

**PENGARUH POSISI TULANGAN DENGAN LUAS  
TULANGAN YANG SAMA TERHADAP KAPASITAS BALOK  
(STUDI LITERATUR)**

**TUGAS AKHIR**

*Diajukan untuk melengkapi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Strata Satu  
(S-1) pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik  
Universitas HKBP Nommanssen Medan*

Disusun oleh:

**LEO NALDO DEQUELIO HUTAURUK**

(20310057)

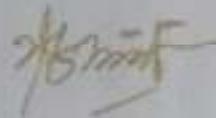
Telah diuji dihadapan Tim Penguji Tugas Akhir pada tanggal 30 Agustus 2024  
dan dinyatakan telah lulus sidang sarjana.

Dosen Pembimbing I



Ir. Johan O. Simanjuntak, S.T., M.T., IPM ASEAN Eng

Dosen Pembimbing II



Bartholomeus, ST., M.T.

Dosen Penguji I



Luki Hariando Purba, ST., M.Eng

Dosen Penguji II



Humisar Pasaribu, ST., MT

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Dambang Pangaribuana, MT

Ketua Program Studi



Ir. Yetty Riris Saragi, S.T., M.T., IPU, ACPE

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Perkembangan pesatnya suatu ilmu pengetahuan dan teknologi diberbagai bidang termasuk dalam bidang konstruksi, memacu negara-negara berkembang termasuk Indonesia untuk mengadakan pembangunan sarana dan prasarana yang dibutuhkan masyarakat. Hal ini juga mendorong para perencana untuk mendesain bangunan yang lebih ekonomis dan aman.

Beton bertulang merupakan gabungan dari dua jenis bahan, yaitu beton polos, yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi kekuatan tariknya rendah, dan batangan baja yang ditanamkan didalam beton yang dapat memberikan kekuatan Tarik yang diperlukan. Konstruksi balok biasanya berupa balok bertulang yang merupakan konstruksi yang sudah tidak asing dalam bidang teknik sipil. Hampir disetiap bangunan sipil baik itu gedung, jembatan maupun bangunan air, beton bertulang digunakan sebagai struktur utama maupun pelengkap. Pada beton bertulang, keruntuhan geser terjadi tanpa ada tanda-tandanya secara pasti sebelumnya. Hal ini sangat berbahaya maka harus dihindarkan

Pada suatu konstruksi bangunan gedung, balok berfungsi untuk menopang lantai di atasnya, balok juga berfungsi sebagai penyalur momen menuju kolom-kolom. Balok dikenal sebagai elemen lentur, yaitu elemen struktur yang dominan memikul gaya dalam berupa momen lentur dan juga geser.

Material beton mempunyai kekuatan yang baik dalam menahan gaya tekan tetapi lemah didalam menahan gaya tarik, oleh karenanya dipasang tulangan baja guna menambah kemampuan dalam menahan gaya Tarik pada daerah yang mengalami Tarik. Perencanaan dan pelaksanaan posisi tulangan tulangan pada beton bertulang merupakan aspek penting yang perlu diperhatikan. Adanya perubahan posisi tulangan dengan diameter yang sama pada pelaksanaan dapat mempengaruhi kekuatan balok.

Pada suatu pekerjaan konstruksi adanya temuan dilapangan bahwa tulangan Tarik ( $A_s$ ) dan tulangan tekan ( $A_s'$ ) dibuat dengan jumlah yang sama, jadi maka dari itu penulis tertarik menganalisis yakni pengaruh posisi tulangan terhadap kekuatan atau kapasitas dari balok.

### **1.2 Rumusan Masalah**

Identifikasi masalah yang ada, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut. Apa pengaruh posisi atau tata letak tulangan terhadap kekuatan balok

### 1.3 Tujuan Penelitian

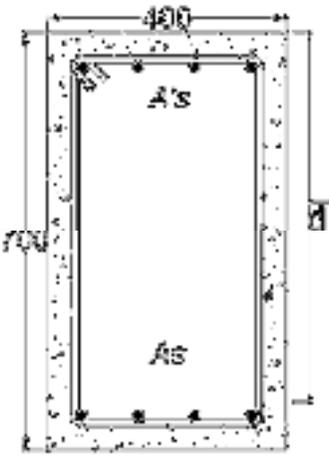
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh posisi atau tata letak dengan diameter dan jumlah tulangan yang sama terhadap kapasitas balok.

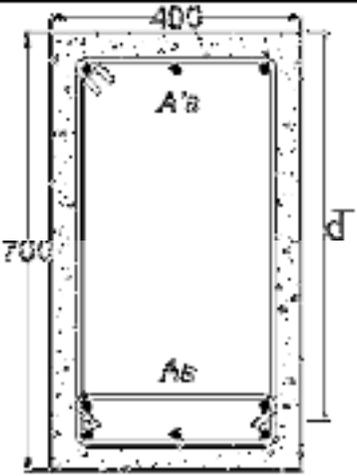
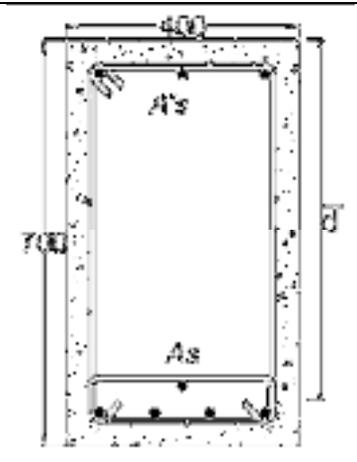
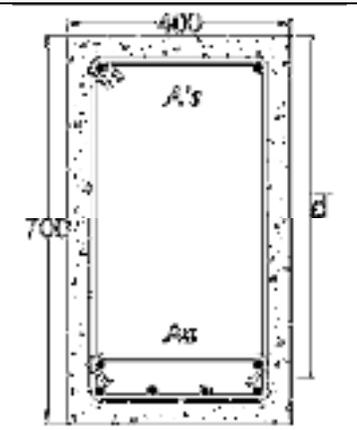
### 1.4 Manfaat Penelitian

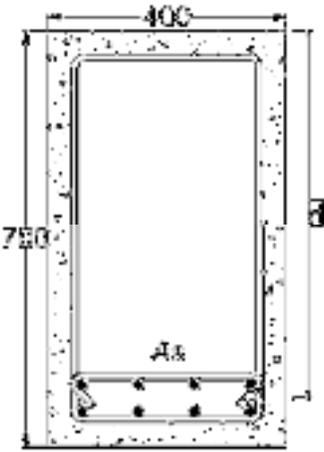
Manfaat dari penulisan tersebut adalah dapat menambah wawasan dan pengetahuan penulis melalui teori ilmu struktur balok dari perkuliahan dalam menganalisa baik perencanaan maupun pelaksanaan balok dilapangan melalu data analisa balok.

### 1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi beberapa hal antara lain:

No	Nama model	Gambar	keterangan
1	Model 1		<ul style="list-style-type: none"><li>• <math>A_s = 4D16</math></li><li>• <math>A'_s = 4D16</math></li><li>• Mutu beton (<math>f'_c</math>) 19 MPa</li><li>• Mutu baja (<math>f_y</math>) 400 MPa</li><li>• Jumlah tulangan 8 buah</li><li>• Menghitung momen penampang (<math>M_n</math>)</li></ul>

2	Model 2		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>A_s = 5D16</math></li> <li>• <math>A's = 3D16</math></li> <li>• Mutu beton (<math>f'c</math>) 19 MPa</li> <li>• Mutu baja (<math>f_y</math>) 400 MPa</li> <li>• Jumlah tulangan 8 buah</li> <li>• Menghitung momen penampang (<math>M_n</math>)</li> </ul>
3	Model 3		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>A_s = 5D16</math></li> <li>• <math>A's = 3D16</math></li> <li>• Mutu beton (<math>f'c</math>) 19 MPa</li> <li>• Mutu baja (<math>f_y</math>) 400 MPa</li> <li>• Jumlah tulangan 8 buah</li> <li>• Menghitung momen penampang (<math>M_n</math>)</li> </ul>
4	Model 4		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>A_s = 6D16</math></li> <li>• <math>A's = 2D16</math></li> <li>• Mutu beton (<math>f'c</math>) 19 MPa</li> <li>• Mutu baja (<math>f_y</math>) 400 MPa</li> <li>• Jumlah tulangan 8 buah</li> <li>• Menghitung momen penampang (<math>M_n</math>)</li> </ul>

5	Model 5		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>A_s = 8D16</math></li> <li>• Mutu beton (<math>f'_c</math>) 19 MPa</li> <li>• Mutu baja (<math>f_y</math>) 400 MPa</li> <li>• Jumlah tulangan 8 buah</li> <li>• Menghitung momen penampang (<math>M_n</math>)</li> </ul>
---	---------	---	---

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Struktur Beton Bertulang**

Proses desain suatu struktur secara garis besar dilakukan melalui dua tahapan yaitu menentukan gaya-gaya dalam yang bekerja pada struktur tersebut dengan menggunakan metode-metode analisis struktur yang tepat dan menentukan dimensi atau ukuran dari tiap elemen struktur secara ekonomis dengan mempertimbangkan faktor keamanan, stabilitas, kemampuan, serta fungsi dari struktur tersebut. Beton adalah salah satu jenis material yang paling sering digunakan dalam pembuatan berbagai jenis struktur.

Beton sendiri adalah material konstruksi yang diperoleh dari pencampuran pasir, kerikil atau batu pecah, semen serta air. Terkadang beberapa macam bahan tambahan dicampurkan ke dalam campuran tersebut dengan tujuan memperbaiki sifat-sifat beton, yakni antara lain untuk meningkatkan *workability*, *durability*, serta waktu pengerasan beton.

Campuran beton tersebut seiring dengan bertambahnya waktu akan menjadi keras seperti batuan, dan memiliki kuat tekan yang tinggi namun kuat tariknya rendah. Beton bertulang adalah kombinasi dari beton serta tulangan baja, yang bekerja secara bersama-sama untuk memikul beban yang ada. Tulangan baja akan memberikan kuat Tarik yang tidak dimiliki oleh beton. Selain itu tulangan baja juga mampu memikul beban tekan, seperti digunakan pada elemen kolom beton.

#### **2.2. Keuntungan dan Kerugian Beton Bertulang**

Beton bertulang sebagai salah satu material konstruksi dapat diaplikasikan dalam banyak bentuk atau tipe struktur. Namun demikian material ini juga memiliki beberapa keunggulan maupun kekurangan yang dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan pemilihan material konstruksi.

Beberapa keuntungan penggunaan material beton bertulang adalah:

- a. Memiliki kuat tekan yang tinggi
- b. Memiliki ketahanan api yang lebih baik dibandingkan dengan material baja, apabila disediakan selimut beton yang mencukupi.

- c. Membentuk struktur yang sangat kaku
- d. Memiliki umur layan yang panjang dengan biaya perawatan yang rendah
- e. Untuk beberapa tipe struktur seperti bendungan, pilar jembatan dan pondasi, beton bertulang merupakan pilihan material yang paling ekonomis.
- f. Beton dapat dicetak menjadi beragam bentuk penampang, sehingga sangat banyak digunakan dalam industry pracetak
- g. Tidak terlalu dibutuhkan tenaga kerja dengan keterampilan yang tinggi, apabila dibandingkan dengan struktur baja.

Disamping itu keunggulan-keunggulan tersebut, beton juga memiliki beberapa kekurangan:

- a. Beton memiliki kuat Tarik yang rendah, sekitar sepersepuluh dari kuat tekannya
- b. Agar dapat menjadi suatu elemen struktur, material penyusun beton perlu dicampur, dicetak dan setelah itu perlu dilakukan proses perawatan untuk mencapai kuat tekannya.
- c. Biaya pembuatan cetakan beton yang cukup tinggi, dapat menyamai harga beton yang dicetak.
- d. Ukuran atau dimensi penampang struktur beton umumnya lebih besar dibandingkan struktur baja, sehingga akan menghasilkan struktur yang lebih berat
- e. Adanya retakan pada beton akibat susut beton dan beban hidup yang bekerja
- f. Mutu beton sangat tergantung pada proses pencampuran material maupun proses pencetakan beton sendiri

### **2.3. Elemen Struktur Beton Bertulang**

Setiap struktur bangunan direncanakan dan didesain oleh arsitek maupun ahli teknik sipil, sedemikian rupa sehingga dapat memenuhi tuntutan fungsi bangunan dan dapat beroperasi dengan baik pada saat bangunan digunakan. Tuntutan dari suatu bangunan makin lama makin berkembang, pada saat ini suatu bangunan selain dituntut untuk memenuhi fungsi layannya, bangunan juga dituntut memiliki bentuk yang atraktif serta efisien dan ekonomis dari segi konstruksi maupun operasionalnya. Agar suatu bangunan struktur beton bertulang dapat berfungsi dengan baik, maka seorang perencana struktur wajib mendesain elemen-elemen strukturnya dengan benar dan tepat. Pada suatu struktur beton bertulang dikenal beberapa jenis elemen yang sering digunakan yaitu elemen pelat lantai, balok, kolom, dinding dan pondasi.

