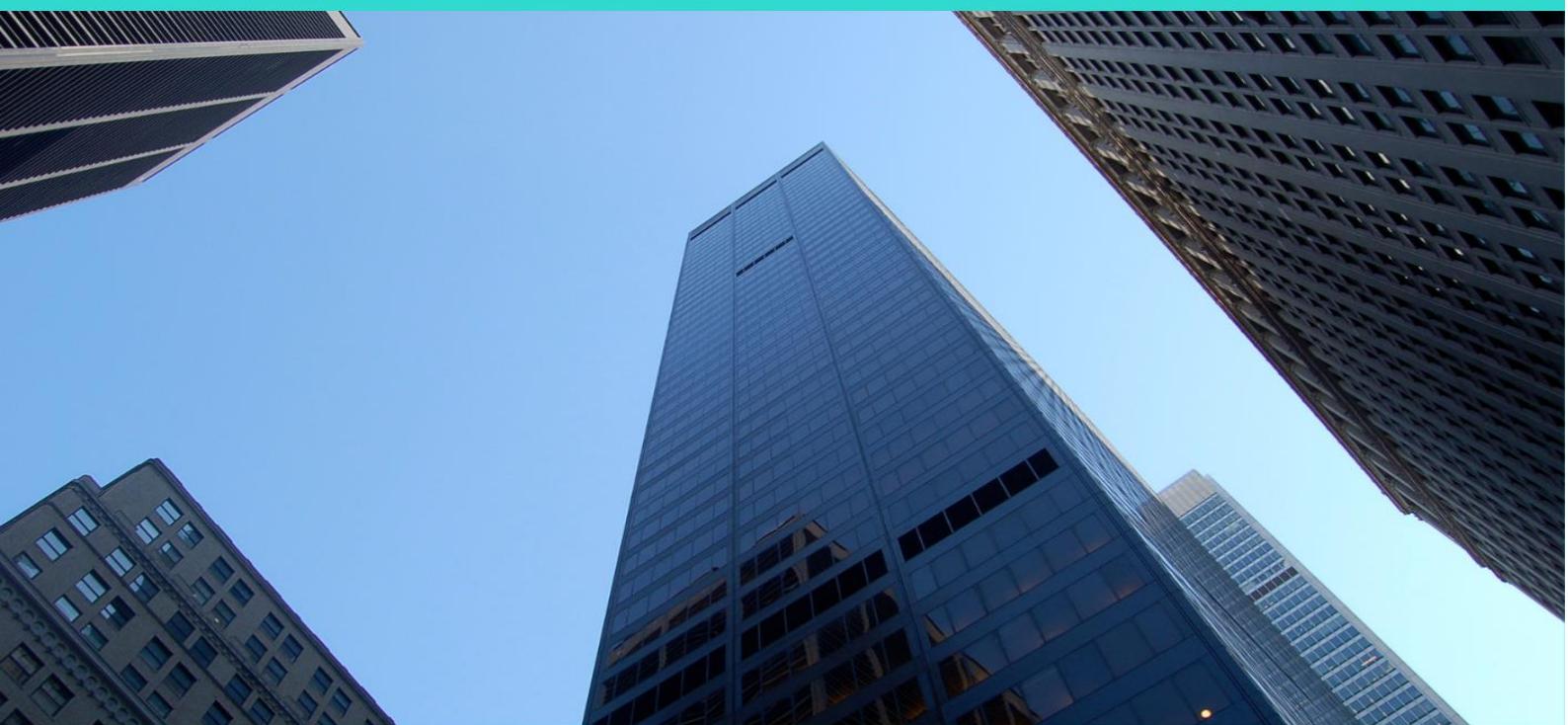




STRUKTUR BETON - 1



CIVIL ENGINEERING

Sudarno P Tampubolon, S.T., M.Sc

STRUKTUR BETON I

CIVIL ENGINEERING

Penulis:

Sudarno P Tampubolon, S.T., M.Sc



UKI PRESS

Pusat Penerbitan dan Pencetakan

Buku Perguruan Tinggi

Universitas Kristen Indonesia

Jakarta

2022

STRUKTUR BETON I

CIVIL ENGINEERING

Penulis:

Sudarno P Tampubolon, S.T., M.Sc

Editor:

Ir. Agnes Sri Mulyani, M.Sc

ISBN: 978-623-6963-76-0

Penerbit: UKI Press

Anggota APPTI

Anggota IKAPI

Redaksi: Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang Jakarta 13630

Telp. (021) 8092425

Cetakan I Jakarta: UKI Press, 2022

Hak cipta dilindungi undang-undang.

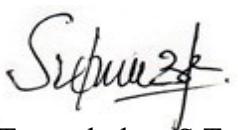
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Buku Struktur Beton-1 ini merupakan buku pembelajaran bagi para mahasiswa dan khalayak umum. Nama buku ini adalah **Struktur Beton 1**, yaitu buku yang membahas Pengantar Perencanaan Struktur Beton, Material Pembentuk Beton Bertulang, Kuat Tekan Beton, Regangan, Tegangan, Teori Kekuatan Batas, Analisis dan Perencanaan Balok Beton Bertulangan Tunggal dan Rangkap, Desain Balok Beton Bertulang Terhadap Gaya Geser, Analisis dan Desain Balok T, Analisis dan Desain Tulangan Torsi Balok, dan Perencanaan Pelat Beton. Buku Struktur Beton 1 ditulis berdasarkan Standar Nasional Indonesia, yaitu PBI-1971, SNI 03-2847-2002, SNI 2847-2013, SNI 1727-2019, dan SNI 2847-2019.

Pembelajaran dalam Buku Struktur Beton-1 ini menekankan pemahaman mengenai pengertian Beton Bertulang dan desain perencanaannya pada balok dan pelat. Buku Struktur Beton-1 ini disusun dalam delapan Bab (8-Bab) yang secara keseluruhan masing-masing Bab akan memperlihatkan pokok-pokok penting yang harus dipahami dalam pembelajaran struktur beton-1.

Jakarta, 2 Februari 2022 Penyusun,



Sudarno P. Tampubolon, S.T., M.Sc

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar.....	vii
BAB 1	1
PENGANTAR PERENCANAAN STRUKTUR BETON & MATERIAL PEMBENTUK BETON BERTULANG	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Kegiatan Pembelajaran: Pengantar Perencanaan Struktur Beton dan Material Pembentuk Beton Bertulang.....	1
1. Kemampuan akhir.....	1
2. Uraian Materi.....	1
1.3 Pengertian, Definisi, dan Sifat Unsur Beton	1
1.4 Beton Normal	3
1.5 Beton Mutu Tinggi	3
1.6 Peraturan Desain dan Tata Cara Perhitungan Komponen Beton Bertulang.....	4
1.7 Beton dan Beton Bertulang	5
1.8 Kelebihan Beton Bertulang Sebagai Bahan Struktur	6
1.9 Sifat dan Bentuk-Bentuk Baja Tulangan.....	7
1.10 Kelemahan Beton Bertulang Sebagai Bahan Struktur	10
1.11 Pembebanan Pada Struktur.....	10
1.12 Kuat Perlu dan Kuat Rencana	13
1.13 Kriteria Desain Struktur dan Elemen Struktur	15
1.14 Latihan.....	16
BAB 2	17
KUAT TEKAN BETON, REGANGAN, TEGANGAN, DAN TEORI KEKUATAN BATAS	17
2.1 Pendahuluan	17
2.2 Kegiatan Pembelajaran: Kuat Tekan Beton (<i>Compressive Strength</i>), ($f'c$).....	17
1. Kemampuan akhir.....	17
2. Uraian Materi.....	17

2.3	Kuat Tekan Beton (<i>Compressive Strength</i>), ($f'c$)	17
2.4	Kuat Tarik.....	19
2.5	Kuat Lentur.....	20
2.6	Regangan, Tegangan, dan Teori Kekuatan Batas.....	21
1.	Kemampuan akhir.....	21
2.	Uraian Materi	21
2.1	Perilaku Tegangan dan Regangan.....	21
2.7	Prinsip –Prinsip Desain Struktur Beton.....	23
2.8	Tulangan Maksimum dan minimum	25
2.9	Jenis Keruntuhan Balok.....	25
2.10	Latihan.....	27
BAB 3	28
ANALISIS DAN PERENCANAAN BALOK BETON BERTULANGAN TUNGGAL		
	TUNGGAL	28
3.1	Pendahuluan	28
3.2	Kegiatan Pembelajaran: Desain Perencanaan Balok Beton Bertulangan Tunggal	28
1.	Kemampuan akhir.....	28
2.	Uraian Materi	28
3.3	Analisis Penampang Balok Persegi Bertulangan Tunggal	28
3.4	Faktor Momen Pikul K dan nilai a	29
3.5	Spasi Tulangan dan Selimut Beton.....	30
3.6	Latihan.....	39
BAB 4	40
ANALISIS DAN PERENCANAAN BALOK BETON BERTULANGAN RANGKAP		
	RANGKAP	40
4.1	Kegiatan Pembelajaran : Desain Perencanaan Balok Beton Bertulangan Rangkap	40
1.	Kemampuan akhir.....	40
2.	Uraian Materi	40
4.2	Analisis Penampang Balok Persegi Bertulangan Rangkap	40
4.3	Fungsi Tulangan Rangkap (Tekan dan Tarik).....	41
4.4	Analisa Kapasitas Momen Pada Penampang Bertulangan Rangkap.....	42
4.5	Latihan.....	53
BAB 5	54
DESAIN BALOK BETON BERTULANG TERHADAP GAYA GESEN		
	54	

5.1 Pendahuluan	54
5.2 Kegiatan Pembelajaran: Jenis/ tipe keruntuhan dan pola retak balok beton bertulang pada kondisi seimbang, tarik, dan tekan	54
1. Kemampuan akhir.....	54
2. Uraian Materi	54
5.3 Retak Pada Balok Beton Bertulang	54
5.4 Retak Balok Akibat Gaya Geser	55
5.5 Mengatasi Retak Geser.....	56
5.6 Pemasangan Tulangan Geser.....	57
5.7 Perencanaan Tulangan Geser pada Balok Beton Bertulang	61
1. Kemampuan akhir.....	61
2. Uraian Materi	61
2.1 Perencanaan Tulangan Geser/ Begel Balok.....	61
2.2 Perhitungan nilai Vs dengan analogi rangka batang.....	63
5.8 Latihan.....	70
BAB 6	72
ANALISIS DAN DESAIN BALOK T	72
6.1 Pendahuluan	72
6.2 Kegiatan Pembelajaran: Analisa Penampang Balok T dengan Tulangan Tunggal	72
1. Kemampuan akhir.....	72
2. Uraian Materi	72
6.3 Perencanaan Balok T/ Desain Balok T	72
6.4 Analisis Balok T	74
6.5 Faktor Momen Pikul “K”	76
6.6 Perencanaan Balok “T” untuk Tulangan Tunggal.....	77
6.7 Kegiatan Pembelajaran: Analisa Penampang Balok T dengan Tulangan Rangkap	82
1. Kemampuan akhir.....	82
2. Uraian Materi	82
2.1 Balok T dengan Tulangan Rangkap.....	83
6.8 Prosedur desain balok T dengan tulangan rangkap	85
6.9 Latihan.....	89
BAB 7	90
ANALISIS DAN DESAIN TULANGAN TORSI BALOK	90
7.1 Pendahuluan	90

7.2 Kegiatan Pembelajaran: Analisis dan Desain Tulangan Torsi Balok.....	90
1. Kemampuan akhir.....	90
2. Uraian Materi	90
7.3 Defenisi Torsi	90
7.4 Tegangan Geser akibat Torsi.....	91
7.5 Perilaku torsi sebelum terjadi retak	91
7.6 Latihan.....	100
BAB 8	101
DESAIN PERENCANAAN PELAT BETON	101
8.1 Pendahuluan	101
8.2 Kegiatan Pembelajaran: Perencanaan Pelat Satu Arah (<i>One Way Slab</i>)	101
1. Kemampuan akhir.....	101
2. Uraian Materi	101
8.3 Defenisi Pelat Beton.....	101
8.4 Tumpuan Pelat.....	101
8.5 Jenis Perletakan Pelat pada Balok	102
8.6 Jenis-Jenis Pelat Beton Bertulang	103
8.7 Desain Pelat Satu Arah.....	104
8.8 Kegiatan Pembelajaran: Perencanaan Pelat Dua Arah (<i>Two Way Slab</i>)	108
1. Kemampuan akhir.....	108
2. Uraian Materi	108
2.1 Pelat Dua Arah (<i>Two Way Slab</i>)	108
2.2 Jenis/ Tipe Pelat Dua Arah (<i>Two Way Slab</i>).....	109
8.9 Metode Perencanaan Langsung Pelat Dua Arah	113
8.10 Latihan.....	122
Daftar Pustaka.....	123
BIODATA PENULIS.....	125

Daftar Tabel

Tabel 1. 1 Ukuran Baja Tulangan Beton Polos.....	7
Tabel 1. 2 Ukuran Baja Tulangan Beton Sirip.....	8
Tabel 1. 3 Berat Material Bangunan.....	11
Tabel 1. 4 Besarnya Intensitas Beban Hidup Pada Lantai Gedung	12
Tabel 1. 5 Faktor reduksi kekuatan.....	15
Tabel 2. 1 Faktor Koreksi Rasio Panjang (L) dengan Diameter (D) benda uji.	18
Tabel 3. 1 Momen Nominal Penampang.	29
Tabel 4. 1 Ketebalan selimut beton untuk komponen struktur beton nonprategang yang dicor di tempat.....	45
Tabel 4. 2 Ketebalan Selimut Beton Untuk Komponen Struktur Beton Prategang yang di Cor di Tempat.....	46
Tabel 4. 3 Ketebalan Selimut Beton Untuk Beton Pracetak nonprategang dan prategang yang di Produksi pada Kondisi Pabrik.	47
Tabel 5. 1 Diameter minimum bengkokan.....	59
Tabel 5. 2 Geometri kait standar untuk penyaluran batang ulir pada kondisi Tarik.....	59
Tabel 5. 3 Diameter sisi dalam bengkokan minimum dan geometri kait standar untuk sengkang, ikat silang, dan sengkang pengekang.....	60
Tabel 5. 4 Faktor momen pikul maksimal (Kmaks) dalam MPa	65
Tabel 5. 5 Rasio Tulangan Minimal (ρ_{minimum}) dalam persen (%).	66
Tabel 8. 1 Tebal minimum pelat.	105
Tabel 8. 2 Batasan Lendutan Pelat.....	105
Tabel 8. 3 Persyaratan Tulangan Susut dan Suhu Untuk Pelat.....	106
Tabel 8. 4 Minimum Pelat Tanpa Balok Dalam.	112
Tabel 8. 5 Distribusi Momen Pada Pelat Ujung.	114
Tabel 8. 6 Analisa perhitungan momen pada pelat 2 arah.	115

Daftar Gambar

Gambar 1. 1 Balok beton bertulang.....	6
Gambar 1. 2 Kolom beton bertulang.....	6
Gambar 1. 3 Besi/ Tulangan Polos.	7
Gambar 1. 4 Besi/ Tulangan Sirip/ Deform.	8
Gambar 1. 5 Jaring kawat baja (wiremash)	10
Gambar 2. 1 Tegangan dan Regangan pada benda uji silinder.....	18
Gambar 2. 2 Sketsa gambar tipe/ pola kehancuran pada benda uji silinder.	18
Gambar 2. 3 Uji Tarik Belah Beton Silinder.	20
Gambar 2. 4 Posisi posisi pengujian kuat lentur dengan metode third point loading.....	21
Gambar 2. 5 Concrete and Steel Stress Strain Curve.....	22
Gambar 2. 6 Bagan Prinsip Desain Struktur.....	24
Gambar 2. 7 Pola keruntuhan pada beton bertulang.	26
Gambar 3. 1 Distribusi Regangan Tegangan pada Balok Beton Bertulangan Tunggal.....	28
Gambar 4. 1 Pengujian Balok dengan menggunakan tulangan dan tanpa tulangan	40
Gambar 4. 2 Penampang Balok dengan Tulangan As dan As'.	41
Gambar 4. 3 Penampang Balok Persegi Bertulangan Rangkap.....	42
Gambar 4. 4 Distribusi Regangan Tegangan pada Balok Beton Bertulangan Rangkap.....	42
Gambar 5. 1 Tulangan Geser dan Tulangan Longitudinal Balok.	57
Gambar 5. 2 Jenis begel pada balok.....	57
Gambar 5. 3 Detail batang tulangan berkait untuk penyaluran kait standar.	57
Gambar 5. 4 Perhitungan nilai Vs dengan analogi rangka batang.	63
Gambar 5. 7 Lebar efektif flens.	74
Gambar 6. 1 Lenturan balok dengan flens.	72
Gambar 6. 2 Ketetapan analisis balok T berdasarkan zona tekan beton.....	73
Gambar 6. 3 Lebar efektif flens.	74
Gambar 6. 4 Penampang balok T bertulangan tunggal pada kondisi momen maksimum.....	75
Gambar 6. 5 Garis netral jatuh di sayap (flens).	75

Gambar 6. 6 Garis netral jatuh di badan (web).....	76
Gambar 6. 7 Diagram regangan, tegangan dan gaya balok T tulangan rangkap.	83
Gambar 6. 8 Diagram regangan, tegangan dan gaya balok T tulangan rangkap kondisi seimbang.	84
Gambar 6. 9 Penampang balok T dan diagram tegangan-regangan.	88
Gambar 7. 1 Torsi pada beberapa bangunan akibat gaya aksial dan momen.	90
Gambar 7. 2 Tegangan geser akibat torsi.....	91
Gambar 7. 3 Retak Akibat Torsi Menurut Analogi Rangka Ruang.....	92
Gambar 8. 1 Pelat ditumpu balok (monolit).	102
Gambar 8. 2 Pelat ditumpu dinding/ tembok.	102
Gambar 8. 3 Pelat ditumpu balok baja dengan sistem komposit.	102
Gambar 8. 4 Pelat ditumpu kolom secara langsung (pelat cendawan).	102
Gambar 8. 5 Pelat terletak bebas.....	103
Gambar 8. 6 Pelat terjepit elastis.	103
Gambar 8. 7 Pelat terjepit penuh.....	103
Gambar 8. 8 Pelat Kantilever.....	103
Gambar 8. 9 Sistem Pelat Rusuk (Joist Construction).....	104
Gambar 8. 10 Koefisien Momen untuk Balok dan Pelat Menerus.	105
Gambar 8. 11 Detail Penulangan Pelat Satu Arah.	107
Gambar 8. 12 Pelat Dua Arah.	109
Gambar 8. 13 Slab Datar (flat slab).	110
Gambar 8. 14 Pelat Datar (flat plate).	110
Gambar 8. 15 Pelat dua arah berusuk dan pelat waffle.....	111
Gambar 8. 16 Distribusi Momen Pada suatu pelat dalam.....	113
Gambar 8. 17 Distribusi Momen Statik Total Menjadi Momen Positif dan Negatif.....	114

BAB 1

PENGANTAR PERENCANAAN STRUKTUR BETON & MATERIAL PEMBENTUK BETON BERTULANG

1.1 Pendahuluan

Pada buku pembelajaran ini mengenai pengantar perencanaan struktur beton dan material pembentuk beton bertulang dibahas tentang jenis/ spesifikasi beton dan syarat perencanaan beton bertulang. Dalam perencanaan struktur sangatlah diperlukan klasifikasi/ mutu beton (f'_c) dan jenis mutu tulangan (f_y) yang digunakan, karena hal ini sangatlah mempengaruhi kekuatan perencanaan struktur yang akan direncanakan/ desain.

1.2 Kegiatan Pembelajaran: Pengantar Perencanaan Struktur Beton dan Material Pembentuk Beton Bertulang

1. Kemampuan akhir

Adapun kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari pengantar perencanaan struktur beton dan material pembentuk beton bertulang adalah mampu menjelaskan sifat dan perilaku material pembentuk beton bertulang sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang 2019.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan pengertian, manfaat, jenis, faktor-faktor yang mempengaruhi perencanaan struktur beton dan material pembentuk beton bertulang.

1.3 Pengertian, Definisi, dan Sifat Unsur Beton

Pengertian sifat bahan unsur beton perlu dipahami untuk menjadi parameter bagi perencanaan struktur dan elemen beton. Agregat adalah material granular, seperti pasir, kerikil, batu pecah yang dipakai secara bersama-sama dengan suatu media pengikat semen hidraulik membentuk beton. Selain agregat, terdapat agregat ringan yang dalam keadaan kering dan gembur mempunyai berat sekitar 1100 kg/m^3 (11 kN/m^3).

Klasifikasi agregat yang umum adalah:

- **Agregat halus** seperti pasir sebagai hasil desintegrasi batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dengan ukuran butir terbesar 5.0 mm.
- **Agregat kasar** adalah kerikil sebagai hasil desintegrasi batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara (5-40) mm.
- **Adukan** adalah campuran antara agregat, semen, dan air yang diaduk/ dicampur secara merata yang hasil akhirnya berbentuk seperti pasta.
- **Beton** merupakan campuran antara semen Portland atau semen hidraulik jenis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan tambahan yang setelah mengeras membentuk masa padat.
- **Beton bertulang** adalah beton yang di berikan tulangan, dengan luas dan jumlah tulangan tertentu untuk mendapatkan tarik maupun tekan suatu penampang yang berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja. Apabila beton mempunyai berat isi ($2200 - 2500$) kg/m^3 maka disebut **beton-normal**.

- **Beton normal** adalah beton yang mempunyai berat isi (2200-2500) kg/m³ menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah serta tidak menggunakan bahan tambahan. Dalam klasifikasi beton, yang termasuk beton normal adalah kelas II yaitu Beton kelas II adalah untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umurn.
- **Tegangan** adalah intensitas gaya per satuan luas.
- **Kuat tekan beton yang disyaratkan (f'_c)** adalah kuat tekan yang ditetapkan oleh perencanaan struktur dari benda uji yang umumnya berbentuk silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, yang dinyatakan dalam mega pascal (MPa) untuk hasil akhir dari pengujian laboratorium.
- **Kuat tarik leleh (f_y)** merupakan tarik leleh minimum yang disyaratkan atau titik leleh dari tulangan. Satuan dari kuat tarik leleh ini dalam megapascal (MPa).
- **Kuat nominal** didefinisikan sebagai kekuatan suatu komponen struktur atau penampang yang dihitung berdasarkan ketentuan dan asumsi metoda perencanaan sebelum dikalikan dengan suatu faktor reduksi yang sesuai. Sedangkan **kuat perlu** adalah kekuatan komponen struktur atau penampang yang diperlukan menahan beban terfaktor atau momen dan gaya-dalam akibat suatu kombinasi muatan/ beban.
- **Kuat rencana** didefinisikan sebagai kuat nominal yang dikalikan dengan suatu faktor reduksi kekuatan (ϕ).

