



Analisis dan Desain Balok Beton Bertulang Menggunakan Tabel Berdasarkan SNI 2847:2019

Christina H. K. Mailangkay^{#a}, Reky S. Windah^{#b}, Servie O. Dapas^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^akeziamaillangkaymsl@gmail.com; ^brekywindah@gmail.com; ^cservie.jo@gmail.com

Abstrak

Perhitungan tulangan balok dengan menggunakan cara tabel dapat mempermudah dan mempercepat dalam mendesain tulangan lentur balok persegi beton bertulang. Dengan cara tabel dan mengacu pada SNI 2847:2019, maka dapat mendesain tulangan lentur pada balok dengan data nilai f_c' , f_y , dan nilai dimensi penampang balok (b , h , d) apabila diketahui momen ultimatenya. Selain itu dengan cara tabel dapat juga dilakukan analisis untuk menentukan nilai momen ultimatenya apabila diketahui besaran tulangan tarik dan tulangan tekannya. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa hasil perhitungan dengan menggunakan cara tabel hasilnya hampir sama dengan hasil dari perhitungan cara manual.

Kata kunci: analisis, desain, tabel penulangan balok, tulangan tunggal, tulangan rangkap

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Balok beton merupakan salah satu bagian struktur yang mempunyai fungsi untuk menopang lantai di atasnya serta sebagai penerus beban menuju kolom. Apabila beban yang dipikul oleh balok semakin bertambah maka akan mengakibatkan timbulnya keruntuhan elemen struktur, yaitu pada saat beban yang dipikul telah melebihi batas maksimum. Oleh karena itu, penampang balok harus direncanakan dan didesain sedemikian rupa sehingga ketika beban bekerja pada balok maka balok tidak akan mengalami retak yang berlebihan dan masih mempunyai keamanan yang cukup serta kekuatan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami keruntuhan.

Proses mendesain balok beton bertulang sendiri memerlukan proses yang panjang, dengan menggunakan bantuan tabel maka dapat mempermudah dan mempercepat dalam mendesain tulangan lentur balok persegi beton bertulang. Tetapi untuk penggunaan perhitungan penulangan pada balok beton yang terakhir yaitu dengan tabel CUR (Peraturan Beton 90), dan setelah itu belum ada lagi perhitungan tulangan balok beton dengan menggunakan tabel.

Dengan mengacu pada SNI 2847 : 2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, menggunakan rumus – rumus dasar yang ada maka disusunlah tabel untuk perhitungan tulangan pada balok. Kolom pertama merupakan perbandingan garis netral dengan tinggi efektif (c/d), kolom kedua merupakan perbandingan momen ultimit dengan dimensi balok (M_u/bd), kolom ketiga merupakan rasio tulangan tekan, kolom keempat merupakan rasio tulangan tarik, dan kolom kelima merupakan perbandingan rasio tulangan tekan dengan rasio tulangan tarik.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat diambil permasalahan dalam penulisan tugas akhir

ini yaitu : “Bagaimana menghitung tulangan balok beton dengan cepat menggunakan tabel tulangan beton yang mengacu pada SNI”.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini yaitu meliputi :

1. Peraturan yang digunakan adalah SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan.
2. Perhitungan akan menggunakan cara manual dan cara tabel.
3. Pembuatan tabel tulangan beton akan berdasarkan pada SNI yang berlaku.
4. Pembuatan tabel tulangan hanya untuk mutu kuat tekan beton (f_c') 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa, dan mutu kuat leleh baja (f_y) 400 MPa.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Menganalisa dan mendesain balok beton bertulang dengan menggunakan tabel penulangan beton berdasarkan SNI 2847:2019.
2. Membuat tabel tulangan beton berdasarkan SNI 2847:2019.
3. Mengevaluasi hasil perbandingan perhitungan balok beton bertulang dengan menggunakan cara manual dan cara tabel.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penulisan tugas akhir ini yaitu, dapat memberikan informasi dan referensi terkait perhitungan tulangan pada balok beton dengan cara menggunakan tabel tulangan beton berdasarkan SNI.

2. Metodologi Penelitian

2.1. Studi Literatur

Dalam perencanaan ini, pedoman perencanaan yang digunakan diambil dari berbagai sumber sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Studi literatur dan pedoman yang digunakan adalah SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan dan juga diambil dari buku, jurnal dan artikel yang menunjang konsep penelitian.

