elemen. Dalam penelitian ini semua benda uji balok direncanakan dengan perletakan, sistem pembebanan dan dimensi penampang yang sama. Namun komposisi penyusun beton berbeda yaitu pada banyaknya penambahan piropilit dalam campurannya. Perbedaan komposisi penyusun tersebut berpengaruh pada kekakuan balok, sehingga menyebabkan perbedaan pada lendutan yang akan terjadi.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Anggraini, menunjukkan bahwa setelah dilakukan metode pengujian tekan terhadap benda uji laboratorium dan analisis data dengan uji anova serta regresi sehingga dapat diketahui hubungan antara penambahan piropilit dan kekuatan beton yang dihasilkan mencapai hingga 42% dari kekuatan awal pada penambahan piropilit 15%.

Dari peningkatan kuat tekan yang terjadi pada beton piropilit, maka terjadi pula peningkatan pada nilai modulus elastisitas beton. Pernyataan tersebut berdasarkan perhitungan modulus elastisitas pada beton normal menurut SNI-03-2847 (2002) yang dinyatakan sebagai $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$. Sehingga menurut teori tersebut dapat dikatakan bahwa beton dengan piropilit mempunyai nilai modulus elastisitas yang meningkat dibanding beton tanpa piropilit. Dengan nilai modulus elastisitas yang meningkat memberikan peningkatan pada kekakuan elemen. Balok beton akan menjadi kaku dan memberi efek pada besarnya lendutan yang terjadi. Dengan elemen balok yang lebih kaku lendutan yang terjadi semakin mengecil. Hal tersebut sesuai dengan persamaan lendutan yang menyatakan besarnya lendutan berbanding terbalik dengan kekakuan elemennya.

2.7 Hipotesis

Berdasar dari tinjauan pustaka di atas, dalam penelitian tentang pengaruh penggunaan piropilit terhadap lendutan balok beton bertulang, dapat diberikan hipotesis yaitu terdapat perbedaan lendutan maksimum yang signifikan antara hasil eksperimen dan perhitungan teoritis untuk setiap variasi persentase piropilit sebagai pengganti agregat halus