- Pelat lantai

Adalah suatu elemen horizontal utama yang berfungsi untuk menyalurkan beban hidup, baik yang bergerak maupun statis ke elemen pemikul beban vertical, yaitu balok, kolom, maupun dinding. Pelat lantai dapat direncanakan sehingga dapat berfungsi menyalurkan beban dalam satu arah (pelat satu arah, *one-way slab*) atau dapat pula direncanakan untuk menyalurkan beban dalam pelat dua arah (pelat dua arah, *two-way slab*). Tebal pelat umumnya jauh lebih kecil daripada ukuran panjang maupun lebarnya.

- Balok

Adalah elemen horizontal ataupun miring yang panjang dengan ukuran lebar serta tinggi yang terbatas. Balok berfungsi untuk menyalurkan beban dari pelat. Pada umumnya balok dicetak secara monolit dengan pelat lantai, sehingga akan membentuk balok penampang T pada balok interior dan balok penampang T pada balok-balok tepi.

- Kolom

Merupakan elemen penting yang memikul beban dari balok dan pelat. Kolom dapat memikul beban aksial saja, namun lebih sering kolom direncanakan sebagai pemikul beban kombinasi aksial dan lentur. Selain beban gravitasi, kolom juga dapat direncanakan sebagai pemikul beban lateral yang berasal dari beban gempa atau beban angin.

- Rangka

Adalah gabungan antara elemen balok dan rangka akan membentuk suatu system struktur rangka. System struktur rangka dapat merupakan struktur statis tertentu maupun statis tak tertentu.

- Dinding

Merupakan elemen pelat vertical yang dapat memikul beban gravitasi maupun beban lateral seperti dinding pada lantai *basemen*, atau dapat pula direncanakan memikul beban lateral gempa bumi yang sering dikenal dengan sebutan dinding geser (*shear wall*)

- Pondasi

Adalah elemen pemikul beban dari kolom yang kemudian menyalurkan ke lapisan tanah keras. Pondasi beton bertulang dapat juga berupa pelat setempat atau pondasi lajur. Pada bangunan yang berada pada lapisan tanah dengan daya dukung jelek, terkadang digunakan pula system pondasi rakit (*raft foundation*)

## 2.4. Standar Perencanaan

Proses perencanaan dan konstruksi suatu struktur bangunan pada umumnya diatur oleh suatu aturan tertentu, sesuai dengan lokasi struktur bangunan tersebut berada. Pada umumnya tiap negara memiliki peraturan masing-masing. Di Amerika Serikat, sebelum tahun 2000 dikenal tiga macam standar perencanaan bangunan yaitu *Uniform Building Code* (UBC), *Standard Building Code*, dan *Basic Building Code*. Ketiga macam peraturan ini mencakup persyaratan-persyaratan dalam proses desain suatu struktur bangunan. Setelah tahun 2000, ketiga macam peraturan ini digantikan oleh *International Building Code* (IBC) yang selalu diperbaharui 3 tahun. Sedangkan peraturan yang lebih spesifik untuk struktur beton bertulang diatur dalam *Building Code Requirements For Structural Concrete* (ACI 318-11). Di Indonesia sendiri peraturan desain struktur beton diatur dalam SNI 2847:2013 *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*, yang disusun dengan mengacu pada peraturan ACI. Konsep perencanaan yang dianut oleh SNI adalah berbasis kekuatan, atau yang lebih sering dikenal dengan metode LRFD (*Load And Resistance Factor Design*). Dengan menggunakan konsep ini, maka persyaratan dasar yang dipenuhi dalam desain adalah:

*Kuat Rencana*  $\geq$  *Kuat Perlu*

$$\phi (\text{Kuat Nominal}) \geq U \quad (2.1)$$

Kuat nominal menggambarkan tingkat kekuatan elemen struktur yang dapat dihitung dengan metode-metode konservatif yang telah distandarkan dalam peraturan, sedangkan kuat perlu  $U$ , dihitung dengan mempertimbangkan factor beban sesuai jenis beban yang bersangkutan, seperti beban mati  $D$ , beban hidup  $L$ , beban angin  $W$ , atau beban gempa  $E$ . Persamaan 2.1 berlaku secara umum untuk setiap elemen struktur yang dihitung. Secara khusus untuk elemen struktur yang memikul momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial, maka Persamaan 2.1 dapat dituliskan secara lebih khusus sebagai berikut:

$$\phi Mn \geq Mu \quad (2.1.a)$$

$$\phi Vn \geq Vu \quad (2.1.b)$$

$$\phi Pn \geq Pu \quad (2.1.c)$$

Indeks  $n$  menunjukkan kuat momen lentur, kuat geser dan kuat aksial nominal dari segi elemen yang ditinjau. Indeks  $u$  menunjukkan beban terfaktor dari momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial yang harus dipikul oleh elemen struktur tersebut. Untuk menghitung beban terfaktor pada sisi kanan persamaan tersebut, maka besarnya masing-masing beban dikalikan dengan factor beban yang bersesuaian dan dikombinasikan sesuai dengan standar peraturan yang berlaku.

## 2.5. Beban

Beban adalah gaya luar yang bekerja pada suatu struktur. Penentuan secara pasti besarnya beban yang bekerja pada suatu struktur selama umur layannya merupakan salah satu pekerjaan yang cukup sulit. Selain itu, pada umumnya penentuan besarnya beban hanya merupakan suatu estimasi saja. Meskipun beban yang bekerja pada suatu lokasi dari struktur dapat diketahui secara pasti, distribusi beban yang dari elemen ke elemen dalam suatu struktur pada umumnya memerlukan asumsi dan pendekatan. Jika beban-beban yang bekerja pada suatu struktur telah diestimasi, maka masalah berikutnya adalah menentukan kombinasi-kombinasi beban yang paling dominan yang mungkin bekerja pada struktur tersebut. Besar beban yang bekerja pada suatu struktur diatur oleh peraturan pembebanan yang berlaku. Beberapa jenis beban yang sering dijumpai antara lain:

- **Beban mati**

Adalah beban gravitasi yang berasal dari berat semua komponen gedung atau bangunan yang bersifat permanen selama masa layan struktur tersebut. Termasuk pula ke dalam jenis beban mati adalah unsur-unsur tambahan, mesin serta peralatan tetap yang tak terpisahkan dari gedung tersebut. Selain itu berat sendiri struktur, system perpipaan, jaringan listrik, penutup lantai, serta plafon juga termasuk jenis beban mati. Tabel 2.1 menampilkan contoh berat dari komponen bangunan penting yang digunakan untuk menentukan besarnya beban mati.

Tabel 2.1 berat sendiri bahan bangunan dan komponen gedung

Bahan bangunan	Berat
Baja	7850 kg/m <sup>3</sup>

Beton	2200 kg/m <sup>3</sup>
Beton bertulang	2400 kg/m <sup>3</sup>
Kayu (kelas I)	1000 kg/m <sup>3</sup>
Pasir (kering udara)	1600 kg/m <sup>3</sup>
<b>Komponen gedung</b>	
Spasi dari semen, per cm tebal	21 kg/ m <sup>2</sup>
Dinding bata merah ½ batu	250 kg/ m <sup>2</sup>
Penutup atap genting	50 kg/ m <sup>2</sup>
Penutup lantai ubin semen per cm tebal	24 kg/ m <sup>2</sup>

(Sumber: Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung, 1983)

- **Beban hidup**

Termasuk kedalam kategori beban gravitasi, yaitu jenis beban yang timbul akibat penggunaan suatu gedung selama masa layan gedung tersebut. Beban manusia, peralatan yang dapat dipindahkan, kendaraan bermotor, serta barang atau benda lain yang letaknya tidak permanen. Oleh karena besar dan lokasi beban hidup berubah-ubah, maka penentuan beban hidup dengan tepat merupakan suatu hal yang cukup sulit. Contoh-contoh beban hidup berdasarkan fungsi suatu bangunan ditunjukkan dalam Tabel 2.2

Tabel 2.2 beban hidup pada lantai gedung

No	Kegunaan bangunan	Berat
1	Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana	125 kg/ m <sup>2</sup>
2	Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, restoran, hotel, asrama, rumah sakit	250 kg/ m <sup>2</sup>
3	Lantai ruang olah raga	400 kg/ m <sup>2</sup>
4	Lantai pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, ruang mesin	400 kg/ m <sup>2</sup>

5	Lantai gedung parker bertingkat, untuk lantai bawah	800 kg/m <sup>2</sup>
---	---	-----------------------

(Sumber: Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung, 1983)

- **Beban angin**

Adalah beban yang timbul sebagai akibat adanya tekanan dari gerakan angin, beban angin sangat ditentukan oleh lokasi dan ketinggian dari struktur bangunan. Intensitas tekanan tiup yang direncanakan dapat diambil minimum sebesar 25 kg/m<sup>2</sup>, kecuali untuk kondisi berikut:

1. Tekanan tiup ditepi laut sampai sejauh 5 km dari pantai harus diambil sebesar minimum 40 kg/m<sup>2</sup>.
2. Untuk bangunan di daerah lain yang kemungkinan tekanan tiupnya lebih dari 40 kg/m<sup>2</sup>, harus diambil sebesar  $p = V^2/16$  (kg/m<sup>2</sup>), dengan  $V$  adalah kecepatan angin dalam m/s
3. Untuk cerobong, tekanan tiup dalam kg/m<sup>2</sup> harus ditentukan dengan rumus  $(42,5 + 0,6h)$  dengan  $h$  adalah tinggi cerobong seluruhnya dalam meter.

Nilai tekanan tiup yang diperoleh masih harus dikalikan dengan suatu koefisien angin, guna mendapatkan gaya resultan yang bekerja pada struktur.

- **Beban gempa**

Merupakan beban dalam arah horizontal dari struktur yang ditimbulkan oleh adanya gerakan tanah akibat gempa bumi, baik dalam arah vertical maupun horizontal. Pada beberapa kasus umumnya pengaruh gempa dalam arah horizontal lebih menentukan daripada pengaruh gempa arah vertical. Besarnya gaya gempa yang bekerja pada dasar struktur atau bangunan ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$V = C_s \cdot W \quad (2.2)$$

Dengan  $C$  adalah koefisien respons seismic yang ditentukan berdasarkan respons spectrum pada lokasi bangunan serta jenis system struktur yang digunakan, sedangkan  $W$  adalah berat seismic efektif yang berisi seluruh beban mati dan beban lainnya yang disyaratkan dalam peraturan mengenai gempa.

## 2.6. Kombinasi Beban

Setiap komponen struktur harus dirancang sedemikian rupa sehingga mampu memikul beban yang lebih besar daripada beban layan atau beban aktual guna memberikan jaminan keamanan terhadap kegagalan struktur. Dalam metode perencanaan berbasis kekuatan (*strength design method*), elemen struktur didesain untuk memikul beban terfaktor, yang diperoleh dengan mengalikan suatu faktor beban terhadap beban layan nominal. Karena beban mati dapat diestimasikan secara lebih akurat, maka faktor bebannya dipilih lebih kecil daripada beban hidup. Beban hidup memiliki derajat ketidakpastian yang lebih tinggi daripada beban mati.

Besaran faktor beban harus cukup untuk membatasi kegagalan struktur secara tiba-tiba, namun juga harus menghasilkan struktur yang seekonomis mungkin. Berdasarkan catatan penelitian yang telah dilakukan secara terus-menerus, serta berdasarkan ilmu-ilmu probabilitas, SNI mengadopsi penggunaan factor beban sebesar 1,2 untuk beban mati ( $D$ ), dan 1,6 untuk beban hidup ( $L$ ). nilai factor beban untuk beban mati diambil lebih kecil karena beban mati dapat dihitung dengan derajat kepastian yang lebih tinggi daripada beban hidup.

Berdasarkan persyaratan dalam SNI 2847:2013 pasal 9.2 besarnya kuat perlu ( $U$ ) yang harus dipertimbangkan sebagai kondisi paling kritis yang harus dipikul suatu elemen struktur adalah:

$$U = 1,4D \quad (2.3)$$

$$U = 1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } R) \quad (2.4)$$

$$U = 1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } R) + (1,0L \text{ atau } 0,5W) \quad (2.5)$$

$$U = 1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5(L_r \text{ atau } R) \quad (2.6)$$

$$U = 1,2D + 1,0E + 1,0L \quad (2.7)$$

$$U = 0,9D + 1,0W \quad (2.8)$$

$$U = 0,9D + 1,0E \quad (2.9)$$

Berikut adalah bebarapa catatan tambahan untuk kombinasi beban:

1. Nilai factor beban untuk  $L$  dalam persamaan 2.5, 2.6, 2.7 dapat direduksi menjadi  $0,5L$ , jika nilai  $L$  tidak lebih besar daripada  $4,8 \text{ kN/m}^2$  (atau  $500 \text{ kg/m}^2$ ). Disamping itu factor tersebut tidak boleh direduksi untuk area garasi atau area tempat public.
2. Apabila beban angin ( $W$ ) belum direduksi oleh factor arah, maka factor beban untuk beban angin dalam persamaan 2.6 harus diganti menjadi 1,6 dan dalam persamaan 2.5 diganti menjadi 0,8.