2.2. Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan untuk pembuatan tabel tulangan yaitu mutu beton (f_c') dipakai 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa, 30MPa, 35 Mpa dan 40 MPa, mutu baja (f_y) dipakai 400 MPa, $\gamma = 0,8$, dan $\phi = 0,9$ untuk penampang terkendali tarik (SNI 2847:2019 pasal 21.2.2).

2.3. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam proses penelitian ini. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

3. Kajian Literatur

3.1. Balok Beton Bertulang

Balok adalah salah satu elemen utama penyusun struktur yang terpasang secara horizontal/lateral. Jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada balok lentur berdasarkan sifat-sifat penampang balok, dapat dibedakan menjadi 3 jenis yaitu :

- a. Keruntuhan Tekan (Over-Reinforced)

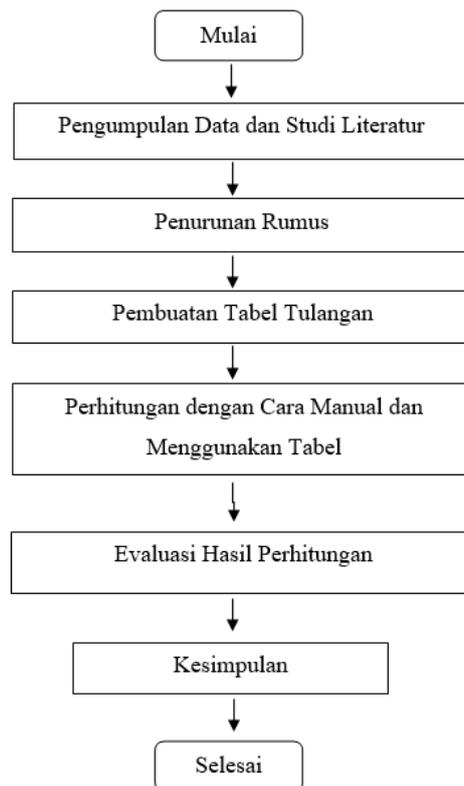
Keruntuhan tekan adalah pada saat regangan tekan beton sudah mencapai regangan batas 0,003 tetapi regangan tarik baja belum mencapai leleh atau $\epsilon'c = \epsilon'cu$ tetapi $\epsilon s < \epsilon y$. Pada balok yang mengalami keruntuhan ini saat beton mulai retak baja tulangannya masih kuat (belum leleh) sehingga lendutan pada balok relatif tetap (tidak bertambah). Tetapi jika diatas balok ditambahkan beban yang besar, maka tulangan baja akan meleleh dan dapat terjadi keruntuhan secara mendadak tanpa adanya tanda-tanda tentang lendutan yang membesar pada balok.

b. Keruntuhan Tarik (Under-Reinforced)

Keruntuhan tarik adalah pada saat regangan tarik baja sudah mencapai titik leleh tetapi regangan tekan beton belum mencapai regangan atas 0,003 atau $\epsilon s = \epsilon y$ tetapi $\epsilon'c < \epsilon'cu$. Pada balok yang mengalami keruntuhan ini saat baja tulangan mulai leleh betonnya masih kuat (belum retak), sehingga dapat terjadi lendutan pada balok. Jika di atas balok ditambahkan lagi beban yang besar, maka lendutan pada balok akan semakin besar dan akhirnya dapat terjadi keruntuhan. Dikarenakan adanya peringatan tentang lendutan balok yang membesar sebelum runtuh maka, sistem perencanaan beton bertulang yang under-reinforced lebih aman dan diperbolehkan.

c. Keruntuhan Seimbang (Balanced Failure)

Keruntuhan seimbang adalah keadaan pada saat beton retak dan baja tulangan leleh terjadi bersamaan. Hal ini berarti regangan tekan beton mencapai regangan batas 0,003 dan regangantarik baja tulangan mencapai leleh pada saat yang sama atau $\epsilon'c = \epsilon'cu$ dan $\epsilon s = \epsilon y$ tetapi $\epsilon s = \epsilon y$.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Balok Beton Tulangan Tunggal

Balok beton tulangan tunggal adalah balok yang hanya memiliki tulangan yang terpasang hanya pada satu sisi saja, yaitu pada daerah yang menerima gaya tarik. Balok dengan tulangan tunggal ini sering juga disebut dengan balok bertulangan sebelah atau balok dengan tulangan tarik saja. Dengan menggunakan persamaan kesetimbangan gaya horizontal $\Sigma H = 0$ dengan gaya tekan pada beton (C) dan gaya tarik pada baja (T) maka $C = T$.