Dalam perencanaan diperlukan parameter modulus elastisitas yang dinyatakan dari rasio antara tegangan normal tarik atau tekan dengan regangan dari unsur elemen dibawah batas proporsional dari material.

➤ **Elemen struktur**

Elemen struktur dapat dibedakan dari fungsi dan beban yang dipikul elemen.

➤ **Kolom** adalah komponen struktur dengan rasio tinggi di dalam menahan/ menopang struktur dari beban balok maupun pelat yang diterima, yang digunakan terutama untuk mendukung beban aksial tekan.

➤ **Pelat dan balok** merupakan komponen struktur lentur.

➤ **Dinding geser** adalah komponen struktur yang berfungsi untuk meningkatkan kekakuan struktur menahan gaya-gaya lateral.

➤ **Tulangan** adalah batang baja berbentuk polos atau ulir (*deform*) atau pipa yang berfungsi untuk menahan gaya tarik maupun gaya tekan pada komponen struktur. Jenis tulangan dibedakan sebagai **tulangan polos** berupa batang baja yang permukaan sisi luarnya rata tidak bersirip atau berulir: **tulangan deform**, yaitu batang baja bersirip atau berulir, sedangkan **tulangan spiral** adalah tulangan yang dililitkan secara menerus membentuk suatu ulir lingkar silindris.

➤ **Tulangan sengkang** adalah tulangan yang digunakan untuk menahan tegangan geser dan torsi dalam suatu komponen struktur. Sengkang dibuat dari batang tulangan, kawat baja atau jaring kawat las polos atau *deform*, berbentuk kaki tunggal atau dibengkokkan dalam bentuk L, U atau persegi dan dipasang tegak lurus atau membentuk sudut terhadap tulangan utama komponen struktur lentur, balok atau kolom. Pada kolom umumnya dipasang **sengkang ikat**, yaitu sengkang tertutup penuh.

Dalam perencanaan struktur bangunan, baik bangunan bertingkat maupun bangunan sederhana haruslah terlebih dahulu memiliki perencanaan terhadap kuat tekan beton yang akan di

rencanakan. Umumnya klasifikasi beton dapat dibedakan berdasarkan berat jenis dan kuat tekannya.

Berdasarkan **berat jenisnya**, beton dapat dibedakan menjadi:

1. Beton ringan memiliki berat jenis di bawah 1800 kg/m^3 ,
2. Beton normal memiliki berat jenis 2400 kg/m^3 , dan
3. Beton berat memiliki berat jenis di atas 3200 kg/m^3 .

Sedangkan untuk **kuat tekan**, klasifikasi beton dapat di bedakan berdasarkan:

1. Beton Mutu Rendah merupakan beton yang memiliki kuat tekan kurang dari 20 MPa ,
2. Beton Mutu Sedang merupakan beton yang memiliki kuat tekan antara $(20-40) \text{ MPa}$, dan
3. Beton Mutu Tinggi merupakan beton yang memiliki kuat tekan $> 40 \text{ MPa}$.

1.4 Beton Normal

Beton normal adalah beton yang mempunyai berat isi antara $(2200-2500) \text{ kg/m}^3$ menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah serta tidak menggunakan bahan tambahan. Beton normal mempunyai kekuatan tekan nominal berkisar antara $20 \text{ MPa} - 60 \text{ MPa}$. Dalam klasifikasi beton, yang termasuk beton normal adalah kelas II yaitu beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan dibawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Pada beton kelas II, untuk pertimbangan-pertimbangan tertentu bila diinginkan mutu lain dari pada mutu standar yang telah disebutkan diatas, maka hal itu diijinkan asal syarat-syarat yang ditentukan tetap dipenuhi. Dalam hal ini mutu beton tersebut dinyatakan dengan huruf ($f'c$) diikuti dengan angka dibelakangnya, yang menyatakan kekuatan karakteristik beton yang bersangkutan.

1.5 Beton Mutu Tinggi

Meskipun teknologi beton telah terbukti kemampuannya, namun karena tuntutan konstruksi terhadap kekuatan dan keawetan, teknologi ini dapat ditingkatkan efektifitas kinerjanya dengan memperbaiki mutu beton yang dikcnal dengan sebutan beton mutu tinggi. Banyak yang mendefinisikan tentang kategori beton mutu tinggi disesuaikan dengan kuat tekannya, seperti misalnya:

- CSA mendefinisikan beton mutu tinggi untuk beton dengan kuat tekan $f'c$ lebih besar dari 70 MPa .
- ACI mendefinisikan beton mutu tinggi untuk beton dengan kuat tekan $f'c$ lebih besar dari 60 MPa .
- Sedangkan Firlandia, kategori beton sebagai berikut *High Strength Concrete* adalah beton yang mempunyai kekuatan tekan nominal sampai dengan 100 MPa .

Karena beton ini memiliki kekuatan yang tinggi maka sering disebut dengan *High Strength Concrete* (HSC), selain memiliki kekuatan yang tinggi, beton ini juga memiliki keawetan yang tinggi sehingga disebut juga *High Performance Concrete* (HPC). Perbedaan yang jelas antara beton mutu tinggi dengan beton normal adalah faktor air semen (f.a.s) yang digunakan. Pada beton mutu tinggi faktor air semen yang digunakan rendah sehingga proses pengeringannya lebih cepat. Teknologi beton mutu tinggi telah banyak digunakan dalam konstruksi konstruksi, baik dalam konstruksi gedung, jembatan maupun untuk konstruksi beton pratekan. Ada beberapa alasan mengapa beton mutu tinggi ini digunakan, diantaranya adalah:

1. Pada bangunan tinggi (struktur kolom, balok, pelat, core atau *shearwall*)
 - Kekuatan yang dicapai dapat lebih tinggi dibandingkan beton biasa. Pengerjaan yang lebih mudah.

- Kekakuan frame yang lebih tinggi
 - Lebih ekonomis karena dapat dikerjakan lebih cepat dan mudah
 - Mempunyai daktilitas sendi-sendi balok pada frame yang lebih tinggi. Bila digunakan pada struktur pelat akan lebih tipis.
2. Industri komponen pracetak-pratekan (komponen balok, kolom, pipa tiang listrik, *sheet pile*, tiang pancang, pelat atap atau pelat lantai):
 - Mempunyai berat yang ringan, sehingga memudahkan untuk pengangkatan.
 - Beban retaknya lebih tinggi.
 - Penggunaan untuk komponen pelat tidak memerlukan perancah.
 - Mempunyai ketahanan geser pons yang lebih tinggi. Lebih tahan terhadap lingkungan agresif.
 - Memiliki nilai dari pratekan yang lebih tinggi.
 3. Untuk jembatan:
 - Dapat meningkatkan bentang jembatan.
 - Mempunyai *creep* dan susut yang kecil.
 - Beban ringan sehingga dapat mengurangi beban struktur P.

1.6 Peraturan Desain dan Tata Cara Perhitungan Komponen Beton Bertulang

Bagi perencanaan komponen struktur beton bertulang, harus terpenuhi ketentuan bahwa semua komponen struktur diproporsikan untuk mendapatkan kekuatan yang cukup sesuai dengan ketetapan dalam buku tata cara perhitungan struktur beton. Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung (SNI-2847-2019) dengan faktor beban dan faktor reduksi kekuatan (ϕ). Prosedur dan asumsi dalam perencanaan besarnya beban rencana bagi analisis didasarkan pada kondisi struktur yang menerima beban yang mungkin bekerja padanya. Besarnya beban kerja diperhitungkan berdasarkan (PPI-1981), tentang peraturan pembebahan indonesia untuk gedung 1981, (SNI 1727-1989), tentang tata cara perencanaan pembebahan untuk rumah dan gedung, (SNI 1727:2013), beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain.

Analisis komponen struktur harus mengikuti ketentuan, bahwa semua komponen struktur dari rangka atau konstruksi elemen kontinum harus direncanakan terhadap pengaruh maksimum dari beban terfaktor yang dihitung sesuai dengan analisis teori elastis, kecuali bagian yang telah dimodifikasi menurut ketentuan dalam SNI 03-2847-2002 ayat 10.4 perihal redistribusi momen negatif.

Analisis struktur menurut cara-cara mekanika teknik yang baku merupakan pra-perencanaan bagi desain beton bertulang. Besarnya tanggap penampang akibat pembebahan menentukan desain. Analisis dengan bantuan komputer dalam mendapatkan tanggap sistem struktur berupa gaya-gaya dalam harus dilakukan dengan pemodelan matematika yang men-simulasikan keadaan struktur yang sesungguhnya dilihat dari segi sifat bahan dan kekakuan unsur-unsurnya. Secara umum terdapat dua konsep desain dalam perencanaan konstruksi beton bertulang, yaitu metoda desain tegangan kerja (*Allowable Stress Design, ASD*) dan ultimate (*Ultimate Stress Design, USD*). Sampai akhir tahun 80-an hampir semua bangunan gedung di Indonesia di desain dengan metoda desain tegangan kerja (metoda elastis), tetapi sejak awal tahun 1990 penggunaan metoda desain *ultimate* menjadi lebih popular dibandingkan dengan metoda tegangan kerja, (SNI 03-2847-2019, 2019; SNI, 2013).

Dalam perkembangannya, peraturan beton Indonesia telah mengalami beberapa kali perubahan. Hal ini disebabkan adanya kemajuan teknologi dalam bidang material dan pelaksanaan serta pengaruh peraturan beton Negara lain. Peraturan beton yang pernah berlaku di Indonesia adalah sebagai berikut:

- a. Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBI) 1955
- b. Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBI) 1971
- c. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK SNI T-15-1991-03)
- d. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK SNI T-03-2847-2002)
- e. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK SNI- 2847-2013)
- f. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK SNI- 2847-2019)

PBI 1955 dan PBI 1971 masih mengacu pada metoda desain tegangan kerja (metoda elastis), sedangkan SK SNI T-15-1991-03, SK SNI 03-2847-2002, SK SNI- 2847-2013, dan SK SNI- 2847-2019 mengacu pada metoda desain *ultimate*.

Struktur dan komponen struktur harus direncanakan terhadap kombinasi beban dan gaya terfaktor menurut ketentuan:

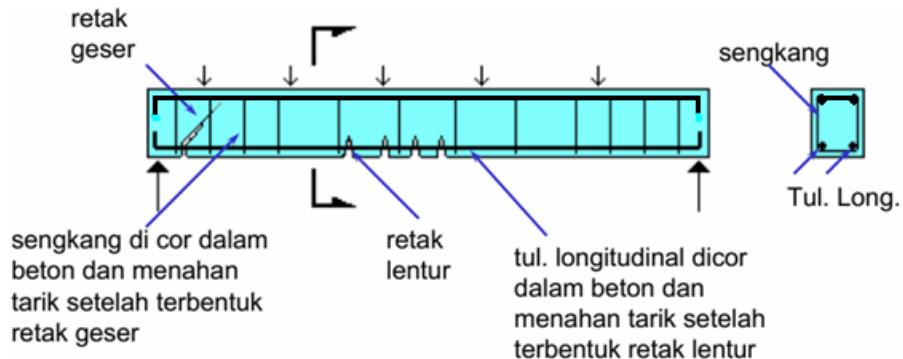
1. Struktur dan komponen struktur direncanakan hingga semua penampang mempunyai kuat rencana minimum sama dengan kuat perlu, yang dihitung berdasarkan kombinasi beban dan gaya terfaktor yang sesuai dengan ketentuan Persyaratan beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI-2847-2019).
2. Komponen struktur juga harus memenuhi ketentuan lain yang tercantum dalam SK SNI T-15-1991-03 untuk menjamin tercapainya perilaku struktur yang cukup baik pada tingkat beban kerja.

1.7 Beton dan Beton Bertulang

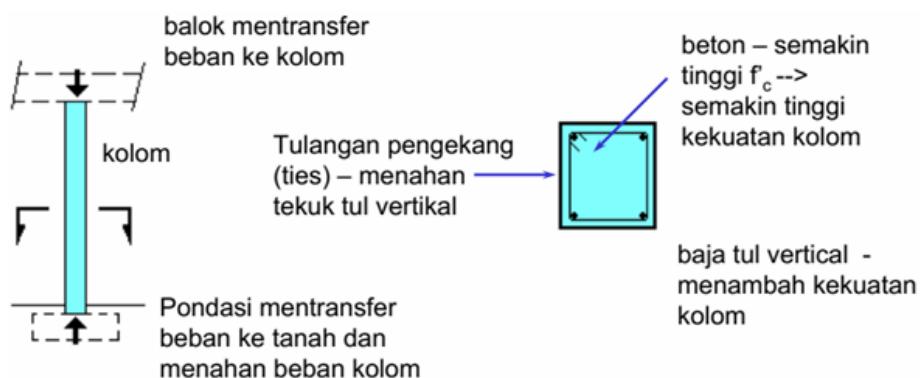
Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah, atau agregat-agregat lain yang dicampur menjadi satu dengan pasta yang terbuat dari semen dan air. Beton memiliki kuat tekan yang tinggi dan kuat tarik yang sangat lemah. Beton bertulang merupakan kombinasi antara beton dan batangan baja yang digunakan secara bersama, dimana tulangan baja berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki beton. Oleh karena itu desain struktur elemen beton bertulang dilakukan berdasarkan prinsip yang berbeda dengan perencanaan desain satu bahan.

Beton bertulang merupakan bahan konstruksi yang umum digunakan dalam berbagai bentuk pada hampir semua struktur seperti bangunan gedung, jembatan, dinding penahan tanah, terowongan, tangki, saluran air dan lainnya, yang dirancang dari prinsip dasar desain dan penelitian elemen beton bertulang yang menerima gaya aksial, momen lentur, gaya geser, momen puntir, atau kombinasi dari jenis gaya-gaya dalam tersebut. Prinsip dasar desain ini berlaku umum bagi setiap tipe sistem struktur selama diketahui variasi gaya aksial, momen lentur, gaya geser dan unsur gaya dalam lainnya, disamping konfigurasi bentang dan dimensi setiap elemen.

Pada beton bertulang, unsur beton mempunyai kekuatan tekan yang besar, tetapi tidak mampu menerima tegangan tarik. Ini berarti tulangan baja yang ditanam dalam beton menjadi unsur kekuatan yang memikul tegangan tarik. Seperti dalam Gambar 1.1 dan Gambar 1.2, kapasitas balok dan kolom akan meningkat lebih besar jika tulangan baja ditanam pada bagian tarik (sisi atas pada tumpuan dan sisi bawah pada bentang lapangan) penampang.



Gambar 1. 1 Balok beton bertulang.



Gambar 1. 2 Kolom beton bertulang.

Tulangan baja juga digunakan untuk menerima tegangan tekan, karena baja sanggup menahan kekuatan tekan seperti kekuatan tarik. Pemasangan tulangan pada zona tekan dinamakan tulangan tekan, seperti pada penulangan elemen balok.

Kombinasi kerja antara beton dan baja berdasarkan beberapa hal:

1. Lekatan antara tulangan baja dengan beton yang mencegah slip tulangan terhadap beton (sifat *monolit* bahan).
2. Kedap beton yang mencegah proses korosi tulangan.
3. Derajat ekspansi panas yang sama antara baja dan beton yang meniadakan beda tegangan antara dua permukaan bahan.

1.8 Kelebihan Beton Bertulang Sebagai Bahan Struktur

Sukses besar beton sebagai bahan konstruksi dikarenakan beton bertulang memiliki beberapa kelebihan antara lain:

1. Beton memiliki kuat tekan yang relative lebih tinggi dibandingkan dengan bahan lain.
2. Beton bertulang mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap api dan air, bahkan merupakan bahan struktur terbaik untuk bangunan yang banyak bersentuhan dengan air. Pada peristiwa kebakaran, batang-batang struktur beton bertulang dengan ketebalan penutup beton (selimut beton) yang memadai dapat melindungi tulangan dari kerusakan sehingga mencegah keruntuhan.
3. Struktur beton bertulang sangat kokoh.
4. Beton bertulang tidak memerlukan biaya pemeliharaan yang tinggi.
5. Dibandingkan dengan bahan lain, beton bertulang memiliki usia layan yang sangat panjang. Kekuatan beton bertulang tidak berkurang dengan berjalaninya waktu.

6. Dalam penggunaan di lapangan, beton biasanya berbahan ekonomis untuk pondasi tapak, dinding basement, tiang tumpuan jembatan dan bangunan lainnya.
7. Beton dapat dicetak menjadi bentuk yang sangat beragam seperti pelat, balok, kolom, kubah dan cangkang yang besar.
8. Beton dapat dibuat dari bahan lokal daerah setempat yang murah (pasir, kerikil dan air).
9. Keahlian buruh untuk pekerjaan beton lebih rendah dibandingkan dengan struktur lain seperti baja.

1.9 Sifat dan Bentuk-Bentuk Baja Tulangan

Dalam merencanakan struktur perilaku dari tulangan sangatlah perlu untuk diperhatikan. Sifat-sifat penting pada baja tulangan yang perlu diperhatikan saat melakukan desain adalah:

1. *Modulus young*/ modulus elastisitas Es pada baja tulangan non-pratekan sebesar 200.000 MPa.
2. Kekuatan leleh, f_y . Mutu baja yang digunakan biasanya dinyatakan dengan kuat lelehnya. Kuat leleh/ tegangan leleh baja pada umumnya adalah $f_y = 240$ MPa, $f_y = 300$ MPa, dan $f_y = 400$ MPa.
3. Kekuatan batas, f_u .
4. Ukuran/ diameter baja tulangan.

Besi/ baja tulangan dapat diklasifikasikan dalam beberapa jenis diantaranya sebagai berikut:

1. **Baja Tulangan Beton polos (BjTP)** adalah baja tulangan beton berpenampang bundar dengan permukaan rata tidak bersirip. Tegangan leleh minimum pada besi tulangan polos biasanya sebesar 240 MPa. Menurut SNI 2052:2014 panjang baja tulangan beton ditetapkan antara (10-12) m.



Gambar 1. 3 Besi/ Tulangan Polos.

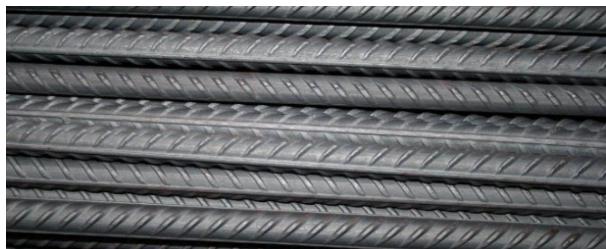
Umumnya ukuran/ diameter baja tulangan beton polos (BjTP) yang beredar di pasaran berbeda-beda. Tabel di bawah ini akan menjelaskan ukuran dan luasan tulangan yang ada di Indonesia sesuai dengan SNI 2052:2014.

Tabel 1. 1 Ukuran Baja Tulangan Beton Polos

No	Penamaan	Diameter nominal (d)	Luas Penampang Nominal (A)	Berat Nominal per meter
		(mm)	(cm ²)	(kg/m)
1	P.6	6	0,2827	0,222
2	P.8	8	0,5027	0,395
3	P.10	10	0,7854	0,617
4	P.12	12	1,131	0,888
5	P.14	14	1,539	1,21
6	P.16	16	2,011	1,58
7	P.19	19	2,835	2,23
8	P.22	22	3,801	2,98
9	P.25	25	4,909	3,85

10	P.28	28	6,158	4,83
11	P.32	32	8,042	6,31
12	P.36	36	10,17	7,99
13	P.40	40	12,56	9,86
14	P.50	50	19,64	15,4

2. **Baja Tulangan Beton Sirip (*deform*)/ (Ultr=BJTS)** adalah baja tulangan beton dengan bentuk khusus yang permukaannya memiliki sirip melintang dan memanjang yang dimaksudkan untuk meningkatkan daya lekat dan guna menahan gerakan membujur dari batang secara relatif terhadap beton. Tegangan leleh minimum pada baja tulangan *deform* biasanya sebesar 400 MPa.



Gambar 1. 4 Besi/ Tulangan Sirip/ Deform.

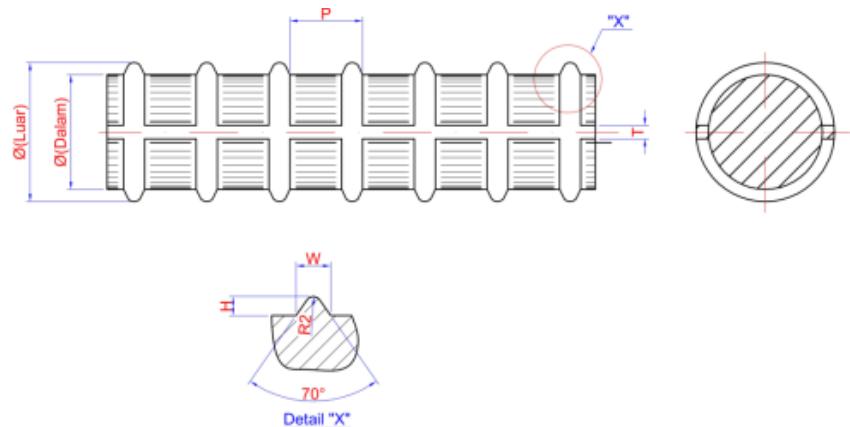
Untuk ukuran/ diameter **Baja Tulangan Beton Sirip (*deform*)/ (Ultr=BJTS)**, tabel di bawah ini akan menjelaskan ukuran dan luasan tulangan yang ada di Indonesia sesuai dengan SNI 2052:2014.