3. Untuk struktur yang memikul beban fluida, maka unsur beban fluida tersebut dapat dimasukkan dalam persamaan 2.3 hingga 2.7 dan 2.9 dengan factor beban yang sama dengan factor beban untuk beban mati.
4. Jika ada pengaruh tekanan tanah lateral ( $H$ ) maka ada tiga kemungkinan berikut:
  - a. Apabila  $H$  bekerja sendiri, atau menambah efek dari beban-beban lainnya, maka  $H$  harus dimasukkan dalam kombinasi pembebanan dengan factor beban sebesar 1,6.
  - b. Apabila  $H$  permanen dan bersifat melawan pengaruh dari beban-beban lain, maka  $H$  dapat dimasukkan dalam kombinasi pembebanan dengan menggunakan factor beban sebesar 0,9.
  - c. Jika  $H$  bersifat tidak permanen, namun pada saat  $H$  bekerja mempunyai sifat melawan beban-beban lainnya, maka  $H$  boleh tidak dimasukkan dalam kombinasi pembebanan.

## 2.7. Perencanaan Struktur Beton

Langkah awal dalam suatu perencanaan gedung atau bangunan adalah perencanaan denah atau layout bangunan oleh seorang arsitek. Arsitek membuat denah tiap lantai berikut rencana pengembangannya secara mendetail guna memenuhi tuntutan yang diinginkan oleh pemilik (*owner*). Apabila semua denah bangunan telah mendapat persetujuan dari pemilik maka selanjutnya perencana struktur menentukan system struktur yang mampu menjamin keamanan dan stabilitas struktur selama masa layan. Beberapa jenis tipe system struktur dapat diajukan guna mendapatkan solusi yang paling ekonomis berdasarkan ketersediaan material serta kondisi tanah.

Guna mendapatkan solusi tersebut, umumnya ditempuh beberapa tahapan berikut:

1. Membuat bodel struktur pemikul beban, berikut elemen-elemen strukturnya.
2. Melakukan perhitungan beban-beban yang mungkin bekerja pada struktur tersebut.
3. Melakukan analisis struktur menggunakan program computer ataupun dengan perhitungan manual untuk menentukan gaya-gaya maksimum yang terjadi seperti momen lentur, geser, torsi, gaya aksial ataupun gaya-gaya lain.
4. Menentukan dimensi elemen struktur serta menghitung pembesian yang diperlukan.
5. Membuat gambar struktur berikut spesifikasi material yang diperlukan serta gambar-gambar detail yang dibutuhkan sehingga memungkinkan kontraktor melakukan pekerjaan dengan tepat dan baik.

## 2.8. Material Penyusun Beton Bertulang

Untuk dapat memahami perilaku dan karakteristik material beton bertulang tersebut, terlebih dahulu harus dipahami sifat-sifat material penyusunnya. Secara umum material beton terbuat dari susunan semen, agregat serta air sebagai pereaksi. Di samping itu terkadang ditambahkan material tambahan (*admixture*) untuk meningkatkan sifat-sifat beton. Dalam bahasan berikut ini akan diperkenalkan material atau bahan-bahan penyusun beton, serta sifat-sifat mekanik dari beton itu sendiri.

### 2.8.1. Semen

Semen yang merupakan salah satu bahan dasar pembuatan beton tergolong kedalam jenis semen hidrolis. Jenis semen hidrolis yang banyak digunakan hingga saat ini adalah semen Portland yang dipatenkan di Inggris pada tahun 1824. Semen Portland adalah material berbentuk bubuk berwarna abu-abu dan banyak mengandung kalsium dan aluminium silika. Bahan dasar pembuat semen sebenarnya adalah batu kapur yang mengandung CaO, serta lempung atau tanah liat yang banyak mengandung SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Material-material ini dicampur dan ditambahkan gips dalam jumlah yang cukup, kemudian dibakar dalam klinker dan kemudian didinginkan. Selanjutnya material-material yang masih dalam bentuk batuan tersebut dihaluskan untuk memecah bongkahan batu menjadi serpihan yang lebih kecil. Kemudian material-material yang sudah dihaluskan tadi dimasukkan dan dicampur dalam suatu tungku berputar dan dibakar pada suhu sekitar 1550<sup>0</sup>C hingga menjadi bahan yang disebut dengan istilah klinker. Klinker kemudian didinginkan dan dihaluskan kembali hingga menjadi berbentuk serbuk. Klinker yang sudah halus dan dingin itu kemudian diberi bahan tambahan gips atau kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) sebanyak 2 hingga 4% sebagai bahan pengontrol waktu ikat semen. Pada tahap ini dapat pula ditambahkan bahan lain guna memperoleh sifat-sifat semen yang diinginkan, misalkan ditambah dengan kalsium klorida agar semen cepat mengeras. Selanjutnya tahap akhir dari proses manufaktur semen adalah tahap kemasan

Secara umum sesuai dengan standar dari *America Society for Testing And Materials* (ASTM), jenis semen yang ada dapat dikategorikan menjadi lima jenis:

- Tipe I

Jenis semen biasa yang dapat digunakan pada pekerjaan konstruksi umum

- Tipe II  
Merupakan modifikasi dari semen tipe I, yang memiliki panas hidrasi lebih rendah dan dapat tahan dari beberapa jenis serangan sulfat.
- Tipe III  
Merupakan tipe semen yang dapat menghasilkan kuat tekan beton awal yang tinggi. Setelah 24 jam proses pengecoran semen tipe ini akan menghasilkan kuat tekan dua kali lebih tinggi dari semen tipe biasa, namun panas hidrasi yang dihasilkan semen jenis ini lebih tinggi daripada panas hidrasi semen tipe I
- Tipe IV  
Merupakan semen yang mampu menghasilkan panas hidrasi yang rendah, sehingga cocok digunakan dalam proses pengecoran struktur beton yang massif.
- Tipe V  
Digunakan untuk struktur-struktur beton yang memerlukan ketahanan yang tinggi dari serangan sulfat.

Semen akan bereaksi apabila dicampur dengan air, dan akan mulai membentuk pasta yang secara perlahan akan mengeras menjadi suatu massa yang padat. Proses ini disebut dengan istilah proses hidrasi semen. Reaksi hidrasi semen berlangsung secara lambat antara 2 hingga 5 jam sebelum mengalami percepatan setelah kulit permukaan butiran semen pecah. Produk utama dari reaksi hidrasi semen adalah kalsium silikat hidrat yang tidak terlarut dalam air, serta kalsium hidroksida yang larut dalam air.

Agar reaksi hidrasi dapat berlangsung, pada umumnya dibutuhkan air sebanyak kurang lebih 25% dari berat semen. Tambahan air diperlukan untuk memberikan mobilitas pada air didalam pasta selama proses hidrasi sehingga dapat mencapai partikel semen, disamping itu air tambahan juga diperlukan untuk memberika kemudahan pengerjaan (*workability*) pada campuran beton. Untuk beton normal, rasio air semen pada umumnya berkisar antara 0,4 hingga 0,6, sedangkan untuk beton mutu tinggi rasio air semen biasanya diambil cukup rendah hingga 0,2. Untuk mengatasi masalah kemudahn pengerjaan, maka pada campuran beton mutu tinggi biasanya ditambahkan bahan kimia yang dikenal dengan istilah *admixture*.

### 2.8.2. Agregat

Pada suatu campuran beton normal, agregat menempati 70 hingga 75% volume beton yang mengeras. Sisanya ditempati oleh pasta semen, air yang tersisa dari reaksi hidrasi serta rongga udara. Secara umum semakin padat susunan agregat dalam campuran beton, maka beton yang dihasilkan akan makin tahan lama dan ekonomis. Oleh karena itu, agar dapat dipadatkan dengan baik, maka ukuran agregat harus dipilih sedemikian rupa sehingga memenuhi gradasi yang disarankan. Perlu juga diperhatikan bahwa agregat hendaknya memiliki kekuatan yang baik, awet dan tahan cuaca, disamping itu juga harus bersih dari kotoran, seperti lempung, tanah liat maupun kotoran organik lainnya.

Agregat alam secara umum diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu agregat kasar dan agregat halus. Agregat yang dapat melalui saringan No. 4 (4,75 mm) dapat diklasifikasikan sebagai agregat ringan. Sedangkan agregat yang tertahan disaringan No. 4 diklasifikasikan sebagai agregat kasar.

Pada campuran beton dengan menggunakan agregat normal, akan dihasilkan beton dengan berat jenis 2200 hingga 2400 kg/m<sup>3</sup>. Namun untuk tujuan tertentu, terkadang dapat digunakan dengan berat jenis yang lebih kecil atau lebih besar daripada berat jenis agregat normal. Beton yang memiliki berat jenis kurang dari 1800 kg/m<sup>3</sup> dikategorikan sebagai beton ringan. Penggunaan beton ringan dapat mengurangi beban mati suatu struktur beton atau mengurangi sifat penghantaran panasnya.

### **2.8.3. Air**

Air merupakan bahan yang penting juga dalam pembuatan suatu campuran beton. Air yang dicampur dengan semen akan membungkus agregat halus dan agregat kasar menjadi satu kesatuan. Pencampuran semen dan air akan menimbulkan suatu reaksi kimia yang disebut dengan istilah reaksi hidrasi. Dalam reaksi hidrasi komponen-komponen pokok dalam semen bereaksi dengan molekul air membentuk hidrat atau produk hidrasi. Dalam pembuatan campuran beton, hendaknya digunakan air bersih yang tidak tercampur dengan kotoran-kotoran kimia yang memungkinkan timbulnya reaksi samping dari reaksi hidrasi.

Perbandingan antara jumlah berat air dan berat semen (rasio air semen) memegang peranan vital dalam hal kuat tekan beton. Jumlah air yang terlalu banyak akan menurunkan mutu beton, sedangkan jumlah air yang sedikit akan menimbulkan permasalahan dalam pelaksanaan konstruksi, karena beton menjadi sulit dicetak. Karena beton harus cukup kuat dan mudah untuk

dicetak, maka keseimbangan perbandingan antara berat air dan semen harus mendapat perhatian yang cukup.

#### 2.8.4. Sifat Mekanik Beton

Setelah beton mengeras, beton sebagai material struktur memiliki beberapa sifat mekanik yang dapat dijadikan sebagai dasar untuk menentukan mutu atau kualitas beton tersebut. Berikut adalah beberapa sifat mekanik yang dimiliki oleh beton yang sudah mengeras

##### 1. Kuat Tekan

Dalam perencanaan suatu komponen struktur beton, biasanya diasumsikan bahwa beton memikul tegangan tekan. Oleh karena itu kuat tekan beton pada umumnya dijadikan acuan untuk menentukan mutu atau kualitas suatu material beton. Untuk menentukan besarnya kuat tekan beton dapat dilakukan uji kuat tekan dengan mengacu pada standar ASTM C39.

Nilai kuat tekan beton yang disyaratkan ( $f'c$ ) diperoleh dari benda uji silinder standar yang dirawat dan telah berumur 28 hari. Nilai kuat tekan inilah yang dicantumkan dalam gambar kerja. Untuk mencapai nilai kuat tekan yang disyaratkan ( $f'c$ ) maka nilai kuat tekan rerata ( $f'cr$ ) harus ditentukan sebagai berikut:

a. Untuk  $f'c$  kurang atau sama dengan 35 MPa, diambil nilai terbesar dari

$$\bullet f'cr = f'c + 1,35 S \quad (2.10a)$$

$$\bullet f'cr = f'c + 2,33 S - 3,5 \quad (2.10b)$$

b. Untuk  $f'c$  lebih dari 35 MPa, diambil nilai terbesar:

$$\bullet f'cr = f'c + 1,34 S \quad (2.11a)$$

$$\bullet f'cr = 0,9 f'c + 2,33 S \quad (2.11b)$$

dengan S adalah nilai deviasi standar

##### 2. Kuat Tarik

Beton merupakan material yang bersifat getas, dan tidak dapat memikul tegangan Tarik yang besar. Kapasitas Tarik beton yang rendah dapat dikaitkan dengan konsentrasi tegangan yang tinggi pada beton pada saat memikul beban, sehingga

pada bagian tertentu dari benda uji timbul tegangan yang sangat tinggi, mengakibatkan retak mikroskopik, sedangkan pada bagian lain benda uji mengalami tegangan yang rendah. Kuat Tarik belah dapat dihitung dengan rumus:

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi.L.D} \quad (2.12)$$

### 3. Kuat lentur

Eksperimen yang dilakukan pada balok beton menunjukkan bahwa kuat Tarik ultimit akibat lentur pada umumnya lebih tinggi dari pada kuat Tarik yang diperoleh dari hasil uji kuat Tarik belah. Kuat lentur sering dinyatakan sebagai modulus hancur beton (*modulus of rupture*)( $f_r$ ), yang menunjukkan kuat Tarik maksimum beton pada kondisi lentur.

$$f_r = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.13)$$

### 4. Modulus elastis

Modulus elastis ( $E_c$ ) merupakan property mekanik dari struktur beton yang sangat penting. Pengujian modulus elastis beton dilakukan terhadap benda uji berbentuk silinder. Pada benda uji silinder dipasang dial gauge untuk mengukur pemendekan yang terjadi pada benda uji, pembacaan dial dilakukan tiap interval tertentu. Untuk beton normal pada umumnya, nilai modulus elastisitas dapat diambil sebagai berikut:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (2.14)$$

#### 2.8.5. Susut dan Rangkak Beton

Pada beton yang sedang menahan beban akan terbentuk suatu hubungan regangan dan tegangan yang mempunyai fungsi dari waktu pembebanan. Beton menunjukkan sifat elastis murni hanya pada waktu menahan beban singkat. Sedangkan pada beban tidak singkat, sementara beton mengalami regangan dan tegangan akibat beban terjadi pula peningkatan regangan sesuai jangka waktu pembebanan yang disebut sebagai deformasi rangkak (*creep*). Rangkak adalah sifat dimana beton mengalami perubahan bentuk (deformasi) permanen akibat beban tetap yang bekerja padanya. Rangkak timbul dengan intensitas yang semakin berkurang untuk selang waktu tertentu dan kemungkinan berakhir setelah beberapa tahun berjalan.