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a$$

$$\text{Dan nilai } a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

Untuk kapasitas tahanan penampang balok atau momen nominal dari suatu penampang balok persegi bertulangan tunggal dapat dihitung dengan mengalikan nilai C atau T dengan jarak antar kedua gaya tersebut yaitu :

$$M_n = C \cdot z = T \cdot z$$

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

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

Jika disederhanakan menjadi : $\phi M_n = R_u b d^2$

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

3.3 Balok Beton Tulangan Rangkap

Balok dengan tulangan rangkap merupakan balok yang memiliki tulangan tarik (A_s) dan tulangan tekan (A_s') untuk meningkatkan kapasitas penampang dan juga mengurangi lendutan pada balok. Dengan dipasangnya tulangan ini, maka balok akan lebih kuat untuk menerima beban-beban yang ada. Jumlah penggunaan tulangan tekan (A_s') tidak akan sebanyak tulangan tarik (A_s). Umumnya tulangan tekan digunakan sebanyak $\frac{1}{4}$ dari tulangan tarik yang bertujuan untuk menjaga deformasi pada balok. Dalam analisis balok beton bertulangan rangkap ini biasanya terdapat 2 kasus yang berbeda tergantung pada kondisi tulangan tekan, yaitu tulangan tekan sudah luluh atau tulangan tekan belum luluh.

- Tulangan Tekan Sudah Luluh

Syarat batasan tulangan untuk A_{s1} yaitu bahwa harus dipenuhi $\rho_1 = (A_{s1}/bd) < \rho_{maks}$ untuk penampang terkendali tarik dari balok bertulangan tunggal. Untuk M_{u2} dapat dihitung dengan mengasumsikan bahwa tulangan tekan, A_s' sudah luluh :

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

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

Total luas yang digunakan tulangan baja tarik adalah jumlah dari A_{s1} dan A_{s2} , sehingga:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = A_{s1} + A_s'$$

$$A_{s1} = A_s - A_s'$$

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

$$\phi M_n = \phi \left(A_s - A_s' f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \right)$$

Dan sebagai syarat batas maksimum rasio tulangan :

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

- Tulangan Tekan Belum Luluh

Jika $(\rho - \rho') < K$, maka tulangan baja tarik akan luluh sebelum beton mencapai regangan maksimumnya yaitu sebesar 0,003 dan regangan pada tulangan tekan, ϵ_s' , belum mencapai ϵ_y pada saat terjadinya keruntuhan. Letak terhadap serat terluar, d' , ini juga yang akan mempengaruhi luluhnya tulangan tekan. Semakin dekat tulangan tekan dengan sumbu netral maka semakin tinggi rasio d'/c yang berarti semakin kecil pula kemungkinan tulangan tekan mencapai kuat luluhnya.

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c}$$

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

Dengan memperhitungkan tulangan baja yang ada pada luas beton, untuk besarnya gaya tekan pada tulangan, C_s , dan juga gaya tekan beton, C_c , maka dapat dituliskan rumusan yaitu :

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

$$C_c = 0,85 f'_c \beta_1 c b$$

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

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

Kuat momen rencana penampang :

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

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

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

Atau jika dituliskan dalam rasio tulangan, Maks $\rho = \text{Maks } A_s / b d \leq \rho_{maks} + \frac{\rho f_s'}{f_y}$ dengan $\left(\rho - \rho' \frac{f_s'}{f_y} \right) < \rho_{maks}$

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Penurunan Rumus

Penurunan rumus untuk pembuatan tabel tulangan balok dapat dilihat berdasarkan material dari beton seperti mutu beton (f_c'), mutu baja (f_y), dimensi balok yang terdiri dari lebar (b), tinggi (h), tinggi efektif (d), dengan momen ultimit (M_u), ataupun tulangan tarik (A_s) dan tulangan tekan (A_s'). Persamaan dasarnya :