Tabel 1. 2 Ukuran Baja Tulangan Beton Sirip

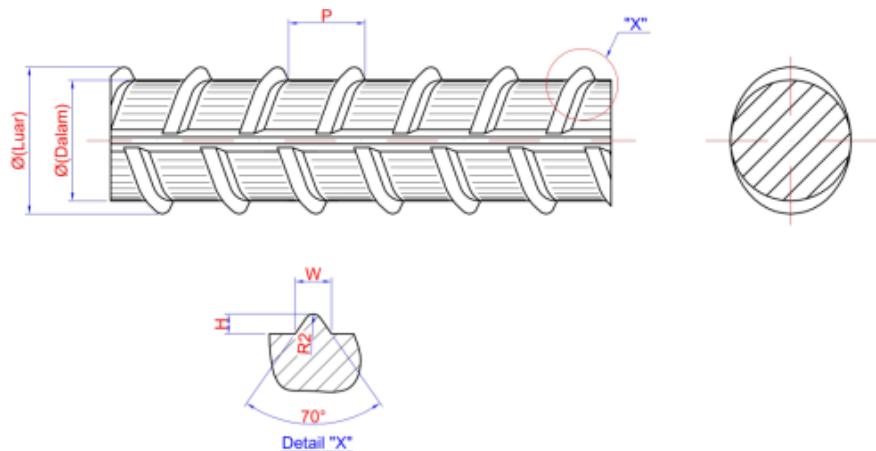
No	Penamaan	Diameter nominal (d) mm	Luas Penampang Nominal (A) cm ²	Diameter dalam minimal (d ₀) mm	Tinggi Sirip		Jarak sirip melintang (maks) mm	Lebar sirip membujur (maks) mm	Berat Nominal per meter kg/m
					min	maks			
1	S.6	6	0,2827	5,5	0,3	0,6	4,2	4,7	0,222
2	S.8	8	0,5027	7,3	0,4	0,8	5,6	6,3	0,395
3	S.10	10	0,7854	8,9	0,5	1,0	7,0	7,9	0,617
4	S.13	13	1,327	12,0	0,7	1,3	9,1	10,2	1,04
5	S.16	16	2,011	15,0	0,8	1,6	11,2	12,6	1,58
6	S.19	19	2,835	17,8	1,0	1,9	13,3	14,9	2,23
7	S.22	22	3,801	20,7	1,1	2,2	15,4	17,3	2,98
8	S.25	25	4,909	23,6	1,3	2,5	17,5	19,7	3,85
9	S.29	29	6,625	27,2	1,5	2,9	20,3	22,8	5,18
10	S.32	32	8,042	30,2	1,6	3,2	22,4	25,1	6,31
11	S.36	36	10,18	34,0	1,8	3,6	25,2	28,3	7,99
12	S.40	40	12,57	38,0	2,0	4,0	28,0	31,4	9,88
13	S.50	50	19,64	48,0	2,5	5,0	35,0	39,3	15,4
14	S.54	54	22,902	50,8	2,7	5,4	37,8	42,3	17,9
15	S.57	57	25,518	53,6	2,9	5,7	39,9	44,6	20,0

Berdasarkan SNI 2052:2014 baja tulangan beton sirip dapat dibagi atas 3 jenis diantaranya:

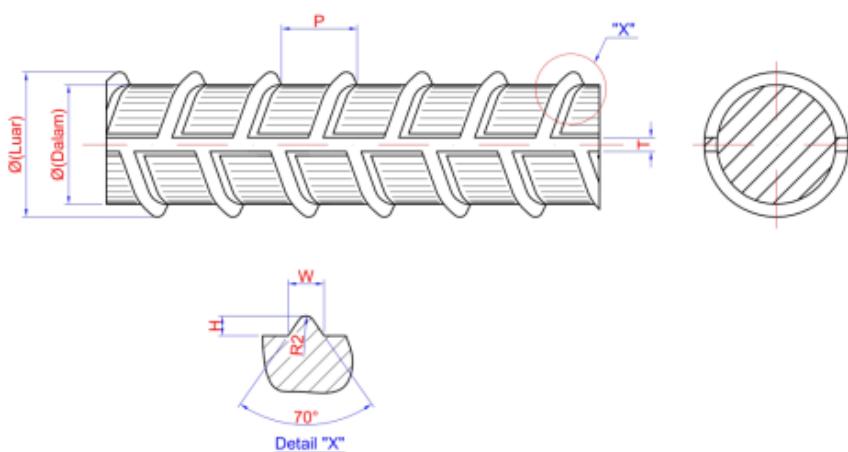
1. Sirip Bambu



2. Sirip Curam



3. Sirip Tulang Ikan



3. **Jaring kawat baja (wiremesh)**, merupakan sekumpulan tulangan polos atau tulangan ulir yang di las satu sama lain sehingga membentuk grid (jaringan). Biasanya digunakan untuk lantai/ slab dan dinding



Gambar 1. 5 Jaring kawat baja (*wiremash*)

1.10 Kelemahan Beton Bertulang Sebagai Bahan Struktur

Dalam desain perencanaan struktur, beton memiliki kelebihan dan kekurangannya saat digunakan sebagai bahan material berdirinya suatu struktur/ gedung. Adapun kelemahan dari struktur beton bertulang diantaranya:

1. Beton memiliki kuat tarik yang sangat rendah, sehingga memerlukan penggunaan tulangan tarik.
2. Beton bertulang memerlukan bekisting untuk menahan beton tetap ditempatnya sampai beton tersebut mengeras. Selain itu juga diperlukan penyangga sementara untuk menjaga bekisting tetap berada ditempatnya, seperti pada pada atap, dinding dan struktur-struktur sejenis sampai beton ini cukup kuat menahan beratnya sendiri. Untuk bekisting dan penyangga ini memerlukan biaya tambahan yang cukup besar.
3. Rendahnya kekuatan per-satuan berat dari beton mengakibatkan beton bertulang menjadi berat. Ini akan berpengaruh pada struktur-struktur bentang panjang dimana berat sendiri elemen akan mempengaruhi momen lentur. Rendahnya kekuatan per-satuan volume mengakibatkan beton akan berukuran relatif besar yang merupakan hal penting yang harus dipertimbangkan untuk bangunan-bangunan tinggi dan struktur bentang panjang.
4. Sifat-sifat beton sangat bervariasi karena variasi proporsi campuran, pengadukan, penuangan, dan perawatan beton.

1.11 Pembebaan Pada Struktur

Beban yang bekerja pada struktur dapat dikelompokan dalam 3 (tiga) bagian, yaitu beban mati (DL), beban hidup (LL) dan beban akibat pengaruh alam angin dan gempa (WL and EL).

a. Beban Mati (*Dead Load*)

Adalah beban gravitasi yang berasal dari berat semua komponen gedung/ bangunan yang bersifat permanen selama masa layan struktur tersebut. Bagian utama dari beban mati merupakan berat sendiri dari elemen struktur itu sendiri. Beban mati termasuk juga material penutup lantai dan dinding bata. Tabel 1.3 menunjukkan besarnya nilai dari beban mati pada struktur bangunan.

Tabel 1. 3 Berat Material Bangunan

No.	Keterangan	Berat	
1.	Baja	78.50 kN/m ³	7850 kg/m ³
2.	Batu alam	26.00 kN/m ³	2600 kg/m ³
3.	Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	15.00 kN/m ³	1500 kg/m ³
4.	Batu karang (berat tumpuk)	7.00 kN/m ³	700 kg/m ³
5.	Batu pecah	14.50 kN/m ³	1450 kg/m ³
6.	Besi tuang	72.50 kN/m ³	7250 kg/m ³
7.	Beton	22.00 kN/m ³	2200 kg/m ³
8.	Beton bertulang	24.00 kN/m ³	2400 kg/m ³
9.	Kayu (Kelas 1)	10.00 kN/m ³	1000 kg/m ³
10.	Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	16.50 kN/m ³	1650 kg/m ³
11.	Pasangan bata merah	17.00 kN/m ³	1700 kg/m ³
12.	Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	22.00 kN/m ³	2200 kg/m ³
13.	Pasangan batu cetak	22.00 kN/m ³	2200 kg/m ³
14.	Pasangan batu karang	14.50 kN/m ³	1450 kg/m ³
15.	Pasir (kering udara sampai lembab)	16.00 kN/m ³	1600 kg/m ³
16.	Pasir (jenuh air)	18.00 kN/m ³	180 kg/m ³
17.	Pasir kerildl, koral (kering udara sampai lembab)	18.50 kN/m ³	1850 kg/m ³
18.	Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	17.00 kN/m ³	1700 kg/m ³
19.	Tanah, lempung dan lanau (basah)	20.00 kN/m ³	2000 kg/m ³
20.	Timah hitam (timbel)	114.0 kN/m ³	1140 kg/m ³

b. Beban Hidup (*Live Load*)

Merupakan beban yang timbul akibat penggunaan suatu gedung selama masa layan gedung tersebut. Beban hidup berupa beban yang tidak tetap, seperti beban yang bekerja pada bangunan hunian. Beban hidup minimum ruang kelas/ sekolah biasanya ditetapkan 2,50 kN/m². Beban hidup ruang perpustakaan/ ruang mesin 4,0 kN/m². Besar beban hidup secara statistik ditetapkan di dalam peraturan sebagai beban mati. Tabel 1.4 memberikan besarnya beban hidup pada lantai gedung (SKBI-1.3.5.3-1987).

Beban lingkungan yang bekerja pada sistem struktur merupakan efek dari alam. Angin, air hujan perubahan temperatur, gempa, penurunan tanah (*settlement*), dan tekanan air tanah merupakan jenis beban lingkungan yang harus diperhitungkan bekerja pada sistem struktur. Beban-beban ini besarnya tergantung lokasi bangunan. Bangunan yang terletak di daerah pantai akan menerima beban angin lebih besar dari bangunan yang ada di pedalaman. Begitu

juga bangunan yang berada di daerah rawan gempa dibandingkan dengan daerah yang tidak ada pengaruh gempanya.

Tabel 1. 4 Besarnya Intensitas Beban Hidup Pada Lantai Gedung

No.	Keterangan	kN/m ²	kg/ m ²
1.	Lantai dan tangga rumah tinggal	2.0	200
2.	Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana dan gudang-gudang tidak penting yang bukan untuk toko, pabrik atau bengkel	1.5	125
3.	Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran hotel asrama dan rumah sakit	2.5	250
4.	Lantai ruang olah raga	4.0	400
5.	Lantai ruang dansa	5.0	500
6.	Lantai dan balkon dalam dan ruang - ruang untuk perternuan yang lajn daripada yang disebut dalam a sampai drngan seperti mesjid, gereja, ruang pagelaran, ruang rapat, bioskop dan panggung penonton dengan tempat duduk tetap.	3.0	300
7.	Panggung penonton dengan tempat duduk tidak tetap atau untuk penonton yang berdiri	5.0	500
8.	Tangga, hordes tangga dan gang dari yang disebut dalam 3	3.0	300
9.	Tangga, hordes tangga dan gang dan yang disebut dalam 4, 5 , 6 dan 7.	5.0	500
10.	Lantai ruang pelengkap dan yang disebut dalam 3, 4, 5, 6 dan 7	2.5	250
11.	Lantai untuk pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, toko besi, niang alat-alat dan ruang mesin, harus direncanakan terhadap beban hidup yang ditentukan tersendiri, dengan minimum	4.0	400
12.	Lantai gedung parkir bertingkat: - untuk lantai bawah - untuk lantai tingkat lainnya	8.0 4.0	800 400
13.	Balkon-balkon yang menjorok bebas keluar harus direncanakan terhadap beban hidup dan lantai ruang yang berbatasan, dengan minimum	3.0	400

c. Beban angin

Beban angin disebabkan oleh pergerakan udara karena perbedaan tekanan udara yang ditimbulkan oleh pemanasan bumi yang tidak sama. SKBI-1.3.5.3-1987 pasal 2.1.3.2 memberikan batasan minimum tekanan angin sebagai berikut.

1. Tekanan tiup minimum 25 kg/m^2

2. Tekanan tiup minimum 40 kg/m^2 (dilaut dan tepi laut sampai 5 km dari pantai)
3. Jika kecepatan angin bisa menimbulkan tekanan yang besar lagi, dapat digunakan sebagai

$$P = \frac{V^2}{16} (\text{kg/m}^2)$$
4. Untuk Cerobong tekanan tiup dalam kg/m^2 ditentukan dengan $(42,5 + 0,6h)$ h = tinggi cerobong seluruhnya dalam meter.

Dalam perencanaan struktur, beban angin tidak terlalu berpengaruh karena iklim di Indonesia hanya mengenal dua musim sehingga variasi faktor yang berpengaruh pada beban angin tidak terlalu banyak dan potensi terjadinya angin badai relatif kecil.

d. Beban Gempa

Merupakan beban dalam arah horizontal dari struktur yang ditimbulkan oleh adanya gerakan tanah akibat gempa bumi, baik dalam arah vertikal maupun horizontal. Beban gempa berasal dari gaya inersia bangunan dalam arah horizontal yang disebabkan oleh adanya percepatan tanah akibat gempa (*ground acceleration*). Besarnya gaya inersia yang terjadi terutama tergantung pada besarnya massa bangunan, intensitas percepatan tanah, interaksi struktur terhadap tanah dan sifat dinamis bangunan seperti waktu getar alami dan nilai redaman struktur. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (1726-2019) mengatur beban gempa untuk struktur gedung.

Besarnya gaya gempa yang bekerja pada dasar struktur/ bangunan ditentukan dengan:

$$V = C_s \times W$$

C_s = Koefisien respon seismik yang ditentukan berdasarkan respons spectrum pada lokasi bangunan serta jenis sistem struktur yang digunakan

W = Berat seismik efektif yang berisi seluruh beban mati dan beban lainnya yang diisyaratkan dalam peraturan mengenai gempa

1.12 Kuat Perlu dan Kuat Rencana

Konsep perencanaan yang dianut oleh SNI adalah berbasis kekuatan atau yang dikenal dengan LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), maka persyaratan dasar yang harus dipenuhi dalam desain adalah:

Kuat Rencana \geq Kuat Perlu

ϕ (Kuat Nominal) $\geq U$

Untuk elemen struktur yang memiliki momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial, dapat dirumuskan dengan:

$$\phi M_n \geq M_u$$

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$\phi P_n \geq P_u$$

Suatu elemen struktur harus direncanakan mempunyai kapasitas kekuatan (kuat rencana) yang sama dengan atau lebih besar daripada berbagai kombinasi pembebanan yang bekerja (kuat perlu) pada struktur tersebut. Beberapa istilah yang biasanya digunakan dalam perencanaan struktur adalah:

- a. Kuat nominal (N) merupakan kekuatan teoritis maksimum dari struktur atau elemen struktur.

- b. Kuat rencana (R) suatu komponen struktur sehubungan dengan perilaku lenturnya, geser, torsi dan aksial, harus diambil sebagai kuat nominal dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan (ϕ) yang lebih kecil dari 1.
- c. Kuat perlu (U) merupakan kekuatan struktur atau elemen struktur yang diperlukan untuk menahan beban terfaktor dengan berbagai kombinasi efek beban.

Faktor keamanan dalam perencanaan struktur maupun elemen struktur dalam SNI 2847-2019 pada pasal 4.2.2 tentang kombinasi beban untuk metode ultimit dapat dibagi dalam dua bagian yaitu keamanan dari faktor beban dan faktor reduksi kekuatan (ϕ). Faktor beban yang memenuhi syarat kekuatan dan layak pakai terhadap berbagai kombinasi beban, adalah sebagai berikut, (SNI 03-2847-2019, 2019):

1. Kuat perlu U yang menahan beban mati D paling tidak harus sama dengan

$$U = 1.4D$$
2. Kuat perlu U untuk menahan beban mati D , beban hidup L , dan juga beban atap A atau beban hujan R , dengan beban utama beban hidup L , dapat dihitung dengan:

$$U = 1.2 D + 1.6 L + 0.5 (L_r \text{ atau } R)$$
3. Bila ketahanan struktur terhadap beban mati D , beban hidup di atap L_r atau beban air hujan R , beban hidup L dan angin W harus diperhitungkan dalam perencanaan, maka pengaruh kombinasi beban D , L , dan W , dengan beban utama beban hidup di atap L_r atau beban air hujan R , berikut harus ditinjau untuk menentukan nilai U yang terbesar, yaitu:

$$U = 1.2 D + 1.6 (L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$$
4. Kuat perlu U untuk menahan beban mati D , beban hidup L , dan juga beban hidup di atap L_r atau beban air hujan R , dengan beban utama beban angin W , paling tidak harus sama dengan:

$$U = 1.2 D + 1,0W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$$
5. Kombinasi beban juga harus memperhitungkan beban mati D dan beban angin W , dengan beban utama beban angin W , yaitu:

$$U = 0.9 D + 1,0 W$$
6. Bila ketahanan struktur terhadap beban gempa E pada arah vertikal E_v dan arah horizontal E_h dan beban hidup L , harus diperhitungkan dalam perencanaan, dengan beban utama adalah beban gempa E , maka nilai kuat perlu U harus diambil sebagai:

$$U = 1.2 D + 1,0 E + 1,0 L$$

atau

$$7. U = 0.9 D + 1,0 E$$

Dalam hal ini nilai E ditetapkan berdasarkan ketentuan SNI 1726-2019, Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk rumah dan gedung, dengan beban utama adalah beban gempa E .
8. Bila ketahanan terhadap pembebanan akibat berat dan tekanan fluida, F , yang berat jenisnya dapat ditentukan dengan baik, dan ketinggian maksimumnya terkontrol, diperhitungkan dalam perencanaan, maka beban tersebut harus dikalikan dengan faktor beban 1.4, dan ditambahkan pada persamaan yaitu:

$$U = 1.4 (D + F)$$

9. Bila ketahanan terhadap pengaruh kejut diperhitungkan dalam perencanaan maka pengaruh tersebut harus disertakan pada perhitungan beban hidup L.
10. Bila pengaruh struktural T dari perbedaan penurunan fondasi, rangkak, susut, ekspansi beton, atau perubahan suhu sangat menentukan dalam perencanaan, maka kuat perlu U minimum harus sama dengan:

$$U = 1.2(D + T) + 1.6L + 0.5(A \text{ atau } R)$$
Perkiraan atas perbedaan penurunan fondasi, rangkak, susut, ekspansi beton, atau perubahan suhu harus didasarkan pada pengkajian yang realistik dari pengaruh tersebut selama masa pakai.
11. Untuk perencanaan daerah pengangkuran pasca tarik harus digunakan faktor beban 1.2 terhadap gaya penarikan tendon maksimum.
12. Jika pada bangunan terjadi benturan yang besarnya P, maka pengaruh beban tersebut.

Faktor reduksi (ϕ) yang digunakan untuk memberikan keamanan tertentu pada struktur maupun komponen struktur terhadap kemungkinan perbedaan dimensi penampang, kualitas material ataupun kualitas pelaksanaan pekerjaan yang mungkin terjadi antara pelaksanaan di lapangan dengan asumsi-asumsi yang diambil dalam perencanaan.

Pasal 11.3 SK SNI 03-2847-2002 pasal 11 memberikan nilai faktor reduksi kekuatan (ϕ) sebagai berikut

Tabel 1. 5 Faktor reduksi kekuatan

No	Tipe beban dan komponen struktur	Faktor reduksi
1	Lentur, tanpa beban aksial	0.90
2	Beban aksial, dan beban aksial dengan lentur (untuk beban aksial dengan lentur, kedua nilai kuat nominal dari beban aksial dan momen harus dikalikan dengan nilai ϕ tunggal yang sesuai) <ol style="list-style-type: none"> Aksial tarik dan aksial tarik dengan lentur Aksial tekan dan aksial tekan dengan lentur <ul style="list-style-type: none"> Komponen struktur tulangan spiral Komponen struktur lainnya 	0.9 0.75 0.65
3	Geser dan torsi	0.85
4	Untuk lentur, tekan, geser dan tumpu pada beton polos struktural	0.65

1.13 Kriteria Desain Struktur dan Elemen Struktur

Secara umum pada suatu struktur atau elemen struktur beton bertulang akibat beban luar akan bekerja gaya-gaya dalam struktur seperti momen lentur, geser aksial dan momen torsi. Elemen struktur balok, kolom, pelat, dan pondasi akan memikul dua atau lebih gaya-gaya dalam tersebut,

tergantung dari fungsinya. Elemen struktur balok dan pelat biasanya memikul momen lentur dan geser. Sedangkan elemen kolom dan pondasi akan memikul gaya aksial dan momen lentur.

Dari kondisi tersebut diatas, agar struktur ataupun elemen struktur mampu memikul beban-beban yang bekerja, maka struktur atau elemen struktur tersebut harus memenuhi kriteria desain berikut:

- Kriteria desain elemen struktur balok dan pelat:

- Untuk beban lentur:**

$$M_R = \phi \cdot M_n \geq M_u$$

Dimana:

M_R = Momen rencana untuk desain

M_n = Momen nominal penampang

M_u = Momen ultimate akibat beban terfaktor

ϕ = Faktor reduksi (untuk lentur $\phi = 0.8$)

- Untuk beban geser:**

$$V_R = \phi \cdot V_n \geq V_u$$

Dimana:

V_R = Momen rencana untuk desain

V_n = Momen nominal penampang

V_u = Momen *ultimate* akibat beban terfaktor

ϕ = Faktor reduksi (untuk geser $\phi = 0.75$)

- Kriteria desain elemen struktur kolom dan pondasi

- Untuk beban aksial**

$$P_R = \phi \cdot P_n \geq P_u$$

Dimana:

P_R = momen rencana untuk desain

P_n = momen nominal penampang

P_u = momen ultimate akibat beban terfaktor

ϕ = faktor reduksi (untuk aksial dengan tulangan spiral $\phi = 0.75$).

- Untuk beban lentur**

$$M_R = \phi \cdot M_n \geq M_u$$

- Untuk elemen struktur yang kemungkinan menahan momen torsi, dapat ditambahkan

$$T_R = \phi \cdot T_n \geq T_u$$

Dimana:

T_R = Momen rencana untuk desain

T_n = Momen nominal penampang

T_u = Momen *ultimate* akibat beban terfaktor

ϕ = Faktor reduksi (untuk torsi $\phi = 0.85$)

1.14 Latihan

- Jelaskan apa perbedaan antara beton dan beton bertulang.
- Dalam perencanaan/ desain beton bertulang apa saja yang perlu diperhatikan.
- Jelaskan keuntungan dan kerugian penggunaan beton bertulang.
- Sebutkan dan jelaskan klasifikasi beton berdasarkan berat jenis dan kuat tekannya.