Pada umumnya proses rangkak (*creep*) selalu dihubungkan dengan susut karena keduanya terjadi bersamaan dan sering-kali memberikan pengaruh sama, ialah deformasi yang

bertambah sesuai dengan berjalannya waktu. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya rangkai adalah:

- 1) Sifat bahan dasar
- 2) Rasio faktor air semen
- 3) Suhu pada waktu pengerasan
- 4) Kelembapan
- 5) Umur beton
- 6) Lama pembebanan
- 7) Nilai tegangan
- 8) Nilai banding luas permukaan dan volume komponen struktur
- 9) Nilai slump

#### **2.8.6. Baja Tulangan**

Tulangan baja, yang biasanya berupa batang baja bulat, diletakkan didalam beton, khususnya didaerah Tarik, untuk memikul gaya Tarik yang timbul dari beban eksternal yang bekerja pada struktur beton. Tulangan juga digunakan untuk meningkatkan tahanan tekan dari struktur beton. Harga tulangan baja lebih mahal daripada harga beton itu sendiri, namun tulangan baja memiliki kuat luluh hingga 10 kali kuat tekan beton.

Tulangan memanjang yang diletakkan dalam beton, dan berfungsi memikul gaya Tarik ataupun tekan yang terjadi, dinamakan sebagai tulangan utama. Pada elemen pelat, terkadang diberikan tulangan dalam arah tegak lurus tulangan utama yang disebut sebagai tulangan sekunder, atau tulangan pembagi. Pada elemen balok, terdapat tulangan dalam arah melintang dari tulangan utama, yang berfungsi untuk memikul gaya geser, tulangan ini disebut dengan tulangan geser atau tulangan sengkang.

Dalam aplikasi dilapangan, disarankan untuk menggunakan tulangan baja sirip untuk digunakan sebagai tulangan utama karena bentuk penampangnya yang bersirip mampu meningkatkan lekatan dengan beton serta mengurangi lebar retak beton pada daerah Tarik. Ukuran diameter tulangan baja tersedia dilapangan mulai dari diameter 6,8,10,13,16,19,22,25,29,32 hingga 50 mm. Mutu dari baja tulangan ditentukan berdasarkan kuat lelehnya ( $F_y$ ). Tabel 2.3 memberikan nilai mutu baja tulangan yang dapat digunakan dilapangan.

Tabel 2.3 Mutu tulangan baja

Jenis	Symbol	Kuat leleh minimum ( $f_y$ ) MPa	Kuat Tarik minimum ( $f_u$ ) MPa
Polos	BJ.TP 24	235	382
	BJ.TP 30	294	480
Deform	BJ.TD 24	235	382
	BJ.TD 30	294	480
	BJ.TD 35	343	490
	BJ.TD 40	392	559
	BJ.TD 50	490	618

(Sumber: SNI 03-6861.2-2002)

## 2.9. Desain Penampang Persegi

Pada dasarnya tujuan yang ingin dicapai dalam desain struktur beton bertulang adalah diperolehnya dimensi penampang beton serta penulangan (*reinforcement*) yang meliputi diameter, tegangan leleh ( $f_y$ ) dan jumlah penulangan. Karena beton lemah dalam menahan tarik dan baja sangat kuat menahan tarik maka tulangan diletakkan pada daerah tarik beton yang berfungsi sebagai tulangan utama atau sering disebut sebagai tulangan tarik ataupun tulangan pokok.

### 2.9.1. Pra Desain Minimum Penampang

Dimensi minimum penampang antara lain dipengaruhi oleh persyaratan defleksi dan tinggi penampang minimum balok tercantum dalam SNI 2847-2019 pasal 9.3.1 atau Tabel 2.4 dibawah, persyaratan selubung/ selimut beton (SNI 2847-2019 pasal 20.6.1.3) dan persyaratan spasi tulangan (SNI 2847-2019 pasal 25.2.1).

Tabel 2.4 Tinggi minimum balok non-prategang

No	Kondisi perlekatan	Tinggi penampang minimum (h)	Lebar penampang minimum (b)
1	Perlekatan sederhana	$L/16 - L/12$	$(1/2 - 2/3)h$
2	Menerus dan satu sisi	$L/18,5$	$(1/2 - 2/3)h$
3	Menerus dua sisi	$L/21$	$(1/2 - 2/3)h$
4	kantilever	$L/8$	$(1/2 - 2/3)h$

(Sumber: SNI-2847-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung)

### 2.9.2. Rasio tulangan

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 9.6.1.2, rasio tulangan ( $\rho$ ) pada penampang balok tidak boleh kurang dari :

1. Tulangan tunggal

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = A_s = \rho bd$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$$

$$\rho_{maks} = 0,75\rho_b$$

$$\rho_b = \frac{382,5 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{(600 + f_y) f_y} \quad (2.15)$$

Syarat keruntuhan Tarik  $\rho_{min} < \rho_a < \rho_{max}$

## 2. Tulangan rangkap

$$\rho' = \frac{A'_s}{bd} = A'_s = \rho' bd$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = A_s = \rho bd \quad (2.16)$$

2a. Untuk  $f'_s < f_y$ , maka tulangan tekan belum leleh,

$$f'_s = \varepsilon'_s \cdot E_s$$

$$(\rho - \rho') \leq \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \left( \frac{600}{600 - f'_s} \right) \left( \frac{d'}{d} \right)$$

2b. Untuk  $f'_s = f_y$ , maka tulangan tekan sudah leleh

$$(\rho - \rho') \geq \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) \left( \frac{d'}{d} \right)$$

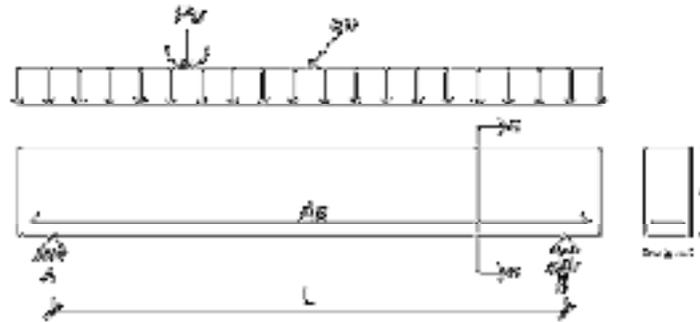
### 2.9.3. Syarat Jarak Tulangan

- Tulangan baja pada suatu penampang balok beton harus diletakkan sedemikian rupa sehingga jarak antar poros tulangan dalam satu lapis tidak kurang dari 25 mm.
- Jika kebutuhan tulangan cukup banyak dan harus disusun lebih dari satu lapis, maka jarak antar lapis tulangan dalam arah vertikal tidak boleh kurang dari 25 mm. persyaratan jarak antar tulangan ini tercantum pada ACI 318M-11 pasal 7.6.
- Selain itu lebar penampang balok juga harus memperhatikan tentang ketentuan tebal selimut beton yang disyaratkan. Dalam pasal 7.7 ACI 318M-11 disebutkan bahwa untuk penampang balok dan kolom dianjurkan mengambil selimut beton setebal 40 mm, sedangkan untuk pelat yang tidak berhubungan langsung dengan tanah dapat diambil selimut beton setebal 20 mm.

### 2.9.4. Desain Penampang Persegi Bertulangan Tunggal

Dalam proses perencanaan balok penampang persegi terlentur untuk  $f_y$  dan  $f'_c$  tertentu, yang harus ditetapkan lebih lanjut adalah dimensi lebar balok, tinggi balok, dan luas penampang tulangan. Perlu diketahui bahwa keputusan untuk menentukan nilai-nilai tersebut akan sangat dipengaruhi oleh batas ketentuan-ketentuan peraturan disamping juga pertimbangan teknis pelaksanaannya.

Dengan memanfaatkan hubungan internal yang sudah dikenal pada waktu membahas analisis balok, kemudian dilakukan modifikasi-modifikasi tertentu agar proses perencanaan dapat lebih disederhanakan. Penjelasa berikut akan menerangkan proses desain balok tulangan tunggal:



Gambar 2.1 Desain penampang balok persegi bertulang tunggal

$$\phi M_n = M_u = R_u b d^2 \quad (2.17)$$

Dengan :

$$R_u = \phi \rho f_y \left( 1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f'_c} \right) = \phi R_n \quad (2.18)$$

Dari persamaan-persamaan diatas maka untuk nilai  $M_u, f'_c, f_y$  akan ada tiga buah variable yang muncul, yaitu lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif balok ( $d$ ), serta rasio tulangan baja ( $\rho$ ). Bertolak dari hal tersebut maka dalam kasus desain penampang balok bertulang akan ditemui tiga macam kasus:

1. Jika nilai  $\rho$  diasumsikan, maka  $R_u$  dapat dihitung, sehingga nilai  $b d^2 = M_u / R_u$ . Rasio  $d/b$  umumnya berkisar 1 hingga, untuk keperluan praktis dapat diambil rasio  $d/b = 2$ . Sehingga setelah nilai  $b$  dan  $d$  ditentukan, maka luas tulangan  $A_s$  dapat dihitung ( $A_s = \rho b d$ ). Nilai  $\rho$  untuk balok bertulang tunggal diambil sama atau kurang dari  $\rho_{maks}$ . Jika  $b$  juga diasumsikan, maka nilai  $d$  dapat dihitung sebagai berikut:

$$d = \sqrt{\frac{M_u}{R_u b}} \quad (2.19)$$

2. Jika nilai  $b$  dan  $d$  sudah diberikan, nilai  $\rho$  dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{0,85f'c}{f_y} \left[ 1 - \sqrt{\frac{1-2R_n}{0,85f'c}} \right] \quad (2.20)$$

Apabila nilai  $b$  dan  $d$  sudah ada, maka sebaiknya harus diperiksa terlebih dahulu apakah tulangan tekan diperlukan atau tidak. Hal ini dapat diperiksa dengan urutan sebagai berikut:

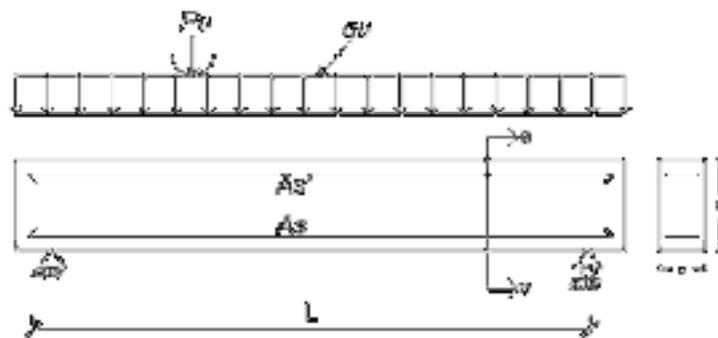
- a. Hitung nilai  $\rho_{maks}$  dan  $R_{umaks} = \phi \rho_{maks} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{maks} f_y}{1,7 f'c} \right) \right] f_y$
  - b. Hitung nilai  $\phi M_{n_{maks}} = R_u b d^2$  (kuat momen rencana balok tulangan tunggal)
  - c. Jika  $M_u < \phi M_n$ , maka tidak diperlukan tulangan tekan. Nilai  $A_s$  dan  $\rho$  dapat dihitung.
  - d. Jika  $M_u > \phi M_{n_{maks}}$ , maka diperlukan tulangan tekan.
3. Jika  $\rho$  dan  $b$  diketahui, nilai  $R_u$  dapat dihitung :

$$R_u = \phi \rho f_y \left( 1 - \frac{\rho f_y}{1,7 f'c} \right) \quad (2.21)$$

Selanjutnya nilai  $d$  dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.19.