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,005}{7} (f_c' - 28) ; 0,65 \leq \beta_1 \leq 0,85$$

$$a = \beta_1 \times c$$

$$\phi = 0,65 + 0,25 \left(\frac{d}{c} - \frac{5}{3} \right) ; 0,65 \leq \phi \leq 0,9 \text{ dengan nilai } \phi = 0,9 \text{ untuk lentur (terkendali tarik)}$$

Penulangan minimum :

$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f_c'} c}{4 f_y} \text{ tidak boleh kurang dari } \frac{1,4}{f_y} \quad \dots (1)$$

Penulangan maksimum :

$$C_c = 0,85 f_c' b a$$

$$T_c = A_s c f_y$$

$$T_{max} = A_{smax} f_y$$

$$A_{smax} = \rho_{maks} (b d)$$

Jika $T_{max} = C_c$ maka :

$$A_{smax} f_y = 0,85 f_c' b a$$

$$A_{smax} = \frac{0,85 f_c' b \cdot 0,375 \beta_1 d}{f_y}$$

Jika $\rho_{maks} = A_{smax} / (b d)$, maka :

$$\rho_{maks} = 0,31875 \beta_1 \left(\frac{f_c'}{f_y} \right) \quad \dots (2)$$

Perhitungan penulangan lentur :

$$d - d' = \gamma h$$

$$d = (1 + \gamma)(h/2)$$

$$d' = (1 - \gamma)(h/2)$$

$$d'/d = (1 - \gamma)(1 + \gamma)$$

Dengan nilai momen nominal $M_n = M_u/\phi$

$$M_u = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_u/(b d^2) = (\phi \cdot 0,425 f_c') \left(1 - \left(1 - \left(\frac{a}{d} \right) \right)^2 \right)$$

Jika $R = M_u/(b d^2)$, maka :

$$R = (\phi \cdot 0,425 f_c') \left(1 - \left(1 - \left(\beta_1 \frac{c}{d} \right) \right)^2 \right) \quad \dots (3)$$

Rumus penulangan Tunggal dengan $c/d \leq 0,375$

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c' b}$$

$$M_u/\phi = \frac{A_s f_y}{d - a/2}$$

$$R = M_u/(b d^2)$$

$$\rho = A_s/(b d)$$

$$a = \frac{\rho b d f_y}{0,85 f_c' b}$$

$$\begin{aligned} a/d &= \frac{\rho f_y}{0,85 f_c'} \\ \beta_1(c/d) &= \frac{\rho f_y}{0,85 f_c'} \\ \rho &= (c/d)(0,85 \beta_1 f_c'/f_y) \quad \dots (4a) \\ \rho' &= 0 \quad \dots (5a) \end{aligned}$$

Rumus penulangan Rangkap dengan $c/d > 0,375$

$$\begin{aligned} \rho &= A_s/(bd) \\ \rho' &= A_s'/(bd) \\ \mu &= \mu_1 + \mu_2 \\ c_{max} &= 0,375 d \\ a_{max} &= \beta_1 c_{max} \\ a_{max} &= 0,375 \beta_1 d \end{aligned}$$

Jika $a_{max} = \frac{A_{s_{max}} f_y}{0,85 f_c' b}$

$$\begin{aligned} A_{s_{max}} &= (0,31875 \beta_1) (f_c'/f_y)(bd) \\ \rho_{max} &= (0,31875 \beta_1) (f_c'/f_y) \end{aligned}$$

Kebutuhan tulangan tarik untuk keseimbangan tekan pada beton adalah

$$\begin{aligned} M_{uc} &= \phi A_{s_{max}} f_y (d - a_{max}/2) \\ M_{uc}/(bd^2) &= \phi (0,31875 \beta_1 f_c')(1 - 0,1875 \beta_1) \end{aligned}$$

Jika $R_c = M_{uc}/(bd^2)$, maka :

$$R_c = \phi (0,31875 \beta_1 f_c')(1 - 0,1875 \beta_1)$$

Tulangan tekan dan ulangan tarik :

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' (f_s' - 0,85 f_c') \\ T_s &= A_s f_y \end{aligned}$$

Kebutuhan tulangan tekan untuk keseimbangan tekan pada tulangan adalah

$$\begin{aligned} \mu_s &= \phi C_s (d - d') \\ \mu_s / (bd^2) &= \phi \rho' (f_s' - 0,85 f_c') \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right) \end{aligned}$$