BAB 2

KUAT TEKAN BETON, REGANGAN, TEGANGAN, DAN TEORI KEKUATAN BATAS

2.1 Pendahuluan

Pada pembelajaran kuat tekan beton, regangan, tegangan, dan teori kekuatan batas haruslah diperhatikan setiap perilaku (*behavior*) mutu kuat tekan beton (f'_c) dan jenis mutu tulangan (f_y) yang digunakan, karena hal ini sangatlah mempengaruhi kekuatan dan pola keruntuhan yang terjadi pada saat perencanaan/ desain struktur. Nilai kuat tekan beton (*compressive strength*), (f'_c) sangatlah diperlukan dalam perencanaan struktur beton bertulang karena mempengaruhi desain awal. Perilaku dan grafik regangan dan tegangan pada beton dan beton bertulang harus dapat di bedakan dan dipahami dengan baik dan jelas, karena hal ini sangat penting di dalam menentukan tulangan tarik dan tekan yang digunakan pada perencanaan struktur yang direncanakan sesuai dengan Standard Nasional Indonesia (SNI).

2.2 Kegiatan Pembelajaran: Kuat Tekan Beton (*Compressive Strength*), (f'_c)

1. Kemampuan akhir

Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari kuat tekan beton adalah kemampuan dalam menjelaskan perilaku dari setiap kuat tekan beton sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang 2019.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan pengertian dan perilaku pengujian kuat tekan beton (*compressive strength*), (f'_c).

2.3 Kuat Tekan Beton (*Compressive Strength*), (f'_c)

Dalam perencanaan suatu komponen struktur, biasanya diasumsikan bahwa beton memiliki tegangan tekan dan bukannya tegangan tarik. 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/ C39M-12a “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”. Umumnya benda uji yang digunakan berupa silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Menghitung kuat tekan benda uji dengan membagi beban maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang rata yang ditentukan dengan nilai 0,1 MPa. Kuat tekan beton dapat dihitung dengan:

$$\text{Kuat Tekan Beton } (\sigma) = \frac{P}{A}$$

Dengan pengertian:

Kuat tekan beton (σ) dengan benda uji silinder, dinyatakan dalam (MPa atau N/mm²)

P = Gaya tekan aksial, dinyatakan dalam Newton (N);

A = Luas penampang melintang benda uji, (mm²)

Beban P tersebut juga mengakibatkan bentuk fisik silinder beton berubah menjadi lebih pendek, sehingga timbul regangan tekan pada beton (ϵ_c') sebesar perpendekan beton (ΔL) dibagi dengan tinggi awal silinder beton (L_0) ditulis dengan rumus:

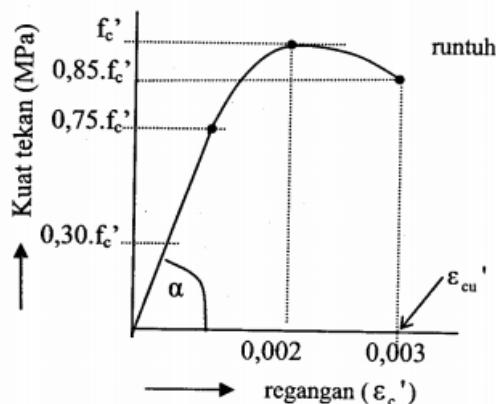
$$\varepsilon_c' = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Dengan:

ε_c' = Regangan tekan beton

ΔL = Perpendekan beton, (mm)

L_0 = Tinggi awal silinder beton (mm)



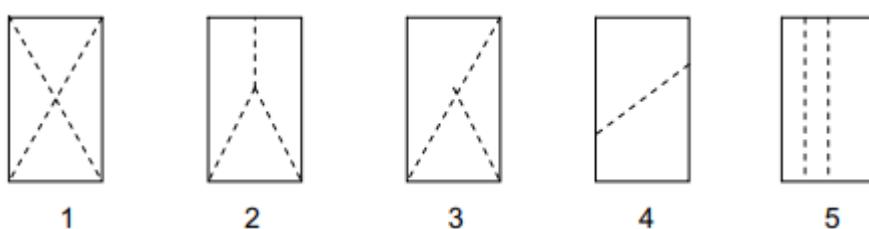
Gambar 2. 1 Tegangan dan Regangan pada benda uji silinder.

Jika perbandingan panjang (L) terhadap diameter (D) benda uji kurang dari 1,8, koreksi faktor ini berlaku untuk beton ringan dengan bobot 1600 kg/m³-1920 kg/m³ dan untuk beton normal. Koreksi hasil yang diperoleh dengan mengalikan dengan faktor koreksi yang sesuai dengan tabel berikut ini:

Tabel 2. 1 Faktor Koreksi Rasio Panjang (L) dengan Diameter (D) benda uji.

L/D	2,00	1,75	1,50	1,25	1,0
Faktor	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Pada pengujian silinder (kuat tekan beton) di laboratorium terjadi beberapa pola/ tipe keruntuhan yang diperoleh. Berdasarkan SNI 1974:2011 tipe/ pola keruntuhan yang terjadi pada beton silinder dibagi seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 2 Sketsa gambar tipe/ pola kehancuran pada benda uji silinder.

Keterangan:

1. Bentuk Kehancuran kerucut
2. Bentuk kehancuran kerucut dan belah
3. Bentuk kehancuran kerucut dan geser
4. Bentuk kehancuran geser
5. Bentuk kehancuran sejajar sumbu tegak (kolumnar)

Nilai kuat tekan beton yang diisyaratkan, f'_c diperoleh dari benda uji silinder standar yang dirawat dan telah berumur 28 hari. Nilai kuat tekan inilah yang dicantumkan dalam gambar kerja proyek dan digunakan dalam perhitungan. Untuk mencapai nilai kuat tekan yang diisyaratkan, f'_c maka nilai kuat tekan rerata, f'_{cr} harus ditentukan sebagai berikut:

- Untuk f'_c kurang atau sama dengan 35 MPa, diambil nilai terbesar dari:
 - $f'_{cr} = f'_c + 1,34s$
 - $f'_{cr} = f'_c + 2,33s - 3,5$
- Untuk f'_c lebih dari 35 MPa, diambil nilai terbesar dari:
 - $f'_{cr} = f'_c + 1,34s$
 - $f'_{cr} = 0,9f'_c + 2,33s$

Dengan s adalah nilai deviasi standar

Kuat tekan suatu mutu beton dapat dikategorikan memenuhi syarat jika dipenuhi:

- Setiap nilai rata-rata dari tiga uji kuat tekan yang berurutan mempunyai nilai yang sama atau lebih besar daripada f'_c .
- Tidak ada nilai uji kuat tekan yang dihitung sebagai nilai rata-rata dari dua hasil uji contoh silinder mempunyai nilai di bawah f'_c melebihi dari 3,5 MPa.

Banyak hal yang mempengaruhi nilai dari kuat tekan beton, diantaranya adalah rasio air-semen, jenis semen, bahan tambah yang digunakan, agregat, air, kondisi kelembapan udara saat masa perawatan benda uji, serta umur beton saat diuji.

2.4 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 saat memikul beban, sehingga pada bagian tertentu dari benda uji timbul tegangan yang sangat tinggi, yang mengakibatkan retak mikroskopik, sedangkan pada bagian lain benda uji mengalami tegangan yang rendah.

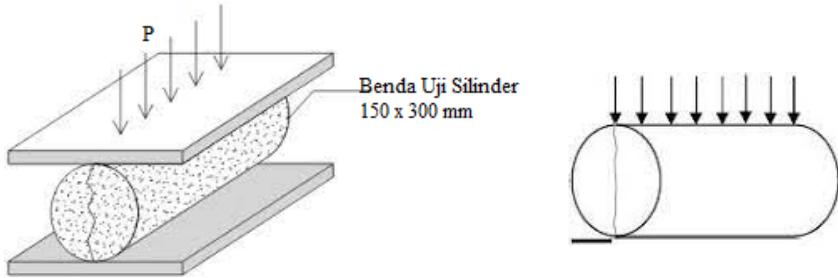
Untuk mengetahui kapasitas tarik dari suatu benda uji beton, pada umumnya dilakukan uji tarik belah (*tensile splitting test*) dengan menggunakan benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Standar pengujian mengacu pada ASTM C496/ C496M-04e1 “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”. Benda uji silinder diletakkan pada alat uji tekan pada posisi rebah. Beban vertikal diberikan sepanjang silinder dan secara berangsurng-angsurng ditambah sampai mencapai nilai maksimum dan silinder pecah akibat terbelah oleh gaya tarik horizontal, kuat tarik belah dari beton dapat dihitung dengan rumus:

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D}$$

Dimana:

- f_{sp} = Kuat tarik belah (MPa)
- P = Beban batas pengujian (N)
- L = Panjang benda uji (mm)
- D = Diameter benda uji (mm)

Kuat tarik belah beton, f_{sp} , dapat dikorelasikan dengan kuat tekan, f'_c . Pada umumnya kuat tarik belah berkisar antara 7 hingga 11% dari kuat tekannya, dengan rata-rata berkisar 10%. Semakin rendah kuat tekan beton, maka persentase tersebut akan makin bertambah.



Gambar 2. 3 Uji Tarik Belah Beton Silinder.

2.5 Kuat Lentur

Eksperimen yang dilakukan pada balok beton menunjukkan bahwa kuat tarik ultimit akibat lentur pada umumnya lebih tinggi daripada 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. Benda uji yang dipakai untuk menguji kuat lentur beton berupa balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm, sedangkan standar pengujian kuat lentur mengacu pada ASTM C78/ C78 M-10 “*Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)*”. Benda uji balok diletakkan di atas dua tumpuan pada mesin uji beban dengan jarak antar tumpuan sebesar 45 cm. Diantara kedua tumpuan tersebut dikenakan dua buah beban titik dengan jarak sepertiga bentang yaitu sebesar 15 cm.

Beban diberikan secara konstan sehingga terjadi keruntuhan pada benda uji. Besarnya nilai kuat lentur beton dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$f_r = \frac{PL}{b \cdot d^2}$$

Dimana:

f_r = Kuat lentur beton (MPa)

P = Beban batas pengujian (N)

L = Panjang benda uji (mm)

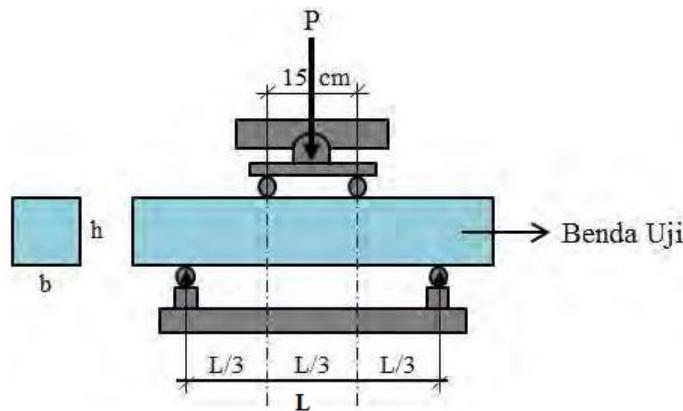
b = Lebar balok (mm)

d = Tinggi balok (mm)

Modulus keruntuhan beton berkisar antara 11% hingga 23% dari kuat tekannya. Korelasi antara modulus keruntuhan beton dengan kuat tekan, yaitu:

$$f_r = 0,62\lambda \cdot \sqrt{f'_c}$$

Dengan λ adalah faktor untuk beton ringan.



Gambar 2. 4 Posisi posisi pengujian kuat lentur dengan metode third point loading.

Dengan:

- L = Jarak (bentang) antara dua garis perletakan (cm)
- b = Lebar tampak lintang benda uji (cm)
- h = Tinggi tampak lintang benda uji (cm)
- P = Beban tertinggi yang ditunjukkan oleh mesin uji (kg)

2.6 Regangan, Tegangan, dan Teori Kekuatan Batas

1. Kemampuan akhir

Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari regangan, tegangan, dan teori kekuatan batas adalah mampu menjelaskan perilaku regangan, tegangan, dan teori kekuatan batas pada perencanaan beton dan beton bertulang.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan pengertian dan perilaku regangan, tegangan, dan teori kekuatan batas pada perencanaan beton dan beton bertulang sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang 2019.

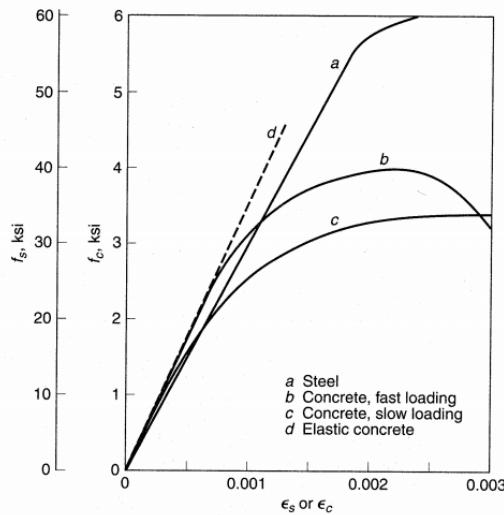
2.1 Perilaku Tegangan dan Regangan

Tegangan adalah perbandingan antara gaya tarik yang bekerja terhadap luas penampang benda. Tegangan dinotasikan dengan σ (sigma), satuannya N/ m².

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Regangan ialah perubahan relatif ukuran atau bentuk benda yang mengalami tegangan.

$$e = \frac{\Delta\ell}{\ell_0}$$

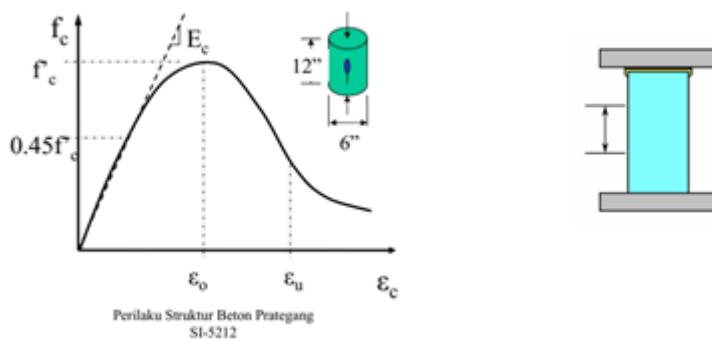


$$\sigma = E * \epsilon \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Note:
 σ = Tegangan/ Stress
 ϵ = Regangan/ Strain
 E = Modulus Elastisitas/ Modulus young

Gambar 2. 5 Concrete and Steel Stress Strain Curve.

1. Perilaku Tegangan Vs Regangan akibat Tekan Uniaksial



Beton pada dasarnya bersifat non-linear sehingga nilai modulus elastisitasnya hanyalah pendekatan. Nilainya di ukur pada $0,45 f'_c$; E_c berkisar dari 27000 hingga 37000 MPa. Modulus Elastisitas, (E_c):

$$E_c = 0,043 \cdot w^{1.5} \sqrt{f'_c}$$

Dimana:

$$w = \text{unit weight (kg/m}^3)$$

$$1500 \text{ kg/ m}^3 < w_c < 2500 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Untuk beton berat normal (} w_c = 2300 \text{ kg/ m}^3 \text{)}$$

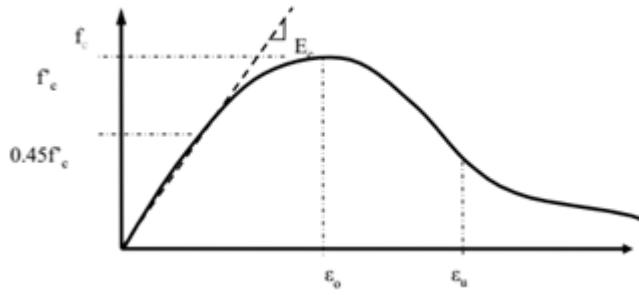
$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$$

Rasio Poisson, (v) antara 0.15 – 0.20

Umumnya digunakan nilai $v = 0.17$

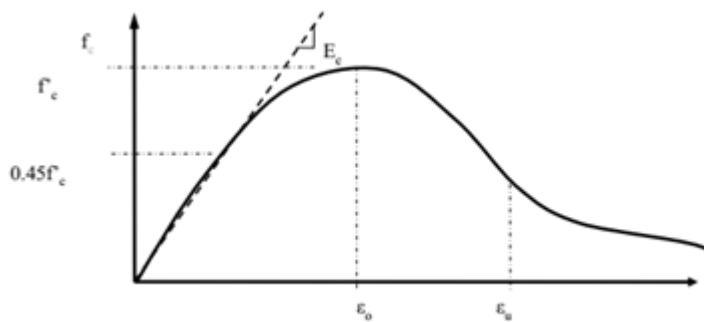
2. Regangan pada Tegangan Tekan Maksimum

- ϵ_0 bervariasi antara 0.0015 – 0.003
- Untuk Beton Berat Normal $\epsilon_0 \sim 0.0015$

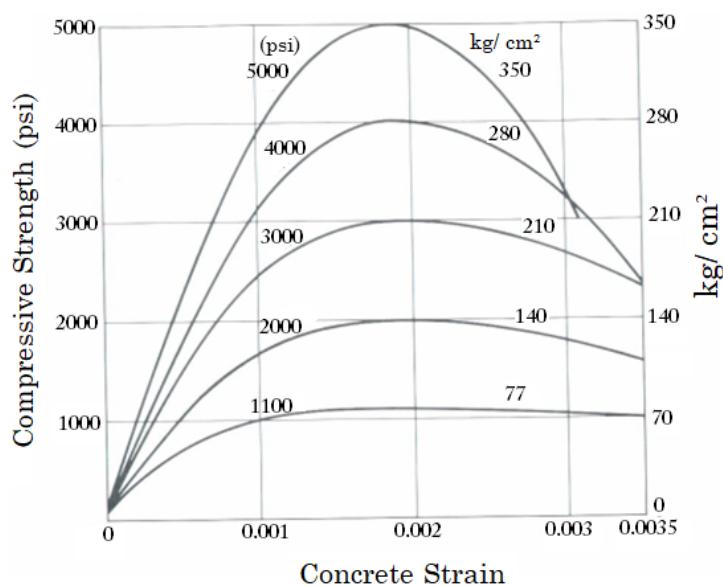


3. Regangan Ultimit

- Regangan maksimum yang dapat dimanfaatkan, $\epsilon_u = 0.003$
- Digunakan untuk lentur dan tekan aksial.

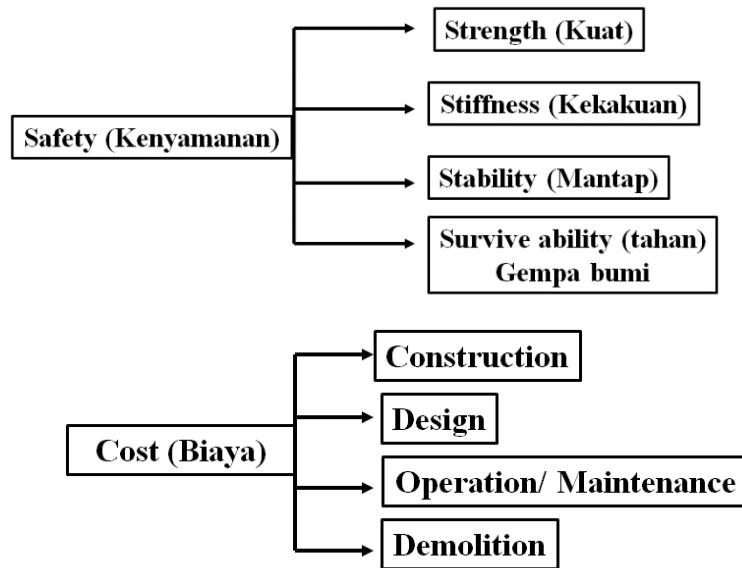


4. Kurva Tegangan-Regangan untuk Berbagai Mutu Beton



2.7 Prinsip –Prinsip Desain Struktur Beton

Dalam perencanaan dan desain struktur harus memperhatikan tingkat kenyamanan (*safety*) dan biaya (*cost*). Berikut ini akan ditampilkan bagan/ diagram prinsip desain struktur beton terhadap kenyamanan dan biaya struktur.



Gambar 2. 6 Bagan Prinsip Desain Struktur.