### 2.9.5. Desain Penampang Persegi Bertulangan Rangkap

Suatu balok beton penampang persegi dapat didesain sedemikian rupa sehingga memiliki rasio tulangan sebesar  $\rho_{maks}$ . Dengan rasio tulangan sebesar  $\rho_{maks}$  ini, maka dapat dihitung besarnya kuat momen rencana yang dapat dihasilkan. Apabila momen lentur terfaktor yang bekerja masih lebih besar daripada kuat momen rencana tersebut, sedangkan ukuran tinggi dan lebar balok dibatasi, maka dapat dipasang tulangan tekan. Penjelasan berikut akan menerangkan proses desain balok beton tulangan rangkap:



Gambar 2.2 Desain penampang balok persegi bertulang rangkap

1. hitung rasio tulangan seimbang  $\rho_b$  dan rasio tulangan maksimum  $\rho_{maks}$  dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right)$$

Hitung  $A_{s_{maks}} = A_{s1} = \rho_{maks} b d$  (luas tulangan tunggal maksimum)

- Hitung  $R_{u_{maks}}$  menggunakan  $\rho_{maks}$  ( $\phi = 90$ )

$$R_{u_{maks}} = \phi \rho_{maks} f_y \left( 1 - \frac{\rho_{maks} f_y}{1,7 f'_c} \right)$$

- Hitung kuat momen rencana balok bertulang tunggal ( $M_u$ ) menggunakan ( $\rho_{maks}$ ) dan ( $R_{u_{maks}}$ )

$$M_{u1} = R_{u_{maks}} b d^2$$

Jika  $M_{u1} < M_u$ , maka diperlukan tulangan tekan, dan lanjutkan ke langkah berikutnya.

Jika  $M_{u1} > M_u$ , maka tidak perlu dipasang tulangan tekan

- Hitung  $M_{u2} = M_u - M_{u1}$  = kuat momen rencana yang dipikul oleh tulangan tekan
- Hitung  $A_{s2}$  dari hubungan  $M_{u2} = \phi A_{s2} f_y (d - d')$ , dan selanjutnya luas tulangan Tarik total ( $A_s$ ), adalah:  $A_s = A_{s1} + A_{s2}$
- Hitung tegangan pada tulangan tekan sebagai berikut:

- Hitung  $f'_s = 600 \frac{(c-d')}{c} \leq f_y$

- Atau nilai  $\epsilon'_s$  dapat dihitung dari diagram regangan, dan  $f'_s = \epsilon'_s \cdot E_s$ . Jika  $\epsilon'_s \geq \epsilon_y$ , maka tulangan tekan sudah leleh dan  $f'_s = f_y$

- Hitung  $A'_s$  dari  $M_{u2} = \phi A'_s f'_s (d - d')$ . Jika  $f'_s = f_y$ , maka  $A'_s = A_{s2}$ . Jika  $f'_s < f_y$ , maka  $A'_s > A_{s2}$  dan  $A'_s = A_{s2} \left( \frac{f_y}{f'_s} \right)$

- Pilih tulangan yang akan digunakan sebagai  $A_s$  dan  $A'_s$  yang mencukupi untuk lebar balok ( $b$ ). Pada beberapa kasus  $A_s$  dapat disusun dalam dua baris atau lebih
- Hitung tinggi balok  $h$  dan periksa bahwa  $\rho - \rho' \left( \frac{f'_s}{f_y} \right) < \rho_{maks}$
- Dapat dilakukan pemeriksaan akhir  $\phi M_n = M_u$ .
- Regangan pada tulangan dapat dihitung dengan persamaan

$$\epsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \cdot 0,003 \geq 0,005.$$

## 2.10. Analisis Lentur Balok Beton Bertulang

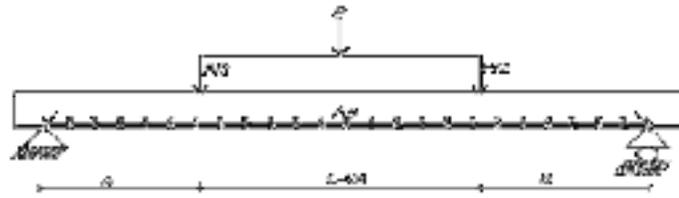
Sesuai dengan namanya yaitu beton bertulang, maka material ini dikategorikan sebagai suatu material non-homogen karena terbuat dari dua buah material yang berbeda yaitu beton dan

tulangan baja. Oleh karena itu metode yang digunakan untuk analisis suatu balok beton bertulang berbeda dari metode yang digunakan untuk menganalisis material yang homogen. Dalam proses analisis suatu balok beton bertulang dengan metode kekuatan (*Strength Design Method*) atau yang dikenal pula dengan metode ultimit, mengambil beberapa asumsi sebagai berikut:

- a. Regangan yang terjadi pada beton dan tulangan baja adalah sama, dengan anggapan berbentuk lekatan yang cukup antara tulangan baja dan beton
- b. Regangan pada beton berbanding lurus terhadap jaraknya kesumbu netral penampang
- c. Nilai modulus elastisitas ( $E_s$ ) tulangan baja dianggap sebesar 200.000 MPa, dengan tegangan yang timbul pada tulangan baja dalam daerah elastis sama dengan nilai regangan dikalikan dengan  $E_s$
- d. Penampang datar akan tetap datar setelah terjadi lentur
- e. Kuat Tarik beton diabaikan karena besarnya kuat Tarik beton hanya 10% dari nilai kuat tekannya
- f. Pada kondisi keruntuhan regangan maksimum yang terjadi pada serat tekan beton terluar, besarnya sama dengan 0,003
- g. Untuk perhitungan kuat rencana, bentuk dari distribusi tegangan tekan beton diasumsikan berupa persegi empat, sesuai dengan asumsi dalam SNI 2847:2013 pasal 10.2

### **2.10.1. Perilaku Balok Beton Bertulang**

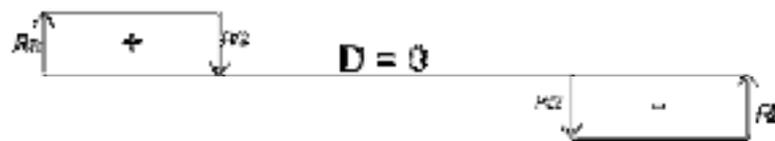
Balok beton polos pada umumnya tidak efisien untuk berfungsi sebagai komponen struktur lentur karena kuat tariknya yang jauh lebih kecil daripada kuat tekannya. Sebagai konsekuensi, balok beton polos tanpa tulangan akan mengalami kegagalan Tarik pada tingkat beban yang rendah, jauh sebelum beton mencapai kuat tekannya. Untuk alasan inilah tulangan baja diletakkan pada bagian penampang yang mengalami tegangan Tarik. Pada suatu balok beton bertulang, gaya Tarik yang timbul sebagai akibat dari momen lentur ditahan oleh tulangan baja, sedangkan beton sendiri bekerja menahan gaya tekan yang timbul. Perilaku tersebut dapat terjadi dengan anggapan bahwa antara tulangan baja dan beton terdapat lekatan yang cukup untuk mencegah terjadinya slip antara tulangan baja dan beton. Untuk menjamin terjadinya lekatan yang baik maka pada umumnya digunakan baja tulangan ulir.



(a) Retak lentur murni



(b) Bidang momen (momen maksimum)



(c) Bidang lintang

Gambar 2.3 Perilaku lentur balok

## 2.10.2. Batasan Regangan

Ketentuan mengenai perencanaan beton bertulang biasa maupun beton prategang dalam SNI 2847:2013 pasal 10.3, didasarkan pada konsep regangan yang terjadi pada penampang beton dan tulangan baja. Secara umum ada tiga macam jenis penampang yang dapat didefinisikan:

1. Kondisi regangan seimbang (*balanced strain condition*). Kondisi ini terjadi pada suatu penampang ketika tulangan baja Tarik mencapai regangan luluh ( $\epsilon_y$ ), sedangkan beton yang tertekan mencapai regangan ultimitnya sebesar 0,003. Penampang demikian dinamakan sebagai penampang seimbang.

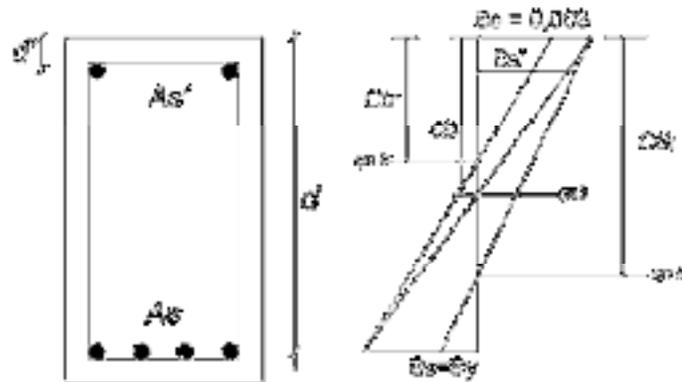
Syarat :  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$  ;  $\epsilon_s = \epsilon_y$  (kegagalan secara tiba-tiba tanpa ada tanda-tanda)

2. Penampang terkendali tekan (*compression controlled section*). Ini terjadi apabila regangan tulangan Tarik terluar sama atau kurang dari batasan regangan yang diijinkan, sedangkan beton mencapai regangan ultimit sebesar 0,003. Untuk tulangan baja dengan  $f_y = 400$  MPa, batasan regangan tekan sama dengan 0,002. Kasus ini umumnya terjadi pada komponen struktur kolom yang menerima gaya aksial dan momen lentur.

Syarat :  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$  ;  $\epsilon_s < \epsilon_y$  (kegagalan secara tiba-tiba tanpa ada tanda-tanda)

3. Penampang terkendali Tarik (*tension controlled section*). Ini terjadi ketika regangan baja mencapai 0,005 atau lebih, yang terjadi ketika beton mencapai regangan ultimitnya sebesar 0,003.

Syarat :  $\epsilon_c < \epsilon_{cu}$  ;  $\epsilon_s = \epsilon_y$  (kegagalan ditandai dengan lendutan yang makin lama makin besar sampai runtuh)



Gambar 2.4 Jenis-jenis keruntuhan balok beton bertulang akibat lentur

Penampang lain yang berada diantara penampang terkendali tekan dan terkendali tarik, dinamakan berada pada daerah transisi. Di samping itu ditambahkan pula bahwa regangan tarik ( $\epsilon_t$ ) pada kuat nominal di daerah transisi, tidak boleh kurang dari 0,004 untuk setiap komponen struktur lentur tanpa beban aksial, ataupun bila ada beban aksial tidak melebihi  $0,10f'c.A_g$ , dengan  $A_g$  adalah luasa gross penampang beton

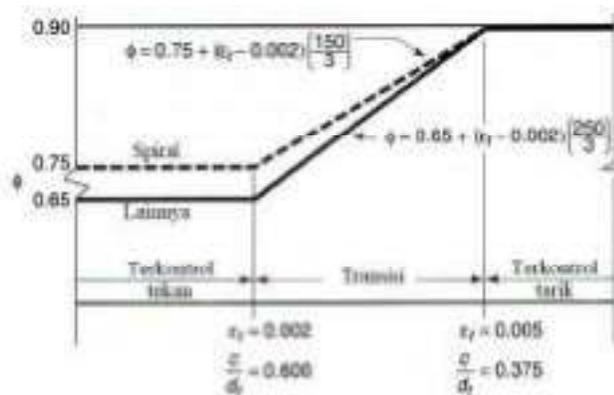
### 2.10.3. Faktor Reduksi Kekuatan

Kuat nominal dari suatu komponen struktur (baik yang memikul lentur, beban aksial, geser maupun puntir), yang dihitung berdasarkan kaidah-kaidah yang berlaku, harus dikalikan dengan suatu faktor reduksi yang besarnya kurang dari satu. Hasil kali antara kuat nominal dengan faktor reduksi disebut dengan istilah kuat rencana. Penggunaan faktor reduksi dilakukan dengan mengingat beberapa hal berikut:

1. Untuk mengantisipasi segala ketidakpastian dari kuat nominal penampang akibat dimensi, material, serta ketidakakuratan persamaan-persamaan dalam perencanaan.
2. Untuk merefleksikan tingkat daktilitas dan keandalan komponen struktur akibat efek yang ditimbulkan oleh beban kerja.
3. Untuk merefleksikan tingkat kepentingan suatu komponen struktur.

Dalam SNI 2847:2013 pasal 9.3 digunakan beberapa nilai faktor reduksi kekuatan ( $\phi$ ) sebagai berikut:

- Untuk penampang terkendali tarik  $\phi = 0,9$
- Untuk penampang terkendali tekan
  - a. Dengan tulangan spiral  $\phi = 0,75$
  - b. Tulangan non-spiral  $\phi = 0,65$
- Untuk geser dan puntir  $\phi = 0,75$
- Untuk tumpu pada beton  $\phi = 0,65$



Gambar 2.5 variasi nilai  $\phi$  regangan tarik netto pada tulangan tarik terjauh ( $\epsilon_t$ )

#### 2.10.4. Distribusi Tegangan Tekan Ekuivalen

Hubungan antara tegangan dan regangan tekan beton dapat dihitung berdasarkan kurva pengujian tegangan-regangan, atau dapat diasumsikan berbentuk persegi empat, trapesium, parabola atau bentuk lain yang dapat merepresentasikan kuat lentur dari penampang.

Dalam analisis maupun desain penampang beton, maka dalam SNI 2847:2013 pasal 10.2.7, diijinkan untuk menggunakan distribusi blok tegangan ekuivalen berbentuk empat persegi panjang untuk perhitungan kuat lentur nominal. Model blok tegangan tersebut sering juga dikenal sebagai blok tegangan Whitney, yang pertama kali diperkenalkan dalam jurnal ACI di tahun 1937. Blok tegangan tersebut didefinisikan sebagai berikut:

1. Tegangan tekan merata sebesar  $0,85f'_c$  diasumsikan terdistribusi merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan suatu garis lurus yang sejajar sumbu netral sejarak  $a = \beta_1 \cdot C$  dari serat beton yang mengalami regangan tekan maksimum.