Jika $R_s = \mu_s / (bd^2)$, maka :

$$\begin{aligned} R_s &= \phi \rho' (f_s' - 0,85 f_c') \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right) \\ \rho' &= \frac{R_s}{\phi \rho' (f_s' - 0,85 f_c') \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right)} \quad \dots (5b) \end{aligned}$$

Dimana $f_s' \leq f_y$

$$f_s' = (600) \left(1 - \left(\frac{8}{3}\right) \left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right)\right)$$

Kebutuhan tulangan Tarik untuk keseimbangan tekan pada tulangan adalah

$$\begin{aligned} \mu_s &= \phi T_s (d - d') \\ \mu_s/(bd^2) &= \phi \rho_s f_y \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right) \end{aligned}$$

Jika $R_s = \mu_s / (bd^2)$, maka :

$$\begin{aligned} R_s &= \phi \rho_s f_y \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right) \\ \rho_s &= \frac{R_s}{\phi f_y \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right)} \\ \rho &= \rho_c + \rho_s \quad \dots (4b) \end{aligned}$$

4.2. Pembuatan Tabel Tulangan

Contoh pembuatan tabel tulangan untuk perhitungan dipilih nilai-nilai sebagai berikut : $f_c' = 30$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\gamma = 0,8$, $\phi = 0,9$ (lentur), $\beta_1 = 0,8357$.

- Perhitungan tulangan tunggal dengan batas $c/d \leq 0,375$ diambil nilai $c/d = 0,3$

$$\begin{aligned} R &= \phi \times 0,425 \times f_c' (1 - (1 - \beta_1 c/d)^2) \\ R &= 0,9 \times 0,425 \times 30 (1 - (1 - 0,8357 \times 0,3)^2) \\ R &= 5,03252 \\ \rho &= (c/d)(0,85 \beta_1 f_c'/f_y) \\ \rho &= 0,3 \times 0,85 \times 0,8357 \times \left(\frac{30}{400}\right) \\ \rho &= 0,01598 \end{aligned}$$

- Perhitungan tulangan rangkap dengan batas $c/d > 0,375$ diambil nilai $c/d = 0,5$

$$R = \phi \times 0,425 f'c (1 - (1 - \beta_1 c/d)^2)$$

$$R = 0,9 \times 0,425 \times 30 (1 - (1 - 0,8357 \times 0,5)^2) = 7,58814$$

$$Rc = \phi \times (0,31875 \beta_1 f'c) (1 - 0,1875 \beta_1)$$

$$Rc = 0,9 \times (0,31875 \times 0,8357 \times 30) (1 - 0,1875 \times 0,8357) = 6,06704$$

$$Rs = R - Rc = 7,58814 - 6,06704 = 1,52111$$

$$fs' = (600) \left(1 - \left(\frac{8}{3} \right) \left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right) \right) \leq fy$$

$$fs' = (600) \left(1 - \left(\frac{8}{3} \right) \left(\frac{1-0,8}{1+0,8} \right) \right) \leq 400 \text{ Mpa}$$

$$fs' = 422,222 \text{ Mpa} \leq 400 \text{ Mpa}$$

$$fs' = 400 \text{ Mpa}$$

$$\rho' = \frac{Rs}{\left(\phi (fs' - 0,85 f'c) \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right) \right)}$$

$$\rho' = \frac{1,52111}{\left(0,9 (400 - 0,85 \times 30) \left(1 - \frac{1-0,8}{1+0,8} \right) \right)} = 0,00508$$

$$\rho_s = \frac{Rs}{\left(\phi fy \left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right) \right)}$$

$$\rho_s = \frac{1,52111}{\left(0,9 \times 400 \left(1 - \frac{1-0,8}{1+0,8} \right) \right)} = 0,004753$$

$$\rho = \rho_{maks} + \rho_s$$

$$\rho = 0,01997 + 0,004753 = 0,024739$$

Tabel 2. Tabel Penulangan Beton untuk $fc' = 30 \text{ MPa}$ dan $fy = 400 \text{ MPa}$

c/d	R	ρ'	ρ	ρ'/ρ
0,100	1,838422	0	0,00533	0
0,105	1,926132	0	0,005596	0
...
0,300	5,034075	0	0,015989	0
0,305	5,105746	0	0,016255	0
...
0,375	6,067036	0	0,019986	0
0,380	6,132692	0,000205	0,020191	0,010163
...
0,500	7,588142	0,004754	0,024739	0,192174
0,505	7,643773	0,023875	0,043857	0,544382
...