Asumsi-asumsi dalam perencanaan penampang (dasar-dasar perhitungan dalam perencanaan/pemeriksaan

1. Regangan Baja dan Beton bertulang berbanding lurus terhadap garis netral (Hukum *Hooke*).
2. Regangan Beton yang dipakai adalah regangan batas (*ultimate*) ; $\varepsilon_c = 0,003$
3. *Strainhardening* tulangan tarik baja diabaikan
4. Regangan Tarik baja

Jika $\varepsilon_s < \varepsilon_y$; dimana ε_y adalah tegangan baja batas (*yield stress*) maka:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} = \frac{X}{d}$$

$$d. \quad \varepsilon_c = (X \cdot \varepsilon_c + X \cdot \varepsilon_s)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_c \cdot d - \varepsilon_c \cdot X}{X} = \frac{\varepsilon_c \cdot (d - X)}{X}$$

5. Modulus Elastisitas Baja Es = 2×10^5 MPa
6. Regangan Tarik Beton = 0
7. Letak Garis Netral (Xn):

Jika $f'c = 28,6$ Mpa maka $\beta_1 = 0,85$

Jika $f'c > 28,6$ Mpa maka

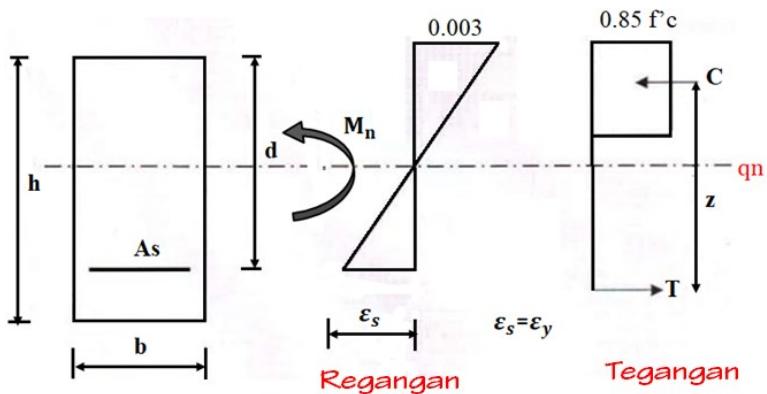
β_1 dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left[\frac{f'c - 28,6 \text{ MPa}}{7,15} \right] \geq 0,65$$

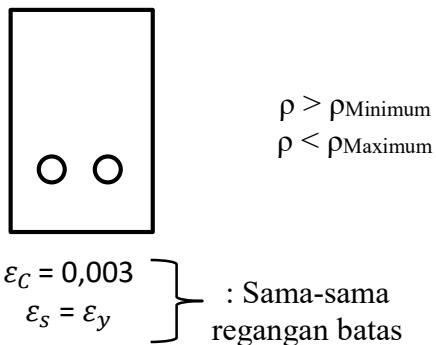
Ada pengurangan 0,05 MPa setiap kenaikan 7,15 Mpa

Nilai β_1 berkisar antara 0,65 sampai dengan 0,85

2.8 Tulangan Maksimum dan minimum



Dalam Keadaan *balanced* (Seimbang)



Ketinggian Xb dapat dihitung langsung dari diagram tegangan sebagai berikut:

Modulus Elastisitas Beton: $\varepsilon_c = 4700 \sqrt{f'c}$

$$X_b = \left[\frac{600}{600 + f_y} \right] * d$$

Garis Netral kondisi *balanced* untuk rasio tulangan:

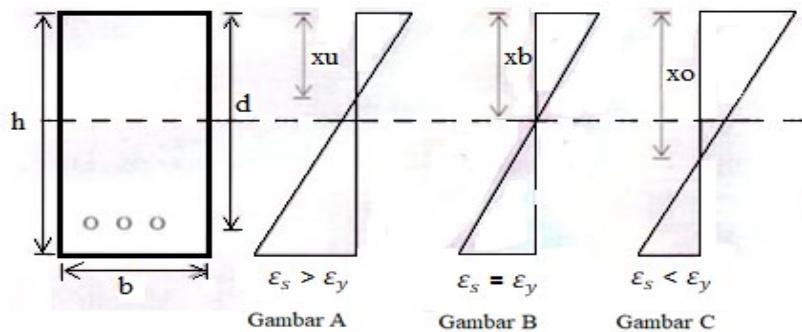
$$\rho = \frac{As}{b \times d} \text{ atau } \rho_b = \frac{Asb}{b \times d}; \quad \rho_b = \frac{\beta_1 \times 0,85 \times f'c}{f_y} \left[\frac{600}{600 + f_y} \right]; \quad \rho_{\text{minimum}} = \frac{1,4}{f_y}; \quad \rho_{\text{maks}} = 0,75 \times \rho_b$$

ρ_b = Kondisi Berimbang; f_y = Mutu Baja (MPa)

β_1 = Faktor Garis Netral; $f'c$ = Mutu Beton (MPa)

2.9 Jenis Keruntuhan Balok

Perbedaan diagram regangan antara kondisi **Balanced, Under-Reinforced, dan Over-Reinforced** dapat dilihat dari gambar di bawah ini:



Gambar 2. 7 Pola keruntuhan pada beton bertulang.

- Gambar “A” Keruntuhan tarik (“*under reinforced*”), jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan kecil (jumlah tulangannya sedikit), sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan sudah mencapai regangan lelehnya sedangkan beton belum hancur (beton belum mencapai regangan maksimumnya = 0,003), $\varepsilon_s > \varepsilon_y$. Balok dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat *ductile*.
- Gambar “B” Keruntuhan seimbang (“*balanced*”), jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan yang seimbang sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan dan beton hancur secara bersamaan. Tulangan sudah mencapai regangan lelehnya dan beton sudah mencapai regangan maksimumnya = 0,003), $\varepsilon_s = \varepsilon_y$. Balok dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat *getas*.
- Gambar “C” Keruntuhan tekan (“*over reinforced*”), jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan besar (jumlah tulangannya banyak), sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan belum mencapai regangan lelehnya sedangkan beton sudah hancur (beton sudah mencapai regangan maksimumnya = 0,003), $\varepsilon_s < \varepsilon_y$. Balok dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat *getas*.

Contoh Soal 1:

Sebuah penampang persegi balok beton bertulang ditunjukkan seperti gambar di bawah ini, dengan $f'c = 25 \text{ MPa}$; $f_y = 400 \text{ MPa}$. Tentukanlah:

- a. Luas Tulangan Baja pada Kondisi Seimbang, (A_{sb}).
- b. Luas Tulangan maksimum yang diizinkan agar penampang merupakan penampang terkendali tarik serta penampang pada daerah transisi.
- c. Posisi Sumbu netral, c , dan tinggi blok tegangan tekan ekuivalen, a , untuk penampang terkendali tarik pada soal b.

Penyelesaian:

$$a. \rho_b = \frac{\beta_1 \times 0.85 \times f'c}{f_y} \left[\frac{600}{600+f_y} \right]$$

$$\rho_b = \frac{0.85 \times 0.85 \times 25}{400} \left[\frac{600}{600+400} \right] = 0,0271$$

Luas Tulangan yang diperlukan untuk mencapai kondisi Seimbang adalah:

$$A_{sb} = \rho_b * b * d = 0,0271 \times 400 \times 650 = 7046 \text{ mm}^2$$

- b. Untuk Penampang Terkendali Tarik:

$$\rho_{maks} = 0,625 \times \rho_b = 0,625 \times 0,0271 = 0,01693$$

$$A_{smaks} = \rho_{maks} * b * d = 0,01693 \times 400 \times 650 = 4.401,8 \text{ mm}^2 (\Phi = 0,90)$$

Untuk Penampang pada daerah transisi:

$$\rho_{maks\ t} = 0,714 \times \rho_b = 0,714 \times 0,0271 = 0,01935$$

$$A_{smaks\ t} = \rho_{maks\ t} * b \times d = 0,01935 \times 400 \times 650 = 5031 \text{ mm}^2 (\phi = 0,817)$$

- c. Tinggi Blok Tegangan Tekan ekuivalen dihitung dengan menggunakan Rumus As maks:

$$a_{maks} = \frac{As\ maks \times fy}{0,85 \times f'c \times b} = \frac{4401,8 \times 400}{0,85 \times 25 \times 400} = 207,14 \text{ mm}$$

Jarak dari serat atas ke sumbu netral adalah:

$$c = \frac{a}{\beta_1} ; \text{ dengan } \beta_1 = 0,85$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{207,14}{0,85} = 243,69 \text{ mm}$$

2.10 Latihan

1. Gambarkan dan jelaskan diagram perbedaan antara regangan dan tegangan pada beton dan beton bertulang
2. Jelaskan defenisi dari Tegangan dan Regangan.
3. Sebuah penampang persegi balok beton bertulang ditunjukkan seperti gambar di bawah ini, dengan $f'c = 30 \text{ MPa}$; $fy = 325 \text{ MPa}$. Tentukanlah:
 - a. Luas Tulangan Baja pada Kondisi Seimbang, (Asb).
 - b. Luas Tulangan maksimum yang diizinkan agar penampang merupakan penampang terkendali tarik serta penampang pada daerah transisi.
 - c. Posisi Sumbu netral, c, dan tinggi blok tegangan tekan ekuivalen, a, untuk penampang terkendali tarik pada soal b.

BAB 3

ANALISIS DAN PERENCANAAN BALOK BETON BERTULANGAN TUNGGAL

3.1 Pendahuluan

Pada pembelajaran analisis dan perencanaan balok beton bertulangan tunggal dipelajari bagaimana merencanakan desain tulangan tunggal pada balok dari hasil perhitungan/ analisa momen maksimum yang terjadi pada struktur yang dianalisa/ desain. Akibat dari momen maksimum yang terjadi pada struktur akan mengakibatkan adanya tarik dan tekan pada balok yang direncanakan. Untuk itu diperlukan desain/ perencanaan tulangan tarik pada balok yang direncanakan, dimana diketahui beton kuat dalam menahan tekan, tetapi lemah di dalam menahan tarik. Itulah sebabnya beton bertulang direncanakan memiliki tulangan tarik untuk dapat menyeimbangkan tekan yang terjadi pada balok yang didesain/ direncanakan.

3.2 Kegiatan Pembelajaran: Desain Perencanaan Balok Beton Bertulangan Tunggal

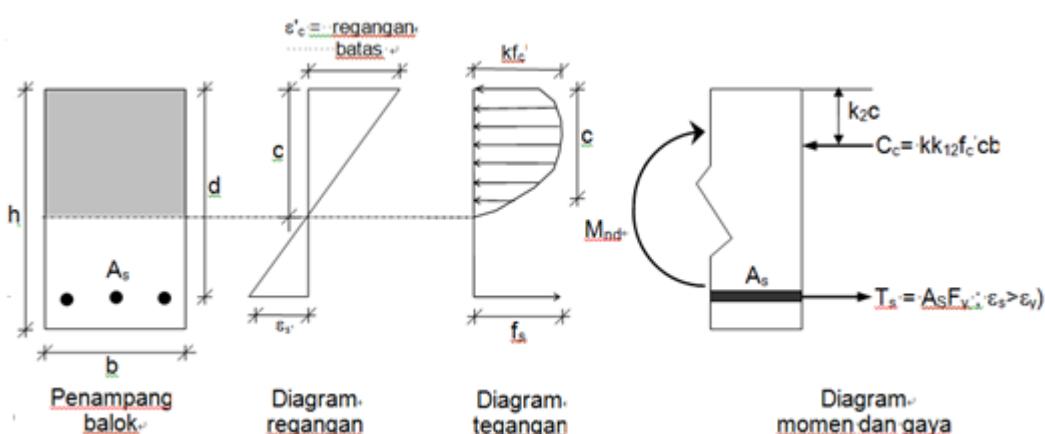
1. Kemampuan akhir

Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari desain perencanaan balok beton bertulangan tunggal adalah mampu menghitung/ menganalisa dan merencanakan desain kapasitas penampang (dimensi) dan penulangan balok bertulangan tunggal sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang 2019.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan pengertian dari balok beton bertulangan tunggal dan langkah-langkah analisa/ perencanaan balok beton bertulangan tunggal.

3.3 Analisis Penampang Balok Persegi Bertulangan Tunggal



Gambar 3. 1 Distribusi Regangan Tegangan pada Balok Beton Bertulangan Tunggal.

b = Lebar Balok; h = Tinggi Balok; d = Tinggi Efektif Balok ($d = h - (\text{Selimut beton} + \text{diameter sengkang} + \frac{1}{2} \text{diameter tulangan utama})$); A_s = Luas Tulangan Tarik; ϵ_{cu} = Regangan ultimate beton (0,003); ϵ_s = Regangan Tarik baja tulangan; ϵ_y = regangan leleh baja; c = Jarak dari serat tekan terluar ke sumbu netral; f_y = Tegangan leleh baja tulangan; $Jd = d - \frac{1}{2} a$.

Pada gambar diatas diperoleh gaya tekan pada beton (C) adalah:

$$\triangleright C = 0,85 * f'c * a * b$$

Dan gaya tarik pada baja (T) adalah:

$$\triangleright T = As * fy$$

Dari gaya tarik dan gaya tekan diperoleh keseimbangan gaya horizontal:

$$\sum H = 0$$

$$T = C \longrightarrow As * fy = 0,85 * f'c * a * b \longrightarrow a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

Tabel 3. 1 Momen Nominal Penampang.

Tekan (<i>Compression</i>)	Tarik (<i>Tension</i>)
1. $Mn = T * Jd$	1. $Mn = C * Jd$
2. $Mn = T * (d - \frac{1}{2}a)$	2. $Mn = C * (d - \frac{1}{2}a)$
3. $Mn = As * fy * (d - \frac{1}{2}a)$	3. $Mn = 0,85 * f'c * a * b * (d - \frac{1}{2}a)$

Momen *Ultimate* (Mu) yang dapat dipikul oleh balok adalah:

$$Mu < \bigcirclearrowleft Mn$$

$$Mu = 0,8 * Mn$$

Rasio Tulangan:

❖ Tulangan Tarik minimum adalah: $\rho_{minimum} = \frac{1,4}{fy}$

❖ Tulangan Tarik maksimum: $\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{maks}$

$$\rho_{maks} = 0,75 * \rho_{balance} \text{ atau } \rho_{maks} = 0,75 * \rho_b$$

$$\rho_b = \frac{\beta_1 \times 0,85 \times f'c}{fy} \left[\frac{600}{600+fy} \right]$$

3.4 Faktor Momen Pikul K dan nilai a

Momen Nominal dapat dihitung terhadap gaya tekan beton dan gaya tarik baja $Mn = T * (d - \frac{1}{2}a)$ atau $Mn = C * (d - \frac{1}{2}a)$. Dari persamaan diatas jika faktor momen pikul (K) didefinisikan sebagai momen nominal (Mn) yang dibagi dengan hasil perkalian antara luas efektif dan tinggi efektif balok ($b * d * d$) maka diperoleh persamaan:

$$K = \frac{Mn}{b * d^2} \text{ atau } K = \frac{Mn}{\phi * b * d^2}$$

$$K = C * (d - \frac{1}{2}a) = 0,85 * f'c * a * b * (d - \frac{1}{2}a) / (b * d^2)$$

$$K = 0,85 * f'c * a * (d - \frac{1}{2}a) / d^2$$

$$\frac{K * d^2}{0,85 * f'c} = a * d - 0,5a^2 \text{ atau } 0,5a^2 - d * a + \frac{K * d^2}{0,85 * f'c} = 0$$

$$a_{1,2} = \frac{-(-d) \pm \sqrt{d^2 - \frac{4*0,5*K*d^2}{0,85*f'c}}}{2*0,5} = d \pm \left\{ \sqrt{d^2 - \frac{2*K}{0,85*f'c}} \right\} * d$$

Karena nilai a selalu lebih kecil daripada tinggi efektif balok d , maka diperoleh nilai a :

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2*K}{0,85*f'c}} \right\} * d$$

Momen Nominal dapat dihitung terhadap gaya tekan beton dan gaya tarik baja dengan persamaan:

Tinggi Balok Tegangan Equivalen Beton (a):

Subsitusikan Nilai dari Persamaan 2 ke persamaan 1:

$$Mn = T * (d - \frac{1}{2}a)$$

$$Mn = As * fy * \left(d - \frac{1}{2}a\right)$$

$$Mn = \rho^* b^* d^* fy * \left(d - \frac{1}{2} \left(\frac{\rho^* b^* d^* fy}{0.85 * f'c * b} \right) \right)$$

$$M_n = \rho * b * d * f_y * (d - \frac{\rho}{2}(\frac{f_y}{0.85 * f'_c}))$$

Koefisien Lawan Untuk Perencanaan Kekuatan (Rn):

$$R_n = \rho^* f_V * (1 - 0.5 \rho^* m)$$

Dengan $R_n = \frac{Mn}{b * d^2}$ (Aspek Mekanika Teknik); $Mn = \frac{Mu}{\phi}$

$$R_n = \frac{Mn}{h*d^2}$$

$$Rn = \rho^* f_y * (1 - 0,5 \rho^* m) = \rho^* f_y - \frac{1}{2} f_y^* \rho^* \rho^{2*} m$$

$\rho^*fy - \frac{1}{2}f\gamma^*\rho^2 m - Rn = 0$ Diperoleh Akar-akar persamaan kuadrat ρ :

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{m} \pm \sqrt{\left(\frac{-2}{m} \right)^2 - \left(\frac{4*2*Rn}{m*f_y} \right)} \right] \quad \rho_{1,2} = \frac{1}{m} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{2*m*Rn}{f_y} \right)} \right]$$

$$\rho_{baru} = \frac{1}{m} \left[1 - \sqrt{1 - 2 \frac{Rn*m}{mfy}} \right] \quad m = \frac{fy}{0.85*f'c}$$

3.5 Spasi Tulangan dan Selimut Beton

Persyaratan Jarak Antar Tulangan tercantum dalam SNI 2847:2013 Pasal 7.6. Tulangan pada balok beton bertulang harus diletakkan sedemikian rupa sehingga jarak antar poros tulangan dalam satu lapis tidak kurang dari ukuran diameter tulangan (db) dan tidak kurang dari 25mm). Dalam Pasal 7.7 SNI 2847:2013 disebutkan untuk penampang Balok dan Kolom di anjurkan mengambil selimut beton setebal 40 mm, sedangkan untuk pelat yang tidak berhubungan langsung dengan tanah dapat diambil selimut beton setebal 20 mm.

Secara umum Lebar minimum dari suatu Balok Beton dapat dituliskan dalam persamaan:

$$b_{min} = n_{db} + (n-1) \cdot s + 2 \text{ (Diameter Sengkang)} + 2 \text{ (Selimut Beton)}$$

Dengan:

n = Jumlah Besi Tulangan dalam satu Lapis

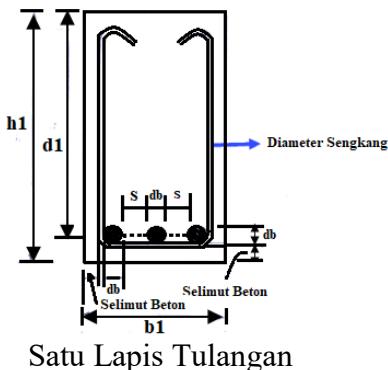
d_b = Diameter Tulangan yang digunakan

s = Jarak antar tulangan (**diambil nilai terbesar antara d_b atau 25mm**)

Tinggi Minimum Penampang Balok Beton diperlihatkan seperti gambar di bawah ini Untuk Tulangan 1 lapis:

$$h_1 = d_1 + \frac{d_b}{2} + 10 \text{ mm} + 40 \text{ mm}$$

$$h_1 = d_1 + \frac{d_b}{2} + 50 \text{ mm}$$

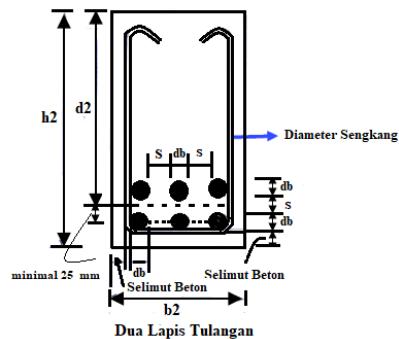


Tinggi Minimum Penampang Balok Beton diperlihatkan seperti gambar di bawah ini untuk Tulangan 2 lapis:

$$h_2 = d_2 + \frac{s}{2} + d_b + 10 \text{ mm} + 40 \text{ mm}$$

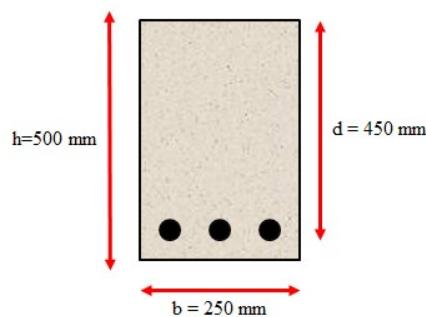
$$= d_1 + \frac{25}{2} + d_b + 50 \text{ mm}$$

$$h_2 = d_1 + d_b + 62,5 \text{ mm}$$



Contoh Soal 1:

Diketahui balok persegi bertulangan tunggal seperti gambar di bawah ini menggunakan mutu beton $f'c = 20 \text{ MPa}$, mutu baja $f_y = 400 \text{ MPa}$, dan tulangan 3-D25 mm. Tentukanlah momen ultimate yang dapat dipikul oleh balok tersebut dan cek apakah tulangan yang terpasang sudah memenuhi syarat.