2. Jarak  $C$  dari serat dengan regangan tekan maksimum kesumbu netral harus diukur tegak lurus sumbu tersebut.

3. Faktor  $\beta_1$  dapat dihitung sebagai berikut:

a. Untuk kuat tekan beton ( $f'c$ ) kurang atau sama dengan 28 MPa

$$\beta_1 = 0,85 \quad (2.22)$$

b. Untuk  $28 \text{ MPa} < f'c < 56 \text{ MPa}$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left( \frac{f'c - 28}{7} \right) \quad (2.23)$$

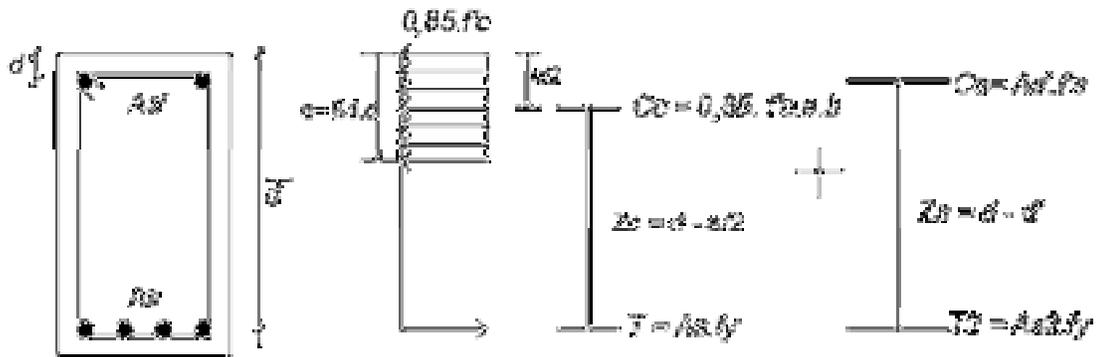
c. Untuk  $f'c$  lebih dari 56 MPa

$$\beta_1 = 0,65 \quad (2.24)$$

Untuk suatu daerah tekan persegi dengan lebar  $b$  dan tinggi sumbu netral  $c$ , maka resultan gaya tekan yang terjadi adalah:

$$C = 0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \quad (2.25)$$

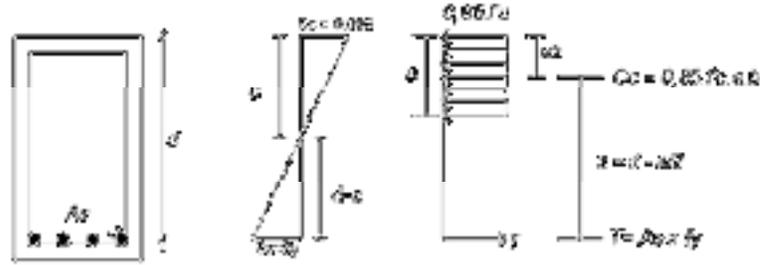
Pada Gambar 2.6 ditunjukkan model blok tegangan beton yang diusulkan oleh Whitney dan diadopsi pula dalam peraturan SNI 2847:2013.



Gambar 2.6 Blok tegangan ekuivalen

### 2.10.5. Analisis Penampang Persegi Bertulangan Tunggal

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa kondisi seimbang tercapai apabila tulangan baja luluh pada saat beton mencapai regangan ultimitnya sebesar 0,003, artinya pada saat ini tulangan baja mencapai luluhnya  $\epsilon_y = fy/Es$ .



Gambar 2.7 Penampang persegi pada kondisi seimbang

Dari diagram regangan pada gambar 2.7 maka dengan menggunakan perbandingan segitiga akan diperoleh hubungan berikut:

$$\frac{C_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + f_y/E_s} \quad (2.26)$$

Atau jika nilai  $E_s$  diambil sebesar 200.000 MPa, maka:

$$C_b = \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \cdot d \quad (2.27)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan kesetimbangan gaya, maka dapat dituliskan:

$$C = T$$

$$0,85 \cdot f'_c \cdot a_b \cdot b = A_{s_b} \cdot f_y \quad (2.28)$$

Atau jika dituliskan untuk nilai  $a_b$ :

$$a_b = \frac{A_{s_b} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.29)$$

Persentase tulangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan kondisi seimbang disebut sebagai rasio tulangan seimbang ( $\rho_b$ ). Nilai ( $\rho_b$ ) sama dengan luas tulangan baja dibagi dengan luas penampang efektif:

$$\rho_b = \frac{A_{s_b}}{bd} \quad (2.30)$$

Dengan :

b = lebar penampang yang tertekan

d = jarak dari serat tekan terluar ke titik berat tulangan baja tarik

Substitusikan nilai  $A_{s_b}$  ke dalam Persamaan 2.28 :

$$0,85 \cdot f'_c \cdot a_b \cdot b = f_y \cdot \rho_b \cdot b \cdot d \quad (2.31)$$

Atau

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'_c}{d \cdot f_y} \cdot a_b = \frac{0,85 \cdot f'_c}{d \cdot f_y} \cdot \beta_1 \cdot C_b \quad (2.32)$$

Selanjutnya substitusikan nilai  $C_b$  dari Persamaan 2.27, untuk mendapatkan persamaan umum rasio tulangan seimbang ( $\rho_b$ ):

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.33)$$

Secara umum, momen nominal dari suatu balok persegi bertulang tunggal dihitung dengan mengalikan nilai  $C$  atau  $T$  pada Gambar 2.7 dengan jarak antara kedua gaya tersebut.

Maka :

$$Mn = C \cdot z = T \cdot z$$

Atau

$$Mn = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \left( d - \frac{a}{2} \right) = A_s \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.34)$$

Nilai  $a$ , dihitung lebih dahulu dari Persamaan 2.29. Untuk mendapatkan besarnya kuat rencana ( $\phi Mn$ ), maka kuat momen nominal ( $Mn$ ) harus direduksi dengan cara dikalikan dengan faktor reduksi ( $\phi$ ):

$$\phi Mn = \phi A_s \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) = \phi A_s \cdot f_y \left( d - \frac{A_s \cdot f_y}{1,7 \cdot f'_c \cdot b} \right) \quad (2.35)$$

Karena  $A_s = \rho b d$ , maka persamaan 2.35 dapat dituliskan pula dalam variabel rasio tulangan baja sebagai berikut:

$$\phi Mn = \phi f_y \cdot \rho b d \left( d - \frac{\rho b d \cdot f_y}{1,7 \cdot f'_c \cdot b} \right) = \phi \rho \cdot f_y \cdot b d^2 \left( 1 - \frac{\rho f_y}{1,7 f'_c} \right) \quad (2.36)$$

Persamaan tersebut dapat dituliskan secara ringkas menjadi:

$$\phi Mn = R_u b d^2 \quad (2.37)$$

Dengan

$$R_u = \phi \rho \cdot f_y \left( 1 - \frac{\rho f_y}{1,7 f'_c} \right) \quad (2.38)$$

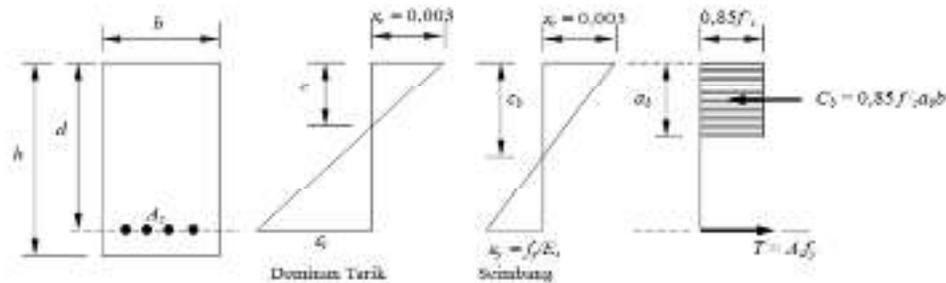
Selanjutnya akan ditinjau batasan persentase tulangan baja yang diinginkan dalam suatu komponen struktur lentur, balok persegi bertulang tunggal. Sebelum tahun 2002, ACI menyatakan bahwa tulangan tarik maksimum yang diijinkan bagi sebuah balok adalah sebesar 0,75 kali luas tulangan baja pada kondisi seimbang ( $0,75 \rho_b$ ). Hal serupa dianut pula dalam SNI Beton Indonesia (03-2847-2002). Namun dalam edisi terakhir ACI 318M-11 atau SNI 2847:2013 pasal 10.3.5 disyaratkan bahwa nilai ( $\epsilon_t$ ) pada kondisi kuat lentur nominal harus lebih besar atau sama dengan 0,004. Syarat ini berlaku untuk balok beton non-prategang serta komponen struktur yang memikul beban aksial kurang dari  $0,1 f'_c A_g$ .

Regangan penampang pada kondisi seimbang ditunjukkan dalam Gambar 2.8, dari hubungan yang sudah diturunkan sebelumnya diperoleh:

$$C_b = \frac{a_b}{\beta_1} = \frac{(A_{sb} \cdot f_y)}{0,85 \cdot f'c \cdot \beta_1 \cdot b} = \frac{\rho_b \cdot f_y d}{0,85 \cdot f'c \cdot \beta_1} \quad (2.39)$$

Dengan cara yang identik diperoleh pula hubungan:

$$C = \frac{\rho \cdot f_y d}{0,85 \cdot f'c \cdot \beta_1} \quad (2.40)$$



Gambar 2.8 Penampang seimbang dan penampang terkendali tarik

Dari kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan perbandingan antara  $C$  dan  $C_b$ :

$$\frac{c}{c_b} = \frac{\rho}{\rho_b} \quad (2.41)$$

Apabila kedua ruas dibagi dengan  $d$ , maka diperoleh:

$$\frac{c}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} = \frac{c_b}{d} \quad (2.42)$$

Dari Gambar 2.8 dengan menggunakan perbandingan segitiga, didapatkan persamaan:

$$\frac{c}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \varepsilon_t} \quad (2.43)$$

Dan didapatkan pula:

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + f_y/E_s} \quad (2.44)$$

Selanjutnya dari persamaan 2.42 dan 2.44 :

$$\frac{c}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} = \frac{c_b}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} \left( \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \right) \quad (2.45)$$

Substitusikan Persamaan 2.45 ke dalam 2.43, dan susun kembali persamaannya sehingga diperoleh hubungan berikut:

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \frac{0,003 + f_y/E_s}{0,003 + \varepsilon_t} \quad (2.46)$$

Dalam hal desain balok atau komponen struktur lentur lainnya, batas maksimum rasio tulangan dapat diambil dengan menggunakan nilai  $\varepsilon_t = 0,005$ , sehingga dari persamaan 2.46 dapat dirumuskan :

$$\rho_{maks} = \left( \frac{0,003 + f_y/E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.47)$$

Jika tulangan baja mempunyai  $f_y = 400$  MPa dan  $E_s = 200.000$  MPa, maka  $\rho_{maks} = 0,625\rho_b$ . Dengan menggunakan batasan tersebut, maka penampang akan dikategorikan sebagai penampang terkendali tarik, dan nilai faktor reduksi ( $\phi$ ) dapat diambil sebesar 0,9. Sedangkan balok atau komponen struktur dengan  $\rho > \rho_{maks}$ , akan menghasilkan ( $\epsilon_t$ ) yang kurang dari 0,005. Dalam SNI 2847:2013 pasal 10.3 mensyaratkan nilai  $\epsilon_t$  tidak boleh kurang dari 0,004, untuk menjamin tingkat daktilitas serta memperlihatkan tanda-tanda yang nampak secara visual sebelum terjadinya keruntuhan. Bila nilai ( $\epsilon_t$ ) diambil sebesar 0,004, maka persamaan 2.46 akan menjadi:

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \frac{0,003 + f_y/E_s}{0,007} \quad (2.48)$$

Tabel 2.5 menunjukkan nilai  $\rho$  dan  $R_u (= M_u/bd^2)$  untuk penampang terkendali tarik  $\epsilon_t = 0,005$  dan nilai faktor reduksi  $\phi = 0,9$ . Sedangkan Tabel 2.6 menunjukkan nilai  $\rho$  dan  $R_u$  untuk penampang daerah transisi dengan  $\epsilon = 0,004$ ,  $f_y = 400$  MPa dan nilai  $\phi = 0,817$ .

Tabel 2.5 Nilai  $\rho$  dan  $R_u (= M_u/bd^2)$  untuk penampang terkendali tarik  $\epsilon_t = 0,005$  dan  $\phi = 0,9$

$F'c$ (MPa)	$F_y$ (MPa)	$\beta_1$	$\rho_b$	$\rho_{maks}$	$R_u$ (MPa)
20	400	0,850	0,0217	0,01355	4,100
25	400	0,850	0,0271	0,01693	5,125
30	400	0,836	0,0320	0,01998	6,065
35	400	0,800	0,0357	0,02231	6,828
40	400	0,764	0,0390	0,02436	7,513

(Sumber: Buku Agus Setiawan)

Tabel 2.6 Nilai  $\rho$  dan  $R_u$  untuk penampang daerah transisi  $\epsilon_t = 0,004$ , dan  $\phi = 0,817$ .