4.3. Perhitungan Penulangan Lentur dengan Manual

- Analisis tulangan tunggal

Data yang dipakai untuk analisis tulangan tunggal adalah $fc' = 30 \text{ MPa}$, $fy = 400 \text{ MPa}$, $As = 2600 \text{ mm}^2$, $h = 500 \text{ mm}$, $b = 300 \text{ mm}$, $d = 450 \text{ mm}$, $\phi = 0,9$.

Penyelesaian

$$a = \frac{As fy}{0,85 f'c b} = \frac{2600 \times 400}{0,85 \times 30 \times 350} = 135,9 \text{ mm}$$

$$Mn = As fy \left(d - \frac{a}{2} \right) = 2600 \times 400 \left(450 - \frac{135,9}{2} \right) = 397,38 \text{ kNm}$$

$$Mu = \phi Mn = 357,64 \text{ kNm}$$

- Desain tulangan tunggal

Data yang dipakai untuk desain tulangan tunggal adalah $fc' = 15 \text{ MPa}$, $fy = 400 \text{ MPa}$, $Mu = 100 \text{ kNm}$, $h = 500 \text{ mm}$, $b = 250 \text{ mm}$, $d = 450 \text{ mm}$, $\phi = 0,9$.

Penyelesaian

$$Mn = \frac{Mu}{\phi} = \frac{100}{0,9} = 111,11 \text{ kNm}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 f_{c'}} = \frac{400}{0,85 \times 25} = 31,37$$

$$R_n = \frac{M_n}{b d^2} = \frac{111,11 \times 10^6}{250 \times 450^2} = 2,19$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{f_y}} \right) = \frac{1}{31,37} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(2 \times 31,37)(2,19)}{400}} \right) = 0,0060$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

$$\rho_{\text{balance}} = 0,85 \beta_1 \left(\frac{f_{c'}}{f_y} \right) \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = 0,01625$$

$$\rho_{\text{maks}} = \left(\frac{0,003 + f_y/E_s}{0,008} \right) \rho_{\text{balance}} = 0,01016$$

$\rho_{\min} < \rho < \rho_{\text{maks}}$; $0,0035 < 0,0060 < 0,01016$ maka digunakan $\rho = 0,0060$

$$A_s = \rho b d = 0,0060 \times 250 \times 450 = 680,446 \text{ mm}^2$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 680,446 \times 400 \left(450 - \frac{71,15}{2} \right) = 112,79 \text{ kNm}$$

$$M_u = \phi M_n = 101,51 \text{ kNm}$$

- Analisis tulangan rangkap

Data yang dipakai untuk analisis tulangan rangkap adalah $f_{c'} = 25 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$, $A_s = 6D29 (3960 \text{ mm}^2)$, $A_s' = 3D22 (1140 \text{ mm}^2)$, $h = 700 \text{ mm}$, $b = 300 \text{ mm}$, $d = 600 \text{ mm}$, $\phi = 0,9$.

Penyelesaian

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0,85 f_{c'} b} = \frac{2820 \times 400}{0,85 \times 25 \times 300} = 176,94 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = \phi (A_s - A_s') f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + (A_s' f_y (d - d'))$$

$$= 0,9 \left(2820 \times 400 \left(600 - \frac{176,94}{2} \right) \right) + (1140 \times 400 (600 - 50)) = 745,02 \text{ kNm}$$

- Desain tulangan rangkap

Data yang dipakai untuk desain tulangan rangkap adalah $f_{c'} = 20 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$, $M_u = 350 \text{ kNm}$, $h = 550 \text{ mm}$, $b = 300 \text{ mm}$, $d = 487,5 \text{ mm}$, $d' = 59,5 \text{ mm}$, $\phi = 0,9$.