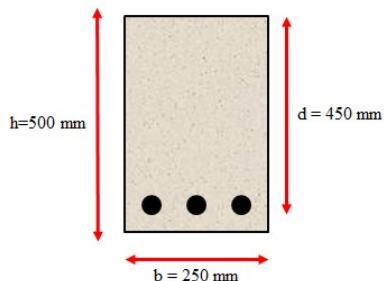


Penyelesaian:

$$\left. \begin{array}{l} b = 250 \text{ mm} \\ d = 450 \text{ mm} \\ f'_c = 20 \text{ MPa} \\ f_y = 400 \text{ MPa} \end{array} \right\}$$

Luas Tulangan Tarik:

$$A_s = 3 \times D^2 = 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 = 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 = 1472,62 \text{ mm}^2$$



Rasio Tulangan:

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

$$\rho = \frac{A_s}{b \times d} = \frac{1472,62}{250 \times 450} = 0,01309 > 0,0035 = \text{Ok}$$

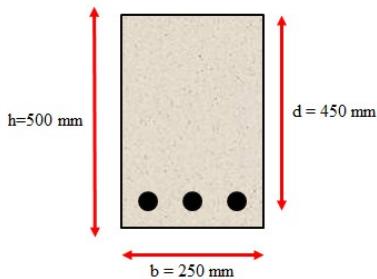
$$\rho_b = 0,85 \times \frac{f'_c \times \beta_1 \times 600}{(600+f_y) \times f_y} = 0,85 \times \frac{20 \times 0,85 \times 600}{(600+400) \times 400} = 0,02168$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 \times 0,02168 = 0,016256 > \rho = 0,01309 = \text{Ok}$$

Syarat Rasio Tulangan:

$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$ ($0,0035 \leq 0,01309 \leq 0,016256$) Jumlah tulangan memenuhi syarat

$$a = \left(\frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \right) = \left(\frac{1472,62 \times 400}{0,85 \times 20 \times 250} \right) = 138,60 \text{ mm}$$



Momen Nominal Penampang:

$$M_n = T \times Jd$$

$$M_n = T \times \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

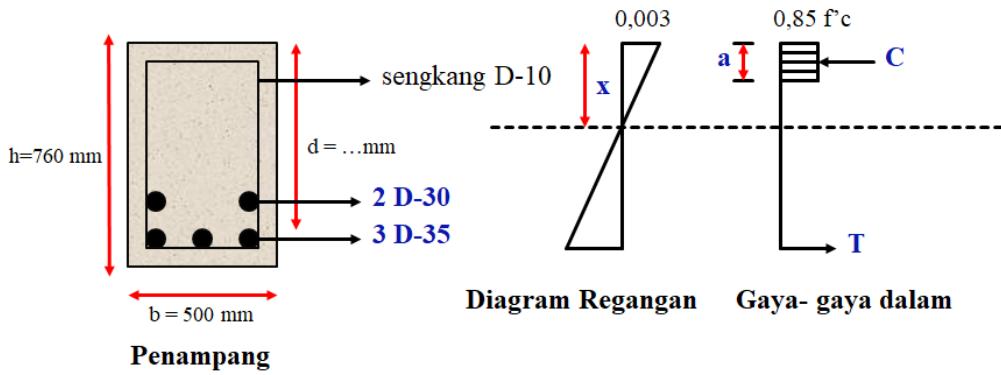
$$M_n = A_s \cdot f_y \times \left(d - \frac{a}{2} \right) = 1472,62 \times 400 \times \left(450 - \frac{138,60}{2} \right) = 224250573,6 \text{ Nmm}$$

Jadi Momen *Ultimate* yang dapat dipikul oleh balok sebesar:

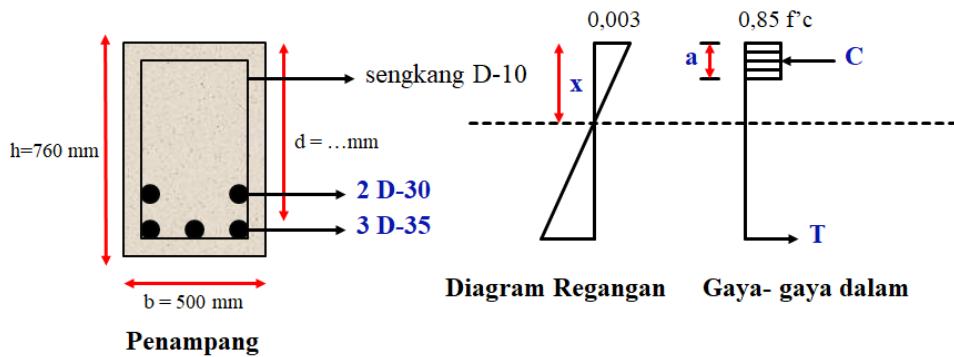
$$M_u = \Phi \cdot M_n = 0,8 \times 224250573,6 = 179400458,9 \text{ Nmm} = 179,41 \text{ kNm.}$$

Contoh Soal 2:

Hitunglah kekuatan nominal Mn dari balok pada gambar di bawah ini, dimana lebar balok = 500 mm, tinggi total 760 mm, tulangan lapisan luar 3-D35 (db = 36 mm) dan lapisan dalam 2-D30 (db = 30 mm). Diameter sengkang yang digunakan pada balok adalah D-10 (db = 11 mm), jarak bersih minimum selimut 40 mm. Gunakan mutu beton 25 MPa, mutu tulangan baja 400 MPa, dan Es = 200.000 MPa



Penyelesaian:



$b = 500 \text{ mm}$, $h = 760 \text{ mm}$, tulangan lapisan luar 3-D35 ($db = 36 \text{ mm}$) dan lapisan dalam 2-D30 ($db = 30 \text{ mm}$). Diameter sengkang D-10 ($db = 11 \text{ mm}$), $d' = 40 \text{ mm}$. $f'c = 25 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$, dan $E_s = 200.000 \text{ MPa}$

a. Periksa Keadaan Regangan berimbang

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,0020$$

$$x_b = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_y} = \frac{0,003}{0,003 + 0,002} d = 0,600 d$$

$$d = 760 - 40 - 11 - 36 = 673 \text{ mm}$$

$$f'c = 25 \text{ MPa}, f_y = 400 \text{ MPa}, \text{ dan } E_s = 200.000 \text{ MPa}$$

$$f'c = 25 \text{ MPa} < f'c 30 \text{ MPa}; \text{ Maka kita peroleh nilai } \beta_1 = 0,85$$

$$a_b = \beta_1 * x_b = 0,85 * 0,600 * 673 = 343 \text{ mm}$$

$$C = 0,85 * f'c * a * b = 0,85 * 0,025 * 343 * 500 = 3640 \text{ kN}$$

$$T = As * f_y$$

Keseimbangan:

$$C = T; \quad C = As * f_y$$

$$A_s = \frac{C}{f_y} = \frac{3640 * 1000}{400} = 9100 \text{ mm}^2 = (91,0 \text{ cm}^2)$$

$$A_s \text{ maks} = 0,75 * A_s = 0,75 * (91,0) = 68,3 \text{ cm}^2$$

a. Periksa Keadaan Regangan berimbang

Karena nilai A_s yang ada adalah $= 44,0 \text{ cm}^2$ lebih kecil dari pada maksimum yang diizinkan maka balok mempunyai perbandingan tulangan yang dapat diterima (jadi tulangan harus diperiksa karena mempengaruhi lendutan)

b. Kekuatan Lentur Nominal (M_n):

$$C = 0,85 * f'_c * a * b = 0,85 * 0,025 * a * 500 = 10,6 a$$

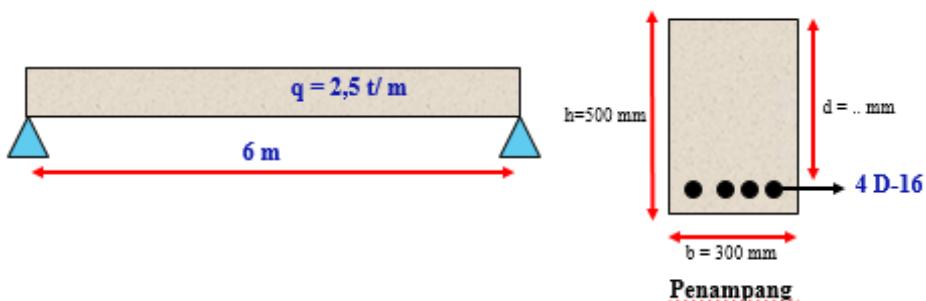
$$T = A_s * f_y = 4400 (0,400) = 1760 \text{ kN}$$

$$a = \frac{1760}{10,6} = 166 \text{ mm}$$

$$M_n = T (d - 0,5a) = 1760 - (0,5 * (166) * 1/1000) = 1038 \text{ kN.m}$$

Contoh Soal 3:

Diketahui penampang balok seperti gambar di bawah ini, dimana lebar balok (b) = 300 mm, tinggi total (h) = 500 mm, tulangan utama yang digunakan 4-D16 ($d_b = 16 \text{ mm}$), selimut beton 50 mm dan menggunakan mutu beton 28 MPa, mutu tulangan baja 400 MPa, dan berat jenis beton ($\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3$). Periksa apakah balok cukup kuat menahan beban balok.



Penyelesaian:

Diketahui:

$$b = 300 \text{ mm}; \quad d' = 50 \text{ mm}; \quad f'_c = 28 \text{ MPa}; \quad f_y = 400 \text{ MPa}; \quad (\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3).$$

$$h = 500 \text{ mm}, \quad d = 500 - 50 = 450 \text{ mm}$$

Tulangan: 4-D16 ($d_b = 16 \text{ mm}$),

Luas Tulangan:

$$(A_s \text{ total}) = n * \frac{1}{4} \pi * d^2 = 4 * \frac{1}{4} 3,14 * 16^2 = 803,84 \text{ mm}^2$$

Rasio Tulangan:

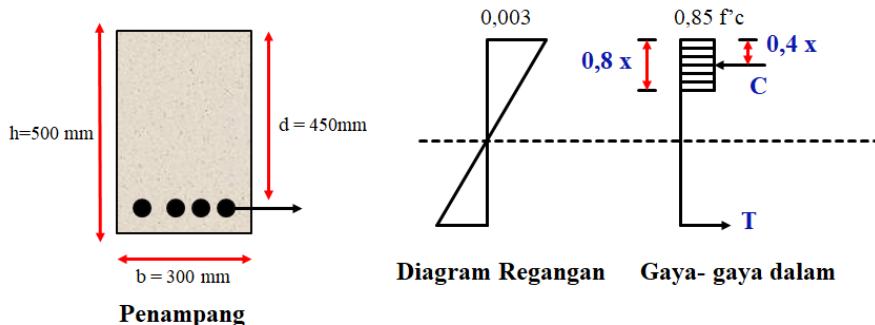
$$\rho_{ada} = \frac{As}{b*h} = \frac{803,84 \text{ mm}^2}{(300*500)\text{mm}^2} = 0,00535 \quad ; \quad \rho_{minimum} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

Rasio Tulangan:

$$\rho_b = \frac{\beta_1 * 0.85 * f'c}{f_y} \left[\frac{600}{600+f_y} \right] = \frac{0.85 * 0.85 * 28}{400} \left[\frac{600}{600+400} \right] = 0,030345$$

$$\rho_{max} = 0,75 * \rho_b = 0,75 * 0,030345 = 0,022759$$

$$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{maks} \quad ; \quad 0,0035 \leq 0,00535 \leq 0,022759 \quad (0,022759 > 0,00535) \text{ (OK)}$$



Modulus Elastisitas Baja: $E_c = 4700 * \sqrt{f'c} = 4700 * \sqrt{28} = 24870 \text{ MPa}$

Dalam analisa ini asumsikan **baja sudah leleh**:

$$fs = f_y \quad ; \quad \varepsilon_s = \varepsilon_y$$

$$fs > f_y \quad ; \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y$$

$$\text{Tekan; } C = 0,8x * 0,85 * f'c * b = 0,8x * 0,85 * 28 * 300 = 5712x$$

$$\text{Tarik : } T = As * f_y$$

$$T = 803,84 \text{ mm}^2 * 400 = 321536 \text{ N}$$

$$\sum H = 0$$

$$C - T = 0$$

$$5712x - 321536 = 0 \quad \rightarrow \quad x = \frac{321536}{5712} = 56,29 \text{ mm}$$

Kontrol Kondisi Regangan:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} = \frac{x}{d}$$

$$\frac{0,003}{0,003 + \varepsilon_s} = \frac{56,29}{450} \quad \rightarrow \quad (0,003 + \varepsilon_s)56,29 = 1,35$$

$$0,16887 + \varepsilon_s 56,29 = 1,35 \quad \rightarrow \quad \varepsilon_s = 0,021 > \varepsilon_y \text{ (Baja sudah leleh, maka asumsi sudah benar).}$$

Menentukan nilai ε_y :

Hukum *Hooke*:

$$f_y = E_s * \varepsilon_y \quad ; \quad E_s = 2,1 * 10^5 \text{ Mpa}$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{2,1 \cdot 10^5} = 0,00190$$

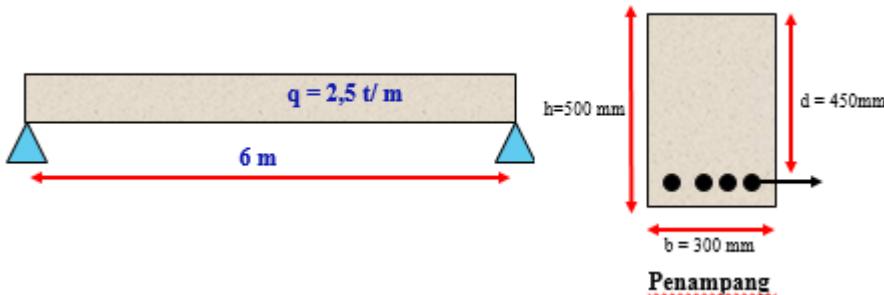
$$\sum M = 0$$

$$M_n = C \text{ atau } T * (d - 0,5x) = 321536 * (450 - 0,5 * 56,29) * 1/1000 = 135.641.569 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 135641,569 \text{ kNm}$$

Menghitung Nilai Momen dari balok akibat pembebanan:

$$1 \text{ t/m} = 9,8 \text{ kN/m}$$



Pembebanan:

$$\text{Berat sendiri beton } (\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3) * (0,3 * 0,5) = 3,6 \text{ kN/m}$$

a. Menghitung momen akibat berat sendiri (DL):

$$M = \frac{1}{8} * q * L^2 = \frac{1}{8} * 3,6 * 6^2 = 16,2 \text{ kN m'}$$

b. Menghitung momen akibat beban luar (LL) = 25 kN/m

$$M = \frac{1}{8} * q * L^2 = \frac{1}{8} * 25 * 6^2 = 112,5 \text{ kN m'}$$

Maka nilai dari Momen ultimate dapat di hitung dengan:

$$M_u = 1,2DL + 1,6 LL$$

$$= 1,2 (16,2) + 1,6 (112,5)$$

$$M_u = 199,4 \text{ kN m}$$

Check Momen nominal dan Momen batas terfaktor:

$$\Phi M_n > M_u \quad \rightarrow \quad 0,8 * 135641,569 \text{ kN mm} > 199,4 \text{ kN m}$$

$$108,51325 \text{ kN m} < 199,4 \text{ kN m}$$

Penampang diatas tidak kuat menopang beban/ Momen yang terjadi.

Contoh Soal 4:

Diketahui penampang balok seperti gambar di bawah ini, dimana tinggi penampang balok (h) = 500 mm dan menggunakan mutu beton 28 MPa, mutu tulangan baja 400 MPa, dan berat jenis beton . Rencanakan penampang tersebut jika Mu adalah 14 Tm.

Penyelesaian:

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

$$\rho_b = \frac{\beta_1 \times 0,85 \times f'c}{f_y} \left[\frac{600}{600+f_y} \right] = \frac{0,8 \times 0,85 \times 28}{400} * \left[\frac{600}{600+400} \right] = 0,02856$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 * 0,02856 = 0,02142$$

Dalam hal ini asumsikan nilai dari:

$$\rho = 0,5 * \rho_{\max} = 0,5 * 0,0214 = 0,01071$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 * f'c} = \frac{400}{0,85 * 28} = 16,806$$

$$\begin{aligned} Rn_1 &= \rho * f_y * (1 - 0,5 * \rho * m) \\ &= 0,01071 * 400 * (1 - 0,5 * 0,01071 * 16,806) \end{aligned}$$

$$Rn_1 = 3,89 \text{ N/mm}^2$$

$$b * d^2 = \frac{Mu}{Rn} = \frac{\frac{Mu}{\Phi}}{\frac{Rn}{\Phi}} = \frac{140000000 \text{ N.mm}}{0,85 * 3,89 \text{ N/mm}^2} = 42340843,79 \text{ mm}^3$$

$$b * d^2 = 42340843,79 \text{ mm}^3$$

misalkan nilai dari: $b = 0,5 * d$

$$b * d^2 = 42340843,79 \text{ mm}^3$$

$$0,5d * d^2 = 42340843,79$$

$$d^3 = 84681687,59$$

$$d = \sqrt[3]{84681687,59} = 439 \text{ mm}$$

Dalam hal ini kita dapatkan nilai b (lebar balok):

$$b = 0,5 * d$$

$$b = 0,5 * 439 = 219 \text{ mm}$$

Maka di peroleh Ukuran penampang : **d=439 mm; d = 219 mm**

Pilih ukuran penampang baru: 450 x 220

$$Rn = \frac{\frac{Mn}{\Phi}}{b * d^2} = \frac{\frac{140000000}{0,85}}{220 * (450)^2} = 3,697 \text{ N/mm}^3$$

$$\rho_{baru} = \rho_{lama} * \frac{Rn_{baru}}{Rn_{lama}} = 0,01605 * \frac{3,697 \text{ N/mm}^3}{3,89 \text{ N/mm}^2} = 0,01525$$

$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{maks}$;

$$\text{As baru} = \rho_{baru} * b * d = 0,01525 * 220 * 450 = 1509,75 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{\text{As} * f_y}{0,85 * f'c * b} = \frac{1509,75 * 400}{0,85 * 28 * 220} = 115,336$$

Momen Nominal:

$$(M_n) = As * f_y (d - \frac{a}{2}) = 1509,75 * 400 * (450 - \frac{115,36}{2}) = 236922048 \text{ Nmm}$$

Syarat:

Mn > Mu

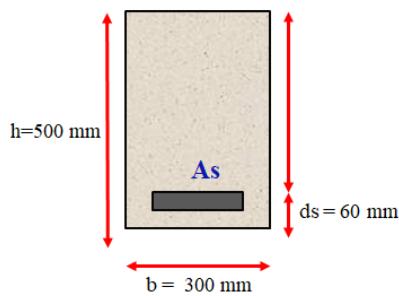
$$0,8 * 236922048 \text{ Nmm} > 140000000 \text{ N.mm}$$

$$\mathbf{189.537.638 \text{ Nmm} > 140.000.000 \text{ N.mm}}$$

Contoh Soal 5:

Diketahui penampang balok berukuran 300/ 500 dengan nilai dari $ds= 60 \text{ mm}$ dan menggunakan mutu beton 20 MPa, $f_y = 300 \text{ MPa}$ tersedia tulangan D-19. Balok tersebut mendukung beban/momen perlu $Mu^{(+)} = 80,8 \text{ kNm}$ atau ($Mu^{(+)} = 80,8 * 10^6 \text{ N.mm}$)

1. Hitung dan gambarlah tulangan longitudinal pada balok tersebut
2. Kontrollah keamanan dari hasil tulangan yang di pakai yang berkaitan dengan momen rencana (M_r) dan regangan tekan beton (ϵ_c)



Penampang Balok

1. Tulangan longitudinal Balok:

$$d = h - ds = 500 - 60 = 440 \text{ mm}; \text{ Tegangan leleh baja } (f_y) = 300 \text{ MPa}$$

Faktor Momen Pikul K:

$$K = \frac{Mu}{\Phi * b * d^2} = \frac{80,8 * 10^6}{0,8 * 300 * 440^2} = 1.73898 \text{ MPa}$$

Tinggi balok tegangan tekan beton persegi ekivalen:

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * K}{0,85 * f'_c}} \right\} * d = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 1.73898}{0,85 * 20}} \right\} * 440 = 47,582 \text{ mm}$$

Luas Tulangan Perlu (As):

$$a = \frac{As * f_y}{0,85 * f'_c * b}$$

$$As = \frac{0,85 * f'_c * b * a}{f_y} = \frac{0,85 * 20 * 300 * 47,582}{300} = 808,894 \text{ mm}^2$$

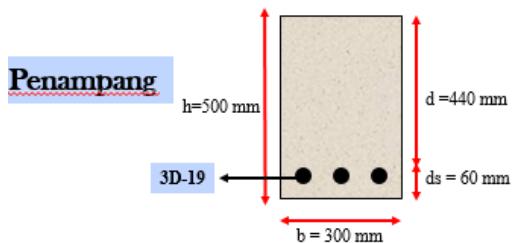
Menentukan Jumlah Tulangan:

Jumlah Tulangan n di hitung dengan:

$$n = \frac{A_s}{\frac{1}{4} \pi * d^2} = \frac{808,894}{\frac{1}{4} \pi * 19^2} = 2,85 \rightarrow \text{Di pakai 3 bh (3D19)}$$

Kontrol jumlah tulangan maksimal perbaris:

$$m = \frac{b - 2*ds}{d+sn} + 1 = \frac{300 - (2*60)}{19+40} + 1 = 4,05 \rightarrow \text{Maksimal 4 buah}$$



2. Kontrol $M_r \geq M_u$

Luas Tulangan:

$$A_s = 3D-19 = 3 * \frac{1}{4} * \pi * d^2 = 850,586 \text{ mm}^2$$

Tinggi balok tegangan tekan beton persegi ekivalen:

$$a = \frac{A_s * f_y}{0,85 * f'_c * b} = \frac{850,586 * 300}{0,85 * 20 * 300} = 50,034 \text{ mm}$$

Perhitungan Momen Nominal Aktual (M_n):

$$M_n = A_s * f_y * (d - \frac{1}{2}a) = 850,586 * 300 * (440 - \frac{1}{2} * 50,034)$$

$$M_n = 105893619 \text{ N-mm} = 105,894 \text{ kNm}$$

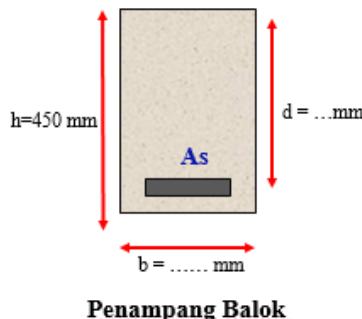
Dari hasil perhitungan diperoleh:

$$\text{Momen Rencana (}M_r\text{)} = \phi * 105,894 = 0,8 * 105,894$$

$$M_r = 84,72 \text{ kNm} > M_u = 80,8 \text{ kNm} \rightarrow (\text{Aman})$$

3.6 Latihan

1. Diketahui penampang balok seperti gambar di bawah ini, dimana tinggi penampang balok (h) = 450 mm dan menggunakan mutu beton 25 MPa, mutu tulangan baja 350 MPa, dan berat jenis beton (γ_b = 24 kN/m³). Rencanakan penampang tersebut jika M_u adalah 8,6 TM.



BAB 4

ANALISIS DAN PERENCANAAN BALOK BETON BERTULANGAN RANGKAP

4.1 Kegiatan Pembelajaran : Desain Perencanaan Balok Beton Bertulangan Rangkap

1. Kemampuan akhir

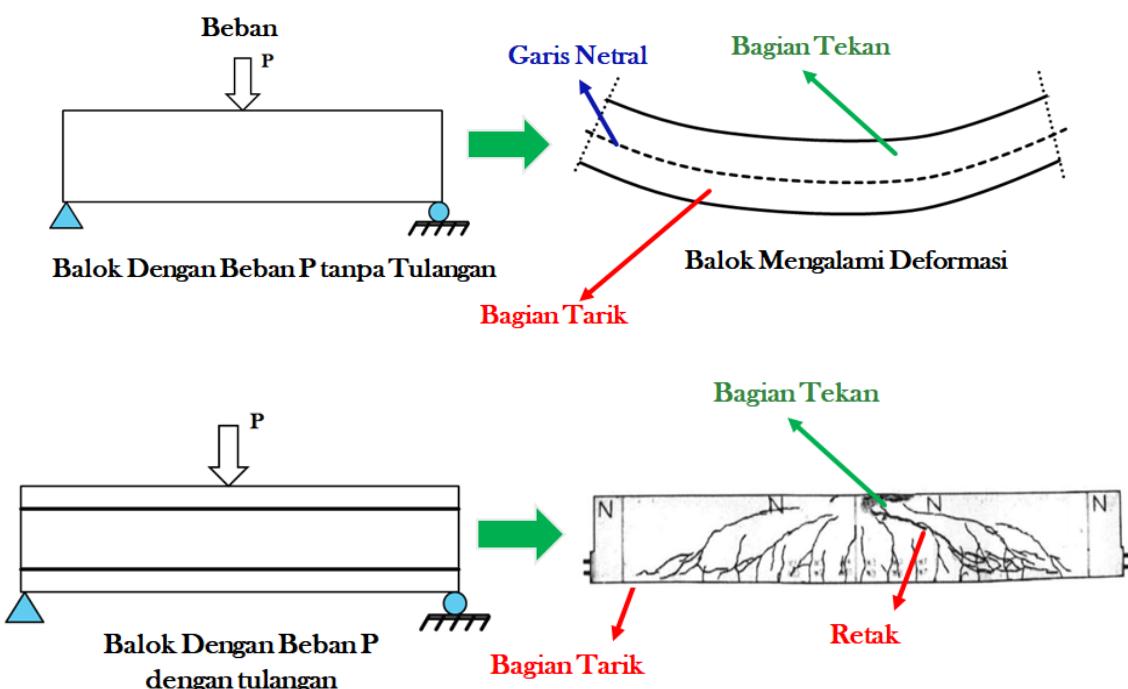
Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari desain perencanaan balok beton bertulangan rangkap adalah mampu menghitung/ menganalisa dan merencanakan desain kapasitas penampang (dimensi) dan penulangan balok bertulangan rangkap sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang 2019.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan pengertian dari balok beton bertulangan rangkap dan langkah-langkah analisa/ perencanaan balok beton bertulangan rangkap.