$F'c$ (MPa)	$F_y$ (MPa)	$\beta_1$	$\rho_b$	$\rho_{maks}$	$R_u$ (MPa)
20	400	0,850	0,0217	0,01548	4,138
25	400	0,850	0,0271	0,01935	5,173
30	400	0,836	0,0320	0,02283	6,126
35	400	0,800	0,0357	0,02550	6,905

40	400	0,764	0,0390	0,02784	7,609
----	-----	-------	--------	---------	-------

(Sumber: Buku Agus Setiawan)

### 2.10.6. Analisis Penampang Persegi dengan Tulangan Rangkap

Apabila penampang dikehendaki untuk menopang beban yang lebih besar dari kapasitasnya, sedangkan dilain pihak seringkali pertimbangan teknis pelaksanaan dan arsitektural membatasi dimensi balok, maka diperlukan usaha-usaha lain untuk memperbesar kuat momen penampang balok yang sudah tertentu dimensinya. Apabila hal demikian yang dihadapi, SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.3 ayat 4 memperbolehkan penambahan tulangan baja tarik dari batas nilai  $\rho_{maks}$  bersamaan dengan penambahan tulangan baja didaerah tekan penampang balok. Hasilnya adalah balok dengan penulangan rangkap dimana tulangan baja dipasang didaerah tarik dan tulangan tekan didaerah tekan. Pada keadaan demikian berarti tulangan baja tekan bermanfaat untuk memperbesar kekuatan balok.

Namun demikian ada empat keuntungan yang dapat diperoleh dengan menambahkan tulangan tekan pada penampang beton bertulang, yaitu:

1. Mengurangi lendutan jangka panjang

Fungsi utama yang paling penting dari penambahan tulangan tekan adalah mengurangi lendutan jangka panjang akibat beban yang secara kontinu bekerja pada balok.

2. Meningkatkan daktilitas

Adanya tulangan tekan akan mengurangi tinggi blok tegangan tekan ekuivalen beton ( $a$ ). Dengan berkurangnya ( $a$ ), maka regangan pada tulangan tarik akan naik, dan menghasilkan perilaku beton yang lebih daktil.

3. Menghasilkan keruntuhan tarik pada struktur.

Ketika  $\rho > \rho_b$ , maka balok akan mengalami keruntuhan yang bersifat getas, ketika daerah beton hancur sebelum tulangan baja mengalami luluh. Apabila pada balok tersebut diberi tulangan tekan yang mencukupi, maka kehancuran beton dapat dicegah hingga tulangan baja tarik dapat mengalami luluh terlebih dahulu. Pada kasus ini balok akan mengalami keruntuhan daktil

4. Memudahkan dalam fabrikasi

Pada umumnya suatu balok beton bertulang diberi tulangan geser, untuk menempatkan tulangan geser pada posisi yang tepat didalam bekisting, biasanya tulangan geser diikatkan pada suatu tulangan memanjang disudut-sudutnya. Apabila tulangan memanjang ini diberi panjang penyaluran yang mencukupi, maka tulangan dapat pula berperan sebagai tulangan tekan, meskipun pada umumnya tulangan ini diabaikan dalam proses desain karena hanya memberikan sumbangan kecil pada kuat momen nominal penampang.

Dalam masalah analisis balok beton bertulang rangkap, biasanya terdapat dua kasus yang berbeda tergantung pada kondisi tulangan tekan. Apakah tulangan tekan tersebut sudah luluh atau belum

**a. Tulangan tekan sudah luluh**

Momen internal balok bertulangan rangkap dapat dibedakan menjadi dua macam.  $Mu_1$  adalah momen internal yang dihasilkan dari gaya tekan pada beton dan gaya tarik ekuivalen pada tulangan baja ( $A_{s1}$ ). Sedangkan  $Mu_2$  merupakan momen internal tambahan yang diperoleh dari gaya tekan pada tulangan tekan ( $A_{s'}$ ) dan gaya tarik tambahan ( $A_{s2}$ ).

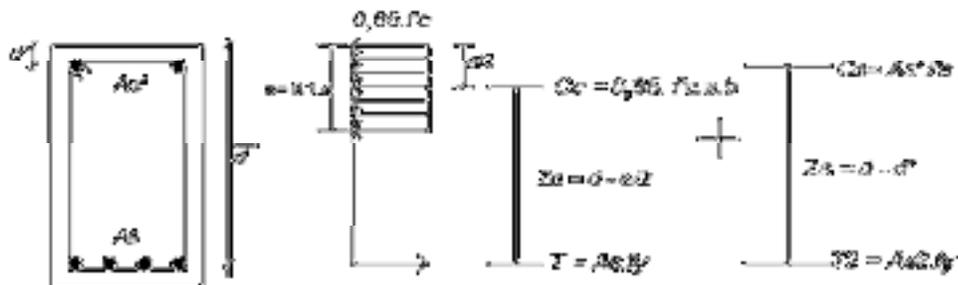
Momen  $Mu_1$  merupakan momen yang diperoleh dari balok bertulangan tunggal sebagai berikut:

$$T_1 = C_c$$

$$A_{s1} \cdot f_y = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b$$

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \tag{2.49}$$

$$M_{u1} = \phi \cdot A_{s1} \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \tag{2.50}$$



Gambar 2.9 Penampang persegi dengan tulangan rangkap

Syarat batasan tulangan untuk  $A_{s1}$ , adalah bahwa harus dipenuhi ( $\rho_1 = A_{s1}/bd$ ) <  $\rho_{maks}$ , untuk penampang terkendali tarik dari balok bertulangan tunggal. Selanjutnya  $Mu_2$  dapat dihitung dengan mengasumsikan tulangan tekan ( $A_s'$ ) sudah luluh:

$$M_{u2} = \phi \cdot A_{s2} \cdot f_y(d - d') = \phi \cdot A_s' \cdot f_y(d - d') \quad (2.51)$$

Dalam hal ini  $A_{s2} = A_s'$ , menghasilkan gaya yang sama besar namun berlawanan arah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9. Dan akhirnya momen nominal total dari suatu balok bertulang rangkap diperoleh dengan menjumlahkan  $Mu_1$  dan  $Mu_2$ :

$$\phi M_n = M_{u1} + M_{u2} = \phi \left[ A_{s1} f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \right] \quad (2.52)$$

Luas total tulangan baja tarik yang digunakan adalah jumlah dari  $A_{s1}$  dan  $A_{s2}$ , sehingga :

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = A_{s1} + A_s' \quad (2.53)$$

Atau

$$A_{s1} = A_s - A_s' \quad (2.54)$$

Selanjutnya persamaan 2.49 dan 2.52 dapat dituliskan dalam bentuk:

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b} \quad (2.55)$$

$$\phi M_n = M_{u1} + M_{u2} = \phi \left[ (A_s - A_s') f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \right] \quad (2.56)$$

Serta diperoleh syarat batas maksimum rasio tulangan:

$$(\rho - \rho') < \rho_{maks} = \rho_b \left( \frac{0,003 + f_y/E_s}{0,008} \right) \quad (2.57)$$

Dalam analisis yang sudah dilakukan, digunakan asumsi bahwa tulangan tekan sudah luluh, apabila tulangan tekan sudah luluh maka dipenuhi:

$$\epsilon_s' \geq \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

Dari kesamaan segitiga diatas sumbu netral, serta dengan menggunakan  $E_s = 200.000$  MPa, maka :

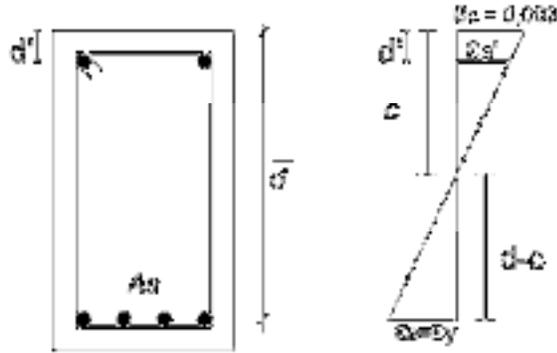
$$\frac{c}{d'} = \frac{0,003}{0,003 - \frac{f_y}{E_s}} = \frac{600}{600 - f_y}$$

Atau

$$c = \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) \cdot d' \quad (2.58)$$

Mengingat bahwa:  $A_{s1} f_y = 0,85 \cdot f'c \cdot ab$

Serta :  $A_{s1} = A_s - A_s'$  dan  $\rho_1 = \rho - \rho'$



Gambar 2.10 Diagram regangan balok beton tulangan rangkap

Maka dapat diperoleh hubungan berikut:

$$(\rho - \rho') b d f_y = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \quad (2.59)$$

Atau

$$(\rho - \rho') = 0,85 \left( \frac{f'_c}{f_y} \right) \left( \frac{a}{d} \right) \quad (2.60)$$

Dengan mengingat pula hubungan  $a = \beta_1 c$ , serta dari Persamaan 2.58, maka diperoleh:

$$a = \beta_1 c = \beta_1 \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) \cdot d' \quad (2.61)$$

Maka Persamaan 2.60 dapat dituliskan kembali menjadi:

$$(\rho - \rho') = 0,85 \beta_1 \left( \frac{f'_c}{f_y} \right) \left( \frac{d'}{d} \right) \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) = K \quad (2.62)$$

Apabila nilai  $(\rho - \rho')$  lebih besar daripada nilai disisi kanan Persamaan 2.62, maka tulangan tekan dapat dinyatakan sudah luluh.

Selain itu, dari Persamaan 2.62 dapat diturunkan suatu syarat pemeriksaan apakah tulangan tekan sudah luluh atau belum, yaitu:

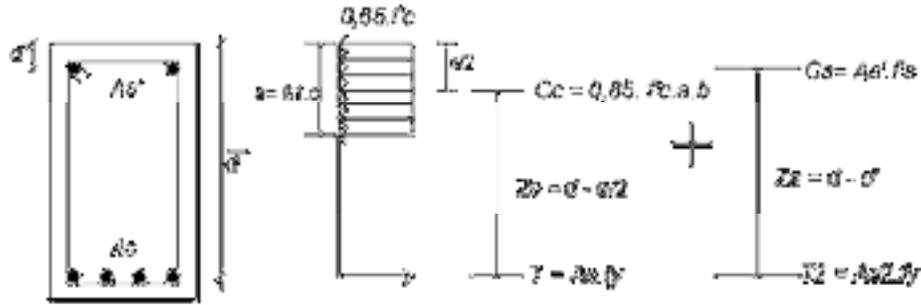
$$(\rho - \rho') \geq 0,85 \beta_1 \left( \frac{f'_c}{f_y} \right) \left( \frac{d'}{d} \right) \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) = K \quad (2.63)$$

Ini adalah kondisi tulangan tekan sudah mencapai kuat luluhnya.

#### b. Tulangan Tekan Belum Luluh

Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa apabila:

$$(\rho - \rho') < 0,85 \beta_1 \left( \frac{f'_c}{f_y} \right) \left( \frac{d'}{d} \right) \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) = K \quad (2.64)$$



Gambar 2.11 Analisis balok tulangan rangkap

Maka tulangan baja belum luluh. Dapat dikatakan bahwa jika  $(\rho - \rho') < K$ , tulangan baja tarik akan luluh sebelum beton mencapai regangan maksimumnya sebesar 0,003, dan regangan pada tulangan tekan ( $\epsilon_s'$ ), belum mencapai ( $\epsilon_y$ ) pada saat terjadi keruntuhan. Luluhnya tulangan tekan juga dipengaruhi oleh letaknya terhadap serat terluar ( $d'$ ). Semakin tinggi rasio  $d'/c$  berarti tulangan tekan semakin dekat dengan sumbu netral, maka semakin kecil kemungkinan tulangan tekan mencapai luluhnya

Dari Gambar 2.10, dengan menggunakan perbandingan segitiga, diperoleh:

$$\epsilon_s' = 0,003 \left( \frac{c-d'}{c} \right) \quad f_s' = E_s \epsilon_s' = 200.000(0,003) \left( \frac{c-d'}{c} \right) = 600 \left( \frac{c-d'}{c} \right)$$

Dengan memperhitungkan luas beton yang ditempati oleh tulangan baja, maka dapat dituliskan rumusan untuk besarnya gaya tekan pada tulangan ( $C_s$ ) dan gaya tekan pada beton ( $C_c$ ), sebagai berikut:

$$C_s = A_s'(f_s' - 0,85f'c) = A_s' \left[ 600 \left( \frac{c-d'}{c} \right) - 0,85f'c \right] \quad (2.65)$$

$$C_c = 0,85 . f'c . \beta_1 . c . b \quad (2.66)$$

Karena  $T = A_s f_y = C_s + C_c$ , maka:

$$A_s f_y = 0,85 f'c . \beta_1 c b + A_s' \left[ 600 \left( \frac{c-d'}{c} \right) - 0,85 f'c \right] \quad (2.67)$$

Apabila diatur kembali, maka persamaan iatas dapat dituliskan dalam bentuk:

$$(0,85 f'c' b \beta_1) c^2 + (600 A_s' - A_s f_y) c - 600 d' A_s' = 0$$

Nilai C dapat dihitung dengan rumus ABC sederhana, yaitu

$$C = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Dengan diketahui  $c, f's, a, C_c$  dan  $C_s$  dapat dihitung, demikian pula dengan kuat momen rencana penampang:

$$\phi M_n = \phi \left[ C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right] \quad (2.68)$$

Bila tulangan tekan belum luluh,  $f_s' < f_y$ , maka luas total tulangan tarik yang dibutuhkan untuk suatu penampang persegi adalah:

$$\text{Maks } A_s = \rho_{maks} b d + A_s' \frac{f_s'}{f_y} = b d \left( \rho_{maks} + \frac{\rho' f_s'}{f_y} \right) \quad (2.69)$$

Atau jika dinyatakan dalam rasio tulangan, maka persamaan 2.69 dapat dibagi dengan  $b d$ :

$$\left( \rho - \rho' \cdot \frac{f_s'}{f_y} \right) \quad (2.70)$$

Rumus dalam menganalisis balok tulangan rangkap:

1. Anggap bahwa segenap penulangan meluluh, maka  $f_s' = f_y$ ;  $A_s = A_s2$
2. Dengan menggunakan persamaan pasangan kopel beton tekan dan tulangan baja tarik, dan  $A_{s1} = A_s - A_s'$ , hitung tinggi blok tegangan tekan ( $a$ )

$$a = \frac{A_{s1} \times f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b} = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b}$$

3. Tentukan letak garis netral ( $c$ )

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

4. Dengan menggunakan diagram regangan memeriksa regangan tulangan baja tekan maupun tarik, untuk membuktikan apakah anggapan pada langkah awal benar.

$$\epsilon s' = \frac{c - d'}{c} (0,003)$$

$$\epsilon s = \frac{(d - c)}{c} (0,003)$$

Dengan menganggap  $\epsilon s \geq \epsilon y$  yang berarti tulangan baja tarik telah meluluh, akan timbul salah satu dari dua kondisi berikut ini:

- a. Kondisi I, jika  $\epsilon s' \geq \epsilon y$  menunjukkan bahwa anggapan pada langkah awal benar dan tulangan baja tekan meluluh.
- b. Kondisi II, Jika  $\epsilon s' \leq \epsilon y$  menunjukkan bahwa anggapan pada langkah awal tidak benar dan tulangan baja tekan belum meluluh

### **Kondisi I**

5. Apabila  $\varepsilon_s'$  dan  $\varepsilon_s$  keduanya melampaui  $\varepsilon_y$ , hitunglah kapasitas momen teoritis  $Mn_1$  dan  $Mn_2$ .

- Untuk pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan tarik :  $Mn_1 = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \left( d - \frac{a}{2} \right) = As_1 \cdot fy \left( d - \frac{a}{2} \right)$
- Untuk pasangan kopel gaya tulangan tekan dan tarik:  
 $Mn_2 = As' \cdot f's (d - d') = As_2 \cdot fy (d - d')$   
 Dengan demikian  $Mn \text{ total} = Mn_1 + Mn_2$

### Kondisi II

5) Jika  $\varepsilon_s' \leq \varepsilon_y$  dan  $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$ , untuk mendapatkan nilai (c) digunakan persamaan sebagai berikut:

$$(0,85f'c'b\beta_1)c^2 + (600As' - Asfy)c - 600d'As' = 0$$

Nilai C dapat dihitung dengan rumus ABC sederhana, yaitu

$$C = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

6) Menghitung tegangan pada tulangan baja tekan,

$$fs' = \frac{c-d'}{c} (600)$$

7) Dapatkan nilai (a) dengan menggunakan persamaan  $a = \beta_1 \cdot c$

8) Menghitung gaya-gaya tekan

$$Cc = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b$$

$$Cs = As' \cdot fs'$$

Menghitung gaya tarik

$$T = As \cdot fy$$

$$\text{Dimana } Cc + Cs = T$$

9) Menghitung kuat momen penampang

$$Mn_1 = Cc \times \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$Mn_2 = Cs \times (d - d')$$

$$Mn \text{ total} = Mn_1 + Mn_2$$

### 2.11. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu membantu mempermudah dalam menentukan langkah-langkah yang sistematis dalam penyusunan penelitian dari segi konsep. Penelitian terdahulu digunakan sebagai

acuan atau referensi untuk memudahkan membuat penelitian secara keseluruhan. Penelitian terdahulu tentang pengaruh posisi tulangan terhadap kapasitas balok.

Tabel 2.7. Penelitian Terdahulu

No	Nama peneliti	Judul penelitian	Kesimpulan
1	Farah Aziza Beladiena	Pengaruh Tata Letak Konversi Tulangan Terhadap Kekuatan Balok Lentur	Hubungan pengaruh tata letak dan konversi tulangan adalah semakin banyak tulangan Tarik pada serat terluar maka semakin besar nilai $d$ dan apabila nilai $d$ semakin besar maka semakin besar juga nilai momen tahanan.
2	Dhevi Yuniar Putri	Pengaruh Letak Tulangan Dua Lapis Pada Daerah Tekan Balok Lentur	Pada hasil diagram tegangan-regangan balok menunjukkan bahwa selimut beton dari jarak tulangan dua lapis sangat berpengaruh terhadap kekuatan balok karena jika balok mengalami rompal ( <i>spalling</i> ) dan letak tulangan dua lapis pada daerah tekan semakin jauh maka balok akan mengalami penurunan kekuatan hal ini terjadi karena tinggi efektif balok semakin kecil.
3	Jaya Permana <sup>1</sup> , M. Muhtaris <sup>2</sup> , Eka Susanti <sup>3</sup> , dan Yanisfa <sup>4</sup>	Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Terhadap Momen Kapasitas Lentur Dan Daktilitas Balok	Penambahan tulangan tekan dapat meningkatkan momen kapasitas lentur dan daktilitas.

### BAB III

#### METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Prosedur Analisis Balok Tulangan Tunggal

Tahapan-tahapan perhitungan dalam analisis balok tunggal secara detail sebagai berikut:

- a) Buat daftar hal hal yang diketahui seperti: dimensi penampang, mutu beton, mutu baja, diameter tulangan pokok, diameter tulangan sengkang, jumlah tulangan.
- b) Menghitung rasio tulangan, dengan membagi antara luas tulangan dengan hasil perkalian dari lebar balok dan tinggi efektif balok.
- c) Bandingkan hasil rasio tulangan dengan rasio tulangan maksimum juga terhadap rasio tulangan minimum, untuk menentukan apakah penampang memenuhi syarat.
- d) Hitung kedalaman blok tegangan beton tekan, dengan membagi dari hasil perkalian antara luas tulangan dengan mutu baja dan konstanta dikali mutu beton dan lebar balok.
- e) Hitung panjang lengan kopel momen, dengan hasil pengurangan dari tinggi efektif balok dengan setengah dari kedalaman blok tegangan beton tekan.
- f) Hitung momen tahanan ideal ( $M_n$ )

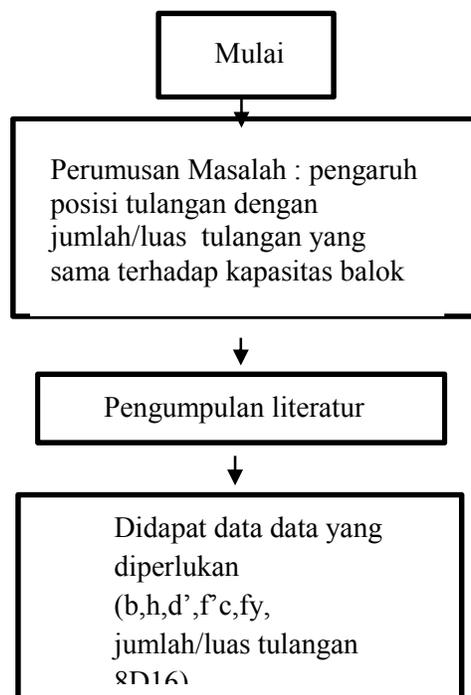
### 3.2. Prosedur Analisis Balok Tulangan Rangkap

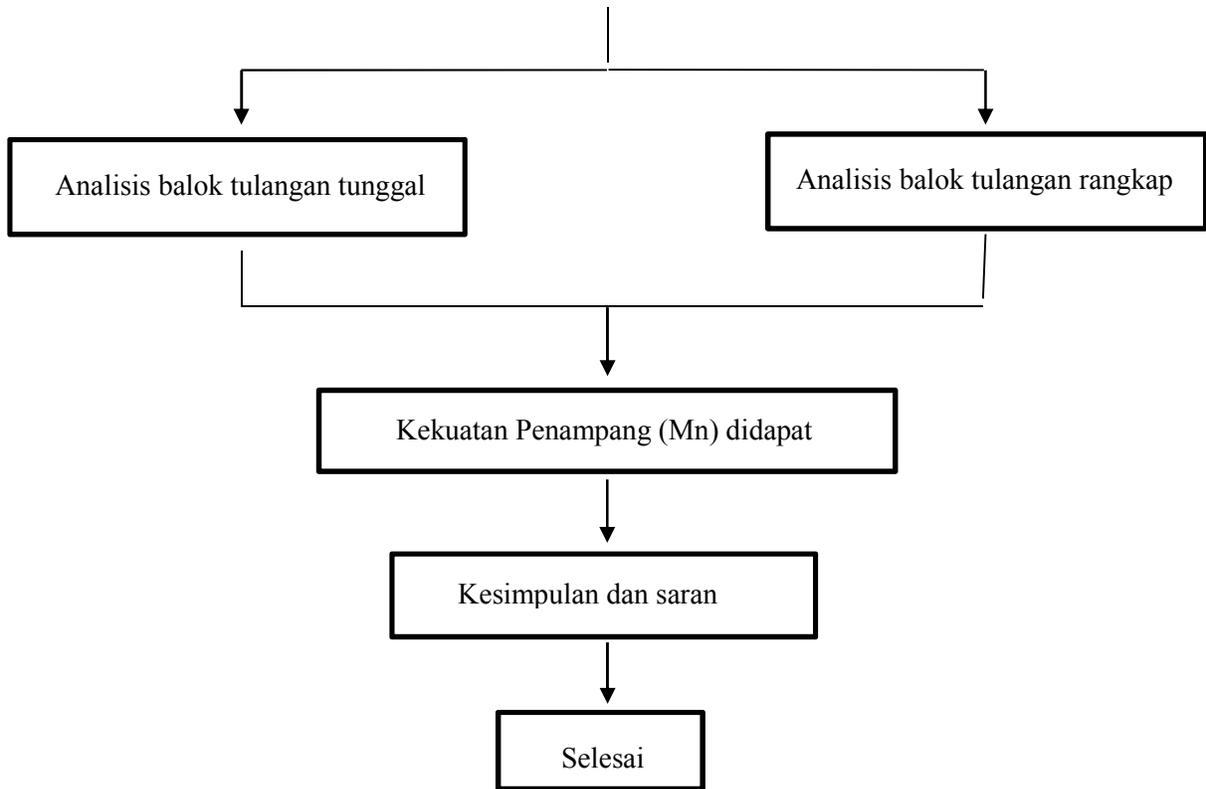
Tahapan-tahapan perhitungan dalam analisis balok rangkap secara detail sebagai berikut:

- a) Buat daftar hal hal yang diketahui seperti: dimensi penampang, mutu beton, mutu baja, diameter tulangan pokok, diameter tulangan sengkang, jumlah tulangan.
- b) Hitunglah tinggi blok tegangan tekan ( $a$ ), dengan membagi hasil perkalian antara luas tulangan dengan mutu baja dan konstanta dengan mutu beton dan lebar balok
- c) Tentukan letak garis netral, dengan membagi nilai tinggi blok dengan factor reduksi
- d) Dengan menggunakan diagram regangan memeriksa regangan tulangan baja tekan maupun tarik, untuk mengetahui apakah tulangan sudah luluh atau belum.
- e) Kondisi I, Jika regangan tekan lebih besar atau sama dengan regangan luluhnya, maka tulangan baja tekan sudah meluluh.
- f) Kondisi II, Jika regangan tekan kurang dari atau sama dengan regangan luluhnya, maka tulangan baja belum luluh.
- g) Apabila regangan tekan sudah luluh (Kondisi I), hitunglah kapasitas momen ( $M_{n1}$  dan  $M_{n2}$ ).

- h) Untuk pasangan kopel gaya tulangan tekan dan Tarik, dengan cara luas tulangan tekan dikali mutu baja dikali dengan hasil pengurangan jarak sisi terluar beton tekan ke tulangan Tarik dengan jarak dari sisi terluar beton tekan ke tulangan tekan
- i) Untuk pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan Tarik, dengan cara tulangan Tarik dikali mutu baja dikali dengan hasil pengurangan jarak sisi terluar beton tekan ke tulangan Tarik dengan setengah tinggi blok tekan
- j) Pada kondisi I, nilai total momen kapasitas yaitu penjumlahan dari setiap momen kapasitas yang terjadi pada masing-masing pasangan kopel gaya
- k) Jika terjadi seperti kondisi II, tentukan letak garis netral
- l) Menghitung tegangan pada tulangan baja tekan
- m) Menghitung gaya-gaya tekan
- n) Menghitung kuat momen tahanan ideal untuk masing-masing kopel

### 3.3 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.3 Diagram alir penelitian