Penyelesaian

$$A_{s_{\text{maks}}} = \rho_{\text{maks}} b d = 0,01354 \times 300 \times 487,5 = 1981,96 \text{ mm}^2$$

$$R_{u_{\text{maks}}} = \phi \rho_{\text{maks}} f_y \left(1 - \frac{\rho_{\text{maks}} f_y}{1,7 f_{c'}} \right) = 4,09962$$

$$M_{u_1} = R_{u_{\text{maks}}} b d^2 = 292,3 \text{ kNm}$$

$$M_{u_2} = M_u - M_{u_1} = 350 - 292,3 = 57,7 \text{ kNm}$$

$$A_{s_2} = \frac{M_{u_2}}{\phi f_y (d - d')} = \frac{57,7 \times 10^6}{0,9 \times 400 (487,5 - 59,5)} = 374,48 \text{ mm}^2$$

Luas total tulangan tarik $A_s = A_{s_1} + A_{s_2}$

$$A_s = 1981,69 + 374,48 = 2356,17 \text{ mm}^2$$

4.4. Perhitungan Penulangan Lentur dengan Tabel

- Analisis tulangan tunggal

$$\rho = \frac{A_s}{b d} = \frac{2600}{300 \times 450} = 0,01925$$

Menggunakan tabel $f_{c'} = 30 \text{ MPa}$ dan $f_y = 400 \text{ MPa}$, nilai $\rho = 0,01925$ berada di antara :

$c/d = 0,360$; $R = 5,86766$; $\rho = 0,01919$

$c/d = 0,365$; $R = 5,93452$; $\rho = 0,01945$

Menggunakan rumus interpolasi untuk mencari nilai R :

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \right] (y_2 - y_1)$$

$$R = 5,86766 + \left[\frac{(0,01925 - 0,01919)}{(0,01945 - 0,01919)} \right] (5,93452 - 5,86766) = 5,885449$$

$$M_u = R(b d^2) = 5,88549 (300 \times 450^2) = 357,544 \text{ kNm}$$

- Desain tulangan tunggal

$$R = \frac{M_u}{b d^2} = \frac{100.000.000}{250 \times 450^2} = 1,975$$

Menggunakan tabel $f_{c'} = 15 \text{ MPa}$ dan $f_y = 400 \text{ MPa}$, nilai $R = 1,9753$ berada di antara :

$c/d = 0,220$; $R = 1,94519$; $\rho = 0,00596$

$c/d = 0,225$; $R = 1,98474$; $\rho = 0,0061$

Menggunakan rumus interpolasi untuk mencari nilai ρ :

$$y = y1 + \left[\left(\frac{x-x1}{x2-x1} \right) (y2 - y1) \right]$$

$$\rho = 0,00596 + \left[\left(\frac{1,9753 - 1,94519}{1,98747 - 1,94519} \right) (0,00596 - 0,0061) \right] = 0,00606$$

$$As = pbd = 0,00606 \times 250 \times 450 = 682,179 \text{ mm}^2$$

• Analisis tulangan rangkap

$$As - As' = 3960 - 1140 = 2820 \text{ mm}^2$$

$$\rho - \rho' = 0,022 - 0,00633 = 0,01567$$

Menggunakan tabel $fc' = 25 \text{ MPa}$ dan $fy = 400 \text{ Mpa}$, nilai $\rho = 0,01567$ berada di antara :

$$c/d = 0,345 ; R = 4,78607 ; \rho = 0,01557$$

$$c/d = 0,350 ; R = 4,84334 ; \rho = 0,01580$$

Menggunakan rumus interpolasi untuk mencari nilai R :

$$y = y1 + \left[\left(\frac{x-x1}{x2-x1} \right) (y2 - y1) \right]$$

$$R = 4,78607 + \left[\left(\frac{0,01567 - 0,01557}{0,01580 - 0,01557} \right) (4,84334 - 4,78607) \right] = 4,81097$$

$$Muc = R(bd^2) = 4,81097 (300 \times 600^2) = 519,58 \text{ kNm}$$

$$Mus = As' (\phi (fs' - 0,85fc')(d - d')) = 1140 (0,9 (400 - 0,85 \times 25)(600 - 50)) = 213,72 \text{ kNm}$$

$$Mu = Muc + Mus = 519,58 + 213,72 = 733,31 \text{ kNm}$$

• Desain tulangan rangkap

$$R = Mu/bd^2 = 350.000.000 / (300 \times 487^2) = 4,91913$$

Menggunakan tabel $fc' = 20 \text{ MPa}$ dan $fy = 400 \text{ Mpa}$, nilai $R = 4,91913$ berada di antara :

$$c/d = 0,470 ; R = 4,89140 ; \rho' = 0,00247 ; \rho = 0,01602$$

$$c/d = 0,475 ; R = 4,93031 ; \rho' = 0,00259 ; \rho = 0,01614$$

Menggunakan rumus interpolasi untuk mencari nilai ρ' :

$$y = y1 + \left[\left(\frac{x-x1}{x2-x1} \right) (y2 - y1) \right]$$

$$\rho' = 0,00244 + \left[\left(\frac{4,91913 - 4,89140}{4,93031 - 4,89140} \right) (0,00259 - 0,00247) \right] = 0,00254$$

$$As' = \rho'bd = 0,00254 \times 300 \times 487,5 = 372,478 \text{ mm}^2$$

Menggunakan rumus interpolasi untuk mencari nilai ρ :

$$\rho = 0,01602 + \left[\left(\frac{4,91913 - 4,89141}{4,93032 - 4,89141} \right) (0,01614 - 0,01602) \right] = 0,016105$$

$$As = pbd = 0,016105 \times 300 \times 487,5 = 2355,35 \text{ mm}^2$$

4.5. Evaluasi Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan maka didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Perhitungan Desain

Input	Output				Perbandingan (%)	
	Manual		Tabel		As (mm ²)	As' (mm ²)
Mu (kN.m)	As (mm ²)	As' (mm ²)	As (mm ²)	As' (mm ²)		
100	680,44	0	682,17	0	0,25	0
350	2356,17	374,48	2355,35	372,478	0,03	0,53

Tabel 3. Hasil Perhitungan Analisis

Input		Output		Perbandingan (%)
		Manual	Tabel	
As (mm ²)	As' (mm ²)	Mu (kN.m)	Mu (kN.m)	Mu (kN.m)

Input		Output		Perbandingan (%)
		Manual	Tabel	
2600	0	357,64	357,54	0,02
660,185	380	745,02	733,31	1,57

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah didapat dari perhitungan yang telah dilakukan dalam penyusunan tugas akhir ini maka dapat disimpulkan bahwa pembuatan tabel untuk perhitungan balok persegi beton bertulang dapat mempermudah dan mempercepat dalam menganalisis dan mendesain tulangan lentur balok persegi beton bertulang. Penggunaan tabel dalam perhitungan ini lebih efisien dalam menganalisis dan mendesain tulangan lentur dibandingkan dengan perhitungan manual, dan hasil yang didapat dari kedua metode tersebut hampir sama dengan selisih perbandingan yang rendah.

5 Saran

Dalam melakukan perhitungan dengan menggunakan cara tabel, sangat penting untuk memperhatikan angka - angkanya dengan teliti agar supaya perhitungan dapat dilakukan dengan tepat. Dan untuk rumus – rumus yang ada harus diperiksa kembali pula ketika akan melakukan perhitungan.

Referensi

- Agus, Setiawan. (2016). Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847 : 2013. Jakarta : Erlangga.
- Akmaluddin, Murtiadi, Suryawan. (2018). Struktur Balok Beton (Bagian I Struktur Beton Bertulang). Mataram : Mataram University Press.
- Asroni, Ali. (2017). Teori dan Desain Balok Plat Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847-2013. Surakarta : Muhammadiyah University Press.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, SNI 2847:2019. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- Dipohusodo, Istimawan. (1993). Struktur Beton Bertulang berdasarkan SNI T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Hartono Bagio, T., Yudhistira Baggio, E., & Basoeki Makno. (2022). Penulangan Balok Beton Menggunakan Tabel Berdasarkan SNI 2847-2019. Jurnal Intakindo Jatim, 1(1), 68-75.
- McCormac. (2000). Desain Beton Bertulang Jilid I. Jakarta : Erlangga.
- Tampubolon, Sudarno. (2022). Struktur Beton I. Jakarta : Universitas Kristen Indonesia Press.
- Vis, W.C dan Kusuma, Gideon. (1993). Dasar – Dasar Perencanaan Beton Bertulang menurut SKSNI T15-1991-03, Penerbit Erlangga : Jakarta.
- Vis, W. C. dan Kusuma, Gideon. (1993). Grafik dan Tabel Perhitungan Beton Bertulang. Jakarta : Erlangga.).