4.2 Analisis Penampang Balok Persegi Bertulangan Rangkap

Kondisi pasar sering mempengaruhi pelaksanaan di lapangan. Tulangan yang dipasang kadang terpaksa harus berbeda dari gambar perancangan baik dari segi kualitas baja atau diameternya sehingga perubahan itu tetap harus dikontrol dan tidak bertentangan dengan konsep perancangan khususnya berkaitan dengan konsep daktilitas. Balok beton bertulang yang didesain memiliki tulangan tarik dan tulangan tekan balok tersebut dinamakan dengan **balok beton bertulangan rangkap**. Penggunaan tulangan tekan sering dijumpai pada daerah momen negatif dari suatu balok menerus atau di tengah bentang dari suatu balok yang cukup panjang dan memikul beban yang berat serta persyaratan kontrol lendutan cukup ketat. Dalam hal seperti ini analisis harus bisa memperlihatkan kekuatan balok terhadap lentur yang senyatanya. Perilaku balok (liat atau getasnya) harus pula dapat ditunjukkan dari proses analisis ini.



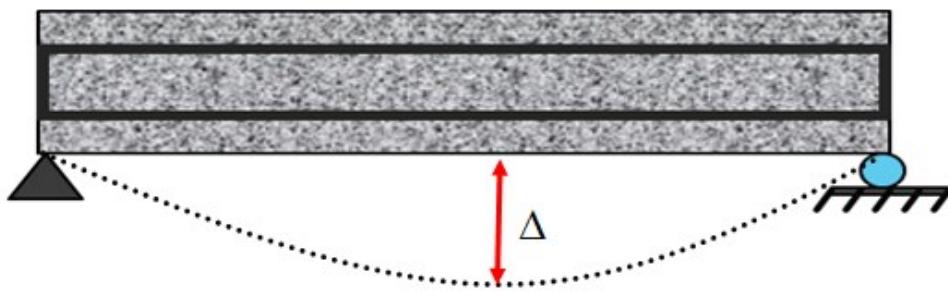
Gambar 4. 1 Pengujian Balok dengan menggunakan tulangan dan tanpa tulangan

4.3 Fungsi Tulangan Rangkap (Tekan dan Tarik)

Alasan di gunakan tulangan tekan pada penampang beton bertulang adalah:

1. Mengurangi Lendutan Jangka Panjang

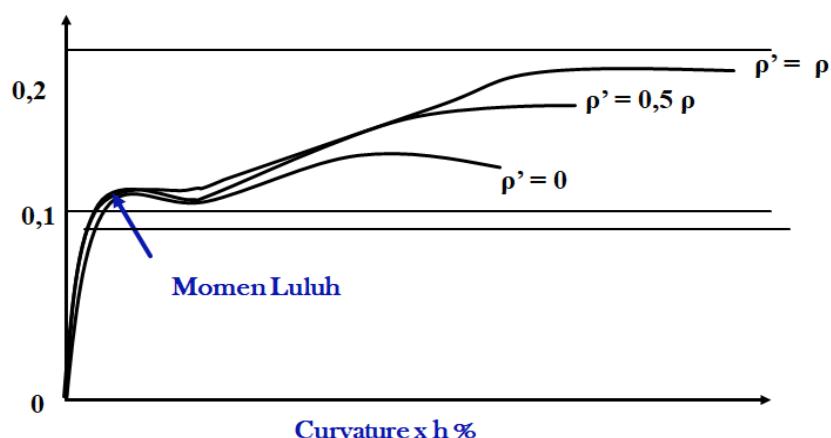
Fungsi utama yang paling penting dari penambahan tulangan tekan adalah mengurangi lendutan jangka panjang akibat beban yang secara kontinu bekerja pada balok. Pada balok tanpa tulangan tekan ($\rho' = 0$) Lendutan bertambah sebesar 195%, namun pada balok dengan tulangan tekan ($\rho' = \rho$) Lendutan hanya bertambah 99 %.



Gambar 4. 2 Penampang Balok dengan Tulangan As dan As'.

2. Meningkatkan Daktilitas

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 daktail.



Dari grafik diatas menunjukkan bahwa $\rho' = \rho$ menunjukkan perilaku yang daktail

3. Menghasilkan Keruntuhan Tarik pada Struktur

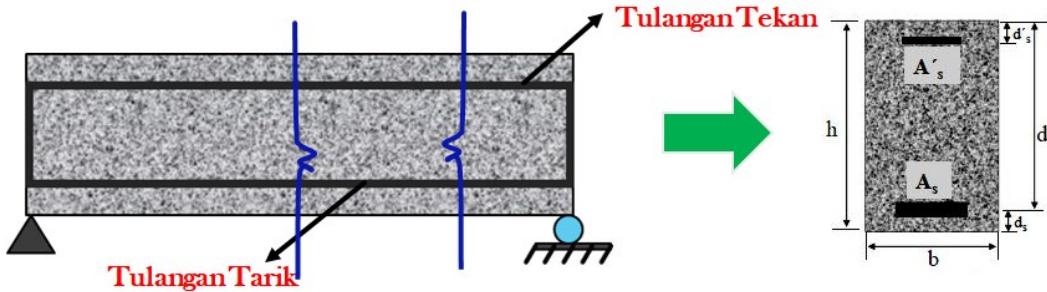
Ketika $\rho > \rho_b$, maka balok akan mengalami keruntuhan yang bersifat getas, ketika daerah tekan beton hancur sebelum tulangan baja mengalami luluh. Untuk keperluan perencanaan struktur beton bertulang tahan gempa di isyaratkan bahwa $\rho' \geq 0,5 \rho$

4. Memudahkan Dalam Fabrikasi

Umumnya balok beton bertulang di beri juga tulangan geser, untuk menempatkan tulangan geser pada posisi yang tepat di dalam bekisting, biasanya tulangan geser diikatkan pada suatu tulangan memanjang di sudut-sudutnya. Tulangan memanjang ini diberi panjang penyaluran yang cukup, maka tulangan ini dapat juga berperan sebagai tulangan tekan.

4.4 Analisa Kapasitas Momen Pada Penampang Bertulangan Rangkap

Balok beton bertulang dengan tulangan rangkap adalah balok yang memiliki baja tulangan baik pada sisi tarik (A_s) maupun pada sisi desak (A'_s). Tulangan tarik A_s dapat dianggap terdiri dari $A_{s1} + A_{s2}$. Jika suatu penampang dg dimensi tertentu sebesar $A_s = A_{s,max}$ tetap belum mampu menahannya, maka perlu dipasang tulangan rangkap, yaitu tulangan desak sebesar A'_s dan tambahan tulangan tarik A_{s2} yg besarnya sama dengan A'_s atau $A_{s2} = A'_s$, sehingga tulangan tarik total menjadi $A_s = A_{s1} + A_{s2} = A_{s1} + A'_s$.

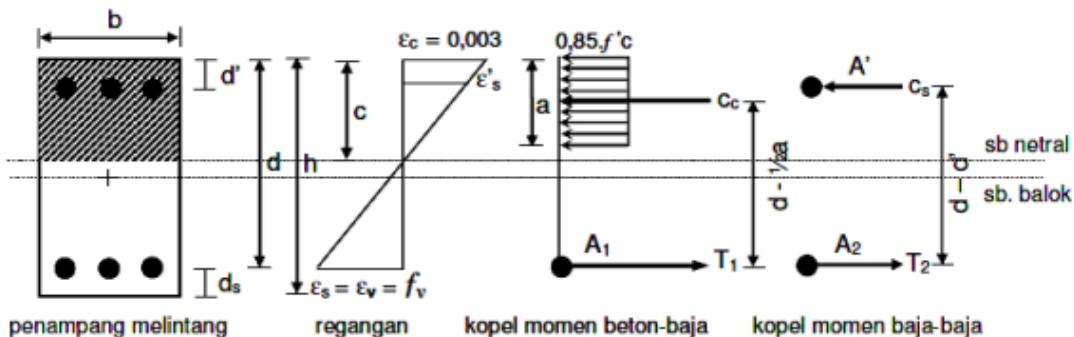


Gambar 4. 3 Penampang Balok Persegi Bertulangan Rangkap.

Gambar di bawah ini menunjukkan konsep analisis tulangan rangkap balok.

Gambar 4. 4 Distribusi Regangan Tegangan pada Balok Beton Bertulangan Rangkap.

Dari gambar diatas maka diperoleh persamaan:



$C_s = T_s$ sehingga:

$$A'_s * f_y = A_{s1} * f_y \text{ atau } A'_s = A_{s1}$$

Maka diperoleh nilai dari:

$$Mn1 = C_s * (d - d') = A'_s * f_y * (d - d')$$

$$Mn2 = T_2 * (d - \frac{a}{2}) = (A_s - A'_s) * f_y * (d - \frac{a}{2})$$

Penampang balok, diagram regangan, tegangan dan gaya-gaya dalam pada tulangan rangkap Untuk meyakinkan kondisi itu maka perlu dilihat apakah nilai kedalaman blok beton a yang didapat dari keseimbangan tulangan terpasang masih lebih kecil dari ab . Bila $a < ab$ maka tulangan terpasang akan menghasilkan penulangan liat/ *ductile*. Tetapi apabila $a > ab$ maka tulangan terpasang akan menghasilkan penulangan getas/ *brittle*. Untuk menghindarkan penulangan getas beberapa peraturan (misal BS 1880) mensyaratkan agar kemampuan balok hanya dibatasi sampai dengan 75% ab .

Garis Netral kondisi *balanced* untuk rasio tulangan:

$$\text{a. (Tekan) } \rho' = \frac{As'}{b \times d} ; \quad (\text{Tarik}) \rho = \frac{As}{b \times d}$$

$$\text{b. } \rho_b = \frac{\beta_1 \times 0.85 \times f'c}{f_y} \left[\frac{600}{600+f_y} \right] ; \rho_{minimum} = \frac{1.4}{f_y}$$

ρ_b = Kondisi Berimbang; f_y = Mutu Baja (MPa)

β_1 = Faktor Garis Netral; $f'c$ = Mutu Beton (MPa)

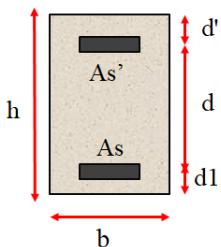
$$\rho_b = 0,85 - 0,05 \left[\frac{f'c - 4000}{1000} \right] \geq 0,65 \text{ (Satuan psi)}$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left[\frac{f'c - 4000}{1000} \right] \leq 0,85 \text{ (Satuan psi)}$$

ρ_b = Kondisi Berimbang; f_y = Mutu Baja (psi)

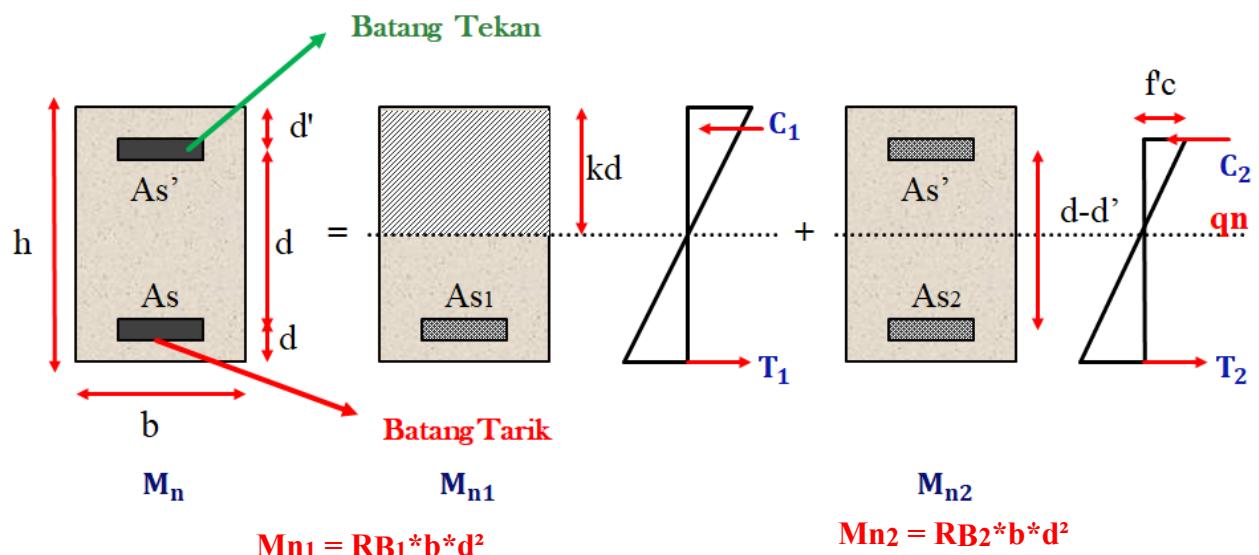
β_1 = Faktor Garis Netral; $f'c$ = Mutu Beton (psi)

$$\text{c. } \rho_{max} = 0.75 * \rho_b ;$$



$$\text{d. } (\rho - \rho') \left(1 - \frac{0.85 * f'c}{f_y} \right) \geq \beta_1 * 0.85 \left(\frac{f'c * d'}{f_y * d} \right) \left[\frac{600}{600 + f_y} \right]$$

$$\text{e. } f's = 600 \left(1 - \frac{\beta_1 * 0.85 * f'c * d'}{(\rho - \rho') * f_y * d} \right)$$



$$RB_1 = \omega_1 * f'c * (1 - 0,59 \omega_1)$$

$$\omega_1 = \Delta \rho \frac{f_y}{f'c}$$

$$\Delta \rho = \frac{A_s - A_{s2}}{b*d} = \frac{A_s - A'_s}{b*d}$$

Hubungan Mn1 dengan Mn2:

$$Mn = Mn_1 + Mn_2$$

$$Mn_1 = (R_{B1} + R_{B2}) * b * d^2$$

$$Mn = RB^R * b * d^2$$

$$Mu = \bigcirc * RB^R * b * d^2 \geq MD_u$$

$$As = As_1 + As_2$$

Hubungan As2 dan As':

$$f_s' * A_{s'} = f_y * A_{s2}$$

$$f_y * A_{s'} = f_y * A_{s2}$$

$$A_{s'} = A_{s2}$$

Rasio: $\frac{\text{Tulangan Tekan}}{\text{Tulangan Tarik}} = x$

Rasio: $\frac{\text{Tegangan Tulangan Tekan}}{\text{Tegangan leleh}} = y$

$$\rho = \rho^R_{\text{maximum}} = 0.75 * \rho_b + \rho' \longrightarrow \boxed{\text{Konstanta: } c}$$

$$\rho = c + \rho'$$

$$\rho = y(c + x\rho) = yc + xy\rho$$

$$\rho(1-xy) = yc$$

$$\rho = \frac{yc}{1-xy} \longrightarrow \rho' = \frac{xy.c}{1-xy}$$

$$\Delta \rho = \rho - \rho' = \frac{(1-x)*yc}{1-xy}$$

$$\omega_1 = \Delta \rho * \frac{fy}{f'c} = \frac{(1-x)*yc}{1-xy} * \left(\frac{fy}{f'c}\right)$$

$$\omega_1 = \Delta \rho * \frac{fy}{f'c} = \frac{(1-x)*yc}{1-xy} * \left(\frac{fy}{f'c}\right) \text{ Digunakan Untuk perhitungan Nilai Strength Factor:}$$

$$R_{B1} = \omega_1 * f'c * (1-0,59 \omega_1)$$

$$R_{B2} = \rho' * f_y * (1-\delta)$$

$$R_{B2} = \left(\frac{xy.c}{1-xy}\right) * f_y * (1-\delta)$$

Bila nilai dari δ di asumsikan 0,10 maka di peroleh rumus untuk menghitung nilai dari tinggi penampang balok (h):

$$RB^R = (R_{B1} + R_{B2})$$

$$h \geq 1,10^3 \sqrt{\frac{MDu}{r * RB^R}}$$

Ketebalan selimut beton untuk komponen struktur beton non-prategang yang dicor di Tempat menurut SNI 2847: 2019 Pasal **20.6.1.3** Persyaratan-persyaratan selimut beton Tabel 4.1 Ketebalan selimut beton untuk komponen struktur beton non-prategang yang dicor di tempat.

Tabel 4. 1 Ketebalan Selimut Beton untuk Komponen Struktur Beton non-Prategang yang di Cor di Tempat, (SNI 03-2847-2019, 2019).

Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan selimut, (mm)
Dicor dan secara permanen kontak dengan tanah	Semua	Semua	75
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Semua	Batang D19 hingga D57	50
		Batang D16, Kawat $\varnothing 13$ atau D13 dan yang lebih kecil	40
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D43 dan D57	40
		Batang D-36 dan yang lebih kecil	20
	Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan utama, sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekang	40

Elemen beton prategang yang dicor di tempat harus memiliki ketebalan selimut beton untuk tulangan, *ducting*, dan *end fittings* sekurang-kurangnya seperti yang disyaratkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Ketebalan Selimut Beton Untuk Komponen Struktur Beton Prategang yang di Cor di Tempat.

Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan selimut, (mm)
Dicor dan secara permanen kontak dengan tanah	Semua	Semua	75
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Semua	25
	Lainnya	Semua	40
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Semua	20
	Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan Utama	40
		Sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekang	25

Dalam SNI 2847:2019 Pasal 20.6.1.3.3 Beton pracetak non-prategang atau prategang yang diproduksi pada kondisi pabrik harus memiliki ketebalan selimut beton untuk tulangan, *ducting* dan *end fittings* sekurang-kurangnya seperti yang disyaratkan pada Tabel 4.3. Semakin tipis ketebalan selimut beton pada konstruksi beton pracetak, menunjukkan semakin besar kontrol yang dibutuhkan untuk pengaturan proporsi campuran, penempatan dan perawatan (*curing*) yang tidak dapat dipisahkan dalam pembuatan beton pracetak. Walaupun dikerjakan dalam kondisi pabrik tidak berarti bahwa bagian pracetak harus dicetak di pabrik. Elemen struktural pracetak yang diletakan di area kerja juga akan dikualifikasi sesuai dengan bagian ini jika kontrol terhadap dimensi bentuk, penempatan tulangan, kontrol kualitas beton beserta prosedur perawatannya sama dengan yang biasanya dilakukan di pabrik. Selimut beton untuk tendon pra-tarik seperti yang dijelaskan pada bagian ini ditujukan untuk memberikan perlindungan minimum dari cuaca atau efek lainnya. Selimut beton mungkin tidak cukup untuk mentransfer atau penyaluran tegangan pada tendon, dan karena itu peningkatan ukuran selimut mungkin diperlukan.

Tabel 4. 3 Ketebalan Selimut Beton Untuk Beton Pracetak nonprategang dan prategang yang di Produksi pada Kondisi Pabrik.

Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan selimut, (mm)	
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Dinding	Batang D-43 dan D-57: tendon dengan Diameter lebih besar dari 40 mm.	40	
		Batang D-36 dan yang lebih kecil: Kawat $\varnothing 13$ atau D13 dan yang lebih kecil: tendon dan strand Diameter 40 mm dan yang lebih kecil.	20	
	Lainnya	Batang D-43 dan D-57: tendon lebih besar dari diameter 40 mm.	50	
		Batang D-19 hingga D-36: tendon dan strand lebih besar dari diameter 16 mm sampai dengan Diameter 40 mm.	40	
		Batang D-16 Kawat $\varnothing 13$ atau D13 dan yang lebih kecil: tendon dan strand dengan Diameter 16 mm atau yang lebih kecil.	30	
	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D-43 dan D-57: tendon dengan Diameter lebih besar dari 40 mm.	30	
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah		Tendon dan strand dengan Diameter 40 mm dan yang lebih kecil.	20	
		Batang D-16 Kawat $\varnothing 13$ atau D13 dan yang lebih kecil.	16	
Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan Utama	Lebih besar dari d_b dan 16 dan tidak boleh melebihi 40		
	Sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekang	10		

Langkah analisis:

- Menetapkan nilai $\beta I = 0,85$ untuk $f'c \leq 30$ MPa atau $\beta I = 0,85 - 0,05(f'c - 30)/7$ untuk $f'c \geq 30$ MPa dan $\beta I = 0,65$ untuk $f'c \geq 58$ MPa.
- Memasukkan variabel d, f_y dan b_1 ke dalam persamaan $ab = b_1 \cdot 600 \cdot d / (600 + f_y)$ sehingga diperoleh ab .
- Melalui persamaan keseimbangan gaya $C_c + C_s = T_s$, dan melalui beberapa anggapan terlebih dahulu maka akan didapat nilai kedalaman garis netral c atau kedalaman blok

beton tekan a. Bila hasil kontrol regangan dengan menggunakan nilai garis netral c tersebut didapat kesesuaian maka anggapan-anggapan itu benar, tetapi bila tidak berarti anggapan itu harus diubah berdasarkan hasil dari kontrol tersebut.

4. Anggapan-anggapan terhadap:

- Letak garis/ sumbu netral**, letak garis netral dapat dianggap terletak di daerah selimut beton/ penutup beton atau diantara tulangan tarik dan tekan. Posisi ini dapat diperkirakan dari perbandingan antara tulangan tarik dan tulangan tekan, bila tulangan tarik cukup banyak sehingga mendekati kondisi berimbangnya maka letak garis netral di antara tulangan tarik dan tekan.
- Kondisi regangan tulangan tarik dan tekan (leleh atau tidaknya)**, bila dianggap regangan itu leleh maka gaya tarik atau tekan yang digunakan didapat dari perkalian luasan dan tegangan leleh ($A \cdot f_y$) tetapi bila tidak leleh maka gaya tarik atau tekan didapatkan dari perkalian antara tegangan kerja (regangan x modulus elastisitas beton = $\epsilon \cdot E$) dan luasan ($A \cdot \epsilon \cdot E$).

5. Anggapan yg dilakukan pada langkah 4) di atas akan menghasilkan kedalaman garis netral c atau kedalaman blok beton a, dari persamaan $C_s + C_c = T_s$, yang kemudian digunakan untuk mengontrol ulang anggapan melalui regangan pada tulangan tekan dan tarik:

a. **Tulangan tekan:**

$$\epsilon' = \frac{(c - d')}{c} * 0,003 ; \quad d' = \text{penutup beton tulangan tekan}$$

b. **Tulangan tarik:**

$$\epsilon' = \frac{(d - c)}{c} * 0,003 ; \quad d = \text{kedalaman efektif tulangan tarik } (h - ds)$$

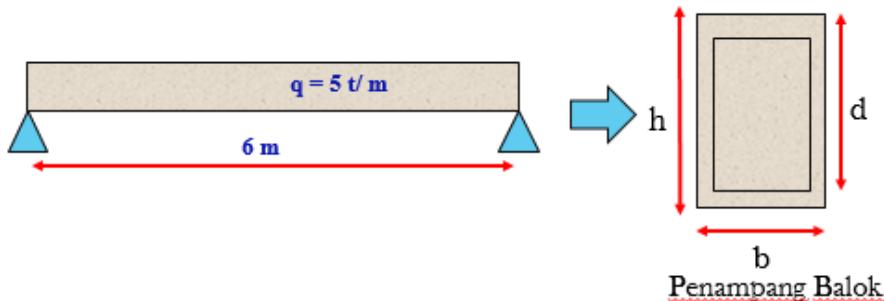
6. Bila dari langkah 5) bersesuaian dengan langkah 4) maka langkah 7) dapat dilanjutkan, tetapi bila ada salah satu anggapan tidak dipenuhi maka anggapan pada langkah 4) dan kontrol regangan pada langkah 5) diulang.

7. a yang didapat dibandingkan dengan ab, bila $a < ab$ maka tulangan terpasang akan menghasilkan penulangan liat/ *ductile* dan sebaliknya akan menghasilkan tulangan getas.

8. Kemampuan nominal balok dapat dihitung terhadap sumbu tulangan tarik seperti berikut $M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \cdot (d - \frac{1}{2}a) + A' \cdot f'_s \cdot (d - d')$ dengan $f'_s = f_y$ bila regangan leleh tulangan tekan yang terjadi, $\epsilon' > \epsilon_y$, dan $f'_s = \epsilon \cdot E$ bila regangan leleh yang terjadi, $\epsilon' < \epsilon_y$, sehingga $M_u = \phi \cdot M_n$.

Contoh Soal 1:

Diketahui penampang balok seperti gambar di bawah ini, dimana nilai dari $q = 5 \text{ t/m}$ (70 % DL) dengan panjang balok 6m, $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$. Tentukanlah nilai momen maksimum struktur, dimensi penampang dan pembesian yang digunakan (jumlah besi dan diameter besi).

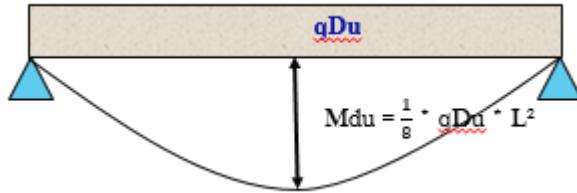


A. Analisis struktur:

$$qDu = \bar{F} * q = (0,7*1,4 + 0,3*1,7) * 5 \text{ t/m} = 7,45 \text{ t/m}$$

Momen Maksimum:

$$Mdu = \frac{1}{8} * qDu * L^2 = \frac{1}{8} * 7,45 * 6^2 = 33,525 \text{ tm}$$



B. Estimasi Penampang:

1. Ketentuan:

Mutu Beton ($f'c$) = 300 kg/cm^2 ,

Mutu tulangan (f_y) = 4000 kg/cm^2

Menggunakan penampang persegi dengan $r = 0,5$, dan nilai dari

Tulangan Tekan = $\frac{1}{3}$ Tulangan Tarik

Tebal Kulit Beton = 2 cm

dan diameter tulangan sengkang 8 mm

2. Nilai dari Strength Faktor (RB^R):

$$(f'c) = 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left[\frac{f'c - 4000}{1000} \right] = 0,85 - 0,05 \left[\frac{4286 - 4000}{1000} \right] = 0,8357$$

$$\rho_b = \frac{\beta_1 * 0,85 * f'c}{f_y} \left[\frac{6300}{6300 + f_y} \right] = \frac{0,8357 * 0,85 * 300}{4000} \left[\frac{6300}{10300} \right] = 0,0326$$

A. Rasio Tulangan

$$\rho_{maks} = 0,75 * \rho_b = 0,75 * 0,0326 = 0,02445$$

Maka nilai dari c = 0,02445; diambil nilai y = 0,90

$$\rho = \frac{yc}{1 - xy} = \frac{0,90 * 0,02445}{1 - \frac{1}{3} * 0,9} = 0,0314$$

$$\rho' = x * \rho = \frac{1}{3} * 0,0314 = 0,0105$$

$$\Delta_\rho = \rho - \rho' = 0,0209$$

$$\omega_1 = \Delta_\rho * \frac{fy}{f'c} = 0,0209 * \frac{fy}{f'c} = 0,279$$

B. Maka nilai dari Strength Faktor adalah:

$$R_{B1} = \omega_1 * f'c * (1 - 0,59 \omega_1) = 69,92 \text{ kg/cm}^2$$

Asumsikan nilai dari: $\delta = 0,10$

$$R_{B2} = \rho' * fy * (1 - \delta) = 0,0105 * 4000 * 0,9 = 37,80 \text{ kg/cm}^2$$

$$RB^R = (R_{B1} + R_{B2}) = 69,92 + 37,80 = 107,72 \text{ kg/cm}^2$$

3. Dimensi dan Penulangan:

$$\text{Tinggi penampang: } h \geq 1,10 \sqrt[3]{\frac{MDu}{r * RB^R}}$$

Dimensi Penampang

$$h \geq 1,10 \sqrt[3]{\frac{3352500}{0,50 * 107,72}}$$

$$h \geq 43,59 \text{ cm} = 44 \text{ cm}$$

Untuk Lebar Penampang:

$$b \geq 0,5 * h = 21,80 \text{ cm} = 22 \text{ cm}$$

Dari hasil perhitungan maka diperoleh dimensi penampang (b/h) = (22/44) cm penulangan:

$$\rho = \frac{As}{b \times d} \quad As = \rho * b * d = 0,0314 * \left(\frac{21,8 * 43,59}{1,10} \right) = 27,13 \text{ cm}^2$$

$$As' = \frac{1}{3} * As = \frac{1}{3} * 27,13 \text{ cm}^2 = 9,04 \text{ cm}^2$$

Jumlah Tulangan Tarik dan Tulangan Tekan:

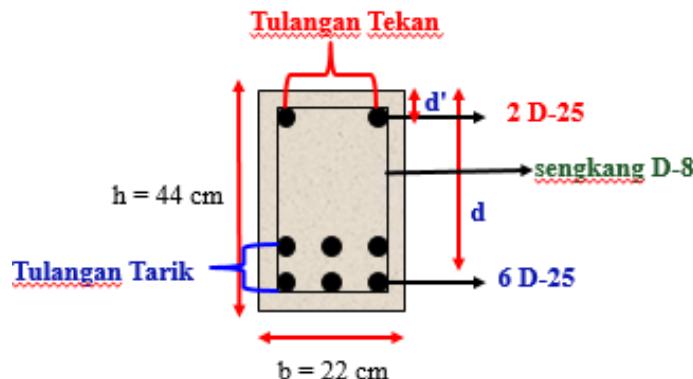
Coba tulangan diameter 25 (D-25) ($A = 4,90 \text{ cm}^2$)

$$N_{AS} = \frac{As}{A-D25} = \frac{27,13}{4,90} = 5,54 = 6$$

Tulangan $\frac{2}{6}$ D-25

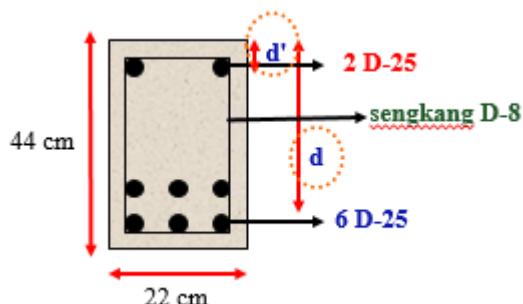
$$N_{AS'} = \frac{As'}{A-D25} = \frac{9,04}{4,90} = 1,84 = 2$$

Tulangan Tarik dan Tekan: $\frac{2}{6}$ D-25



Gambar Detail Penulangan Balok

4. Analisis Kapasitas Momen:



d = Tinggi efektif penampang balok (mm)

d' = Selimut beton pada daerah tulangan tekan (mm);

$$\delta = \frac{d'}{d} = 0,1046 \text{ cm}$$

$$d = [44 - (2+0,8+2,5)] \text{ cm} = 38,70 \text{ cm}$$

$$1 - \delta = 0.895$$

$$d' = [2+0,8 + \frac{2,5}{2}] \text{ cm} = 4,05 \text{ cm}$$

Kapasitas Momen *ultimate* (Mu):

$$Mu = \phi * RB^R * (b * d^2)$$

$$Mu = 0,95 * 107,72 * 22 * 38,70^2 = 3424300 \text{ kgcm} = 34,24 \text{ Tm}$$

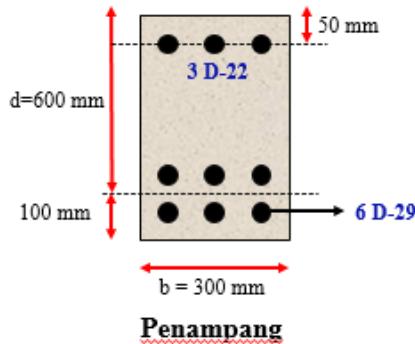
Syarat Analisa Kapasitas Momen:

$$Mu = \phi * RB^R * b * d^2 \geq MD_u$$

$$34,24 \text{ tm} \geq 33,525 \text{ Tm (Ok)}$$

Contoh Soal 2:

Diketahui penampang balok seperti gambar di bawah ini, dimana lebar balok (b) = 300 mm, tinggi efektif (d) = 600 mm, tulangan tarik digunakan 6-D29 dalam dua baris, tulangan tekan terdiri dari 3-D22 dan menggunakan mutu beton 25 MPa, mutu tulangan baja 400 MPa. Tentukan kuat momen rencana dari balok tersebut.



1. Periksa apakah tulangan tekan sudah luluh ataukah belum:

$$A_s = (6 \times 660) = 3960 \text{ mm}^2; \rho = 0,022$$

$$A_s' = (3 \times 380) = 1140 \text{ mm}^2; \rho' = 0,00633$$

$$A_s - A_s' = 2820 \text{ mm}^2; \rho - \rho' = 0,01567$$

Syarat Tulangan Tekan sudah luluh:

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

$$0,85\beta_1 \left(\frac{25}{400} \right) \left(\frac{50}{600} \right) \left(\frac{600}{600 - 400} \right) = 0,01129$$

$$(\rho - \rho') \geq K$$

$0,01567 \geq 0,01129$ (Tulangan Tekan sudah luluh)

2. Cek apakah $(\rho - \rho') < \rho_{maks}$

$0,01567 < 0,01693$ (Terkendali Tarik)

3. Menentukan Kuat Momen Rencana:

$$\Phi M_n = \Phi [(A_s - A_s') f_y (d - \frac{a}{2}) + A_s' f_y (d - d')]$$

Dengan:

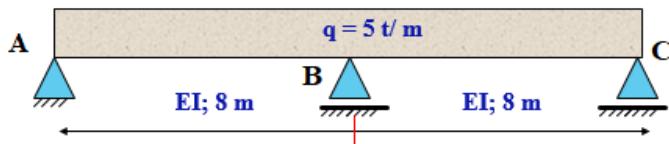
$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0,85 * f'_c * b} = \frac{(2820)400}{0,85 * 25 * 300} = 176,94 \text{ mm}$$

$$\Phi M_n = 0,9 [(2820)400 (600 - \frac{176,94}{2}) + 1140 * 400 (600 - 50)]$$

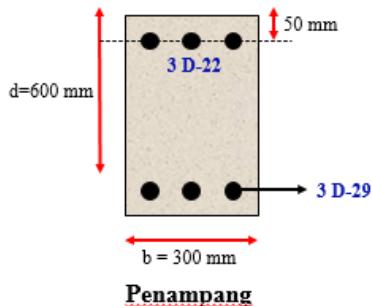
$$= 745024658 \text{ N.mm} = 745,02 \text{ kN.m}$$

4.5 Latihan

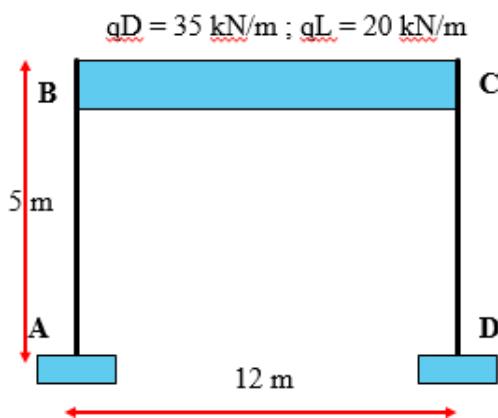
1. Diketahui penampang balok seperti gambar di bawah ini, dimana nilai dari $q = 5 \text{ t/m}$ (60 % DL) dengan panjang balok 8m, $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$. Tentukanlah nilai momen maksimum struktur, dimensi penampang dan pembesian yang digunakan (jumlah besi dan diameter besi).



2. Diketahui penampang balok seperti gambar di bawah ini, dimana lebar balok (b) = 300 mm, tinggi efektif (d) = 600 mm, tulangan tarik digunakan 3-D29 dalam dua baris, tulangan tekan terdiri dari 3-D22 dan menggunakan mutu beton 25 MPa, mutu tulangan baja 400 MPa. Tentukan kuat momen rencana dari balok tersebut.



3. Suatu struktur portal dengan tumpuan sendi ditunjukkan seperti gambar di bawah ini. Memikul berupa beban merata beban mati 35 kN/m dan beban hidup 20 kN/m yang bekerja pada balok BC. Momen di titik B dan C dapat diambil sebesar $MB = MC = -\frac{1*q L^2}{18}$ dan reaksi di titik A serta D adalah sebesar $\frac{q L}{2}$. **Penampang balok BC** dianggap sebagai balok T, dan dimensi kolom adalah $400\text{mm} \times 500 \text{ mm}$, gunakan $f'c = 25 \text{ MPa}$; $f_y = 400 \text{ MPa}$, untuk mendesain balok BC akibat momen terfaktor positif dan negatif.



BAB 5

DESAIN BALOK BETON BERTULANG TERHADAP GAYA GESER

5.1 Pendahuluan

Pada pembelajaran desain balok beton bertulang terhadap gaya geser akan dipelajari bagaimana merencanakan/ mendesain tulangan sengkang (*stirrups*) pada balok beton bertulangan tunggal dan rangkap. Akibat gaya horizontal/ gaya geser yang terjadi pada struktur akan mengakibatkan struktur memerlukan tulangan geser untuk mampu menahan *shear force* yang terjadi pada balok tersebut. Dengan pemasangan tulangan geser pada balok beton bertulang akan meminimalis keruntuhan yang terjadi pada balok yang direncanakan/ didesain, sehingga struktur yang direncanakan lebih aman.

5.2 Kegiatan Pembelajaran: Jenis/ tipe keruntuhan dan pola retak balok beton bertulang pada kondisi seimbang, tarik, dan tekan

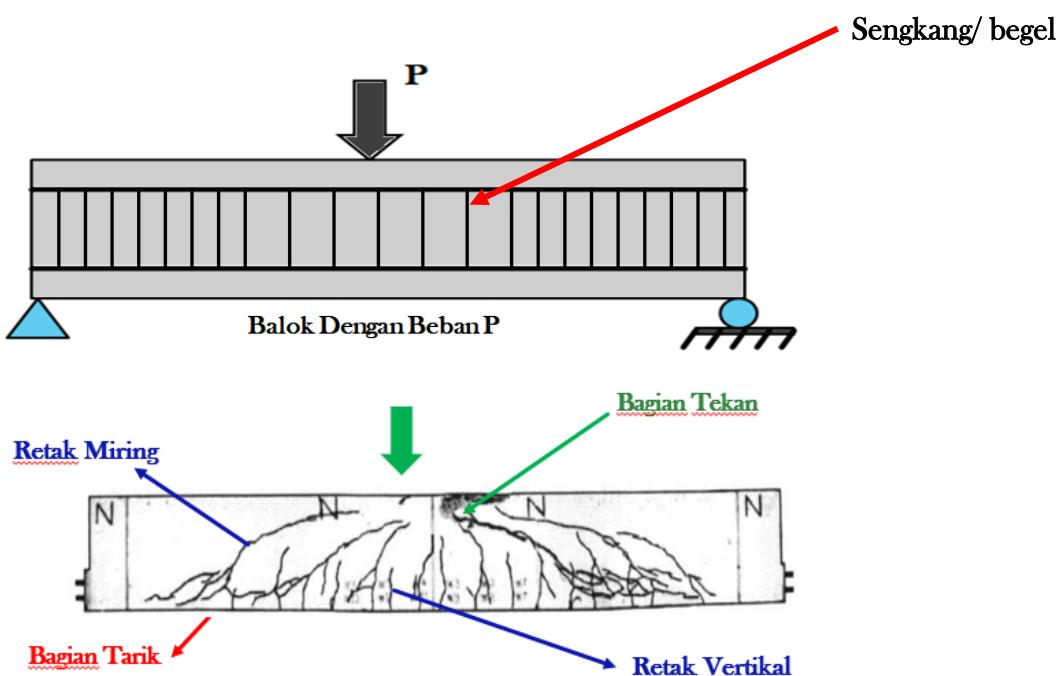
1. Kemampuan akhir

Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari jenis/ tipe keruntuhan dan pola retak balok beton bertulang pada kondisi seimbang, tarik, dan tekan adalah mampu menjelaskan dan mengidentifikasi jenis/ tipe keruntuhan dan pola retak balok beton bertulang pada kondisi seimbang, tarik, dan tekan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan jenis/ tipe keruntuhan balok beton bertulang, pola retak balok beton bertulang pada kondisi seimbang, tarik, tekan, penyebab retak pada balok beton bertulang, dan tipe kait/ penulangan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang 2019.

5.3 Retak Pada Balok Beton Bertulang



1. Retak Vertikal

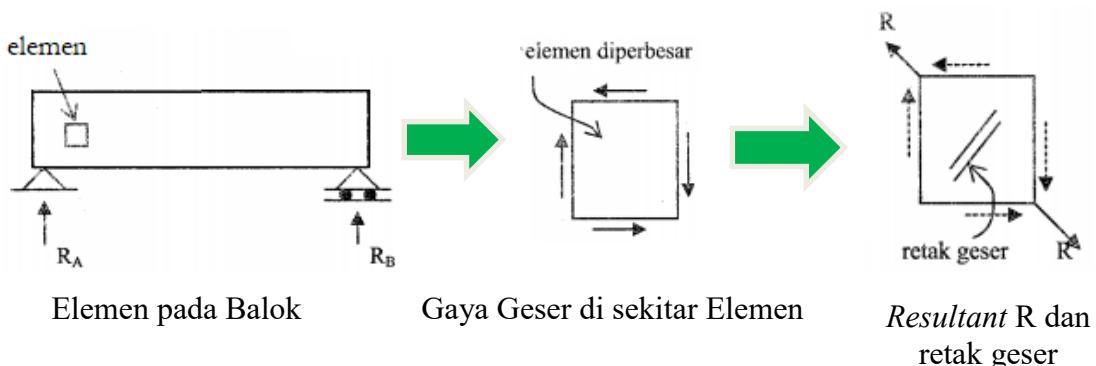
Pada umumnya retak vertikal terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan beban lentur, sehingga biasanya terjadi pada daerah lapangan (bentang tengah) balok, karena pada daerah ini timbul momen lentur paling besar.

2. Retak Miring

Retak miring terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan beban geser, sehingga biasanya terjadi pada daerah ujung (dekat tumpuan) balok karena pada daerah ini timbul gaya geser/ gaya lintang paling besar.

5.4 Retak Balok Akibat Gaya Geser

Untuk memberikan gambaran yang cukup jelas tentang bekerjanya gaya geser/ gaya lintang pada balok, maka dilakukan dengan cara mengambil sebuah elemen kecil dari beton yang berada di daerah ujung balok seperti di tunjukkan gambar di bawah ini.



a. Gaya Geser di sekitar Elemen

1. Arah reaksi RA ke atas, sehingga pada permukaan bidang elemen sebelah kiri terjadi gaya geser dengan arah ke atas.
2. Elemen beton berada pada keadaan stabil, terjadi keseimbangan gaya vertikal pada elemen beton, sehingga pada permukaan bidang elemen sebelah kanan timbul gaya geser ke bawah, gaya geser pada kedua sisi adalah sama.
3. Akibat gaya geser ke atas pada permukaan bidang kiri dan kanan, maka pada elemen beton akan timbul momen yang arahnya sesuai dengan jarum jam.
4. Elemen beton berada dalam keadaan stabil, sehingga momen yang ada harus di lawan momen yang lain yang besarnya sama tapi arahnya berkebalikan.

b. Resultant R dan retak geser

1. Gaya geser ke atas pada permukaan bidang kiri dan gaya geser ke kiri pada permukaan bidang atas membentuk resultant (R) arahnya miring ke kiri-atas.
2. Gaya geser ke atas pada permukaan bidang kanan dan gaya geser ke kanan pada permukaan bidang bawah membentuk resultant (R) arahnya miring ke kiri-bawah.
3. Dari item 1 dan item 2 nilai resultannya sama, tetapi berlawanan arah dan saling tarik menarik.
4. Elemen beton akan retak dengan arah miring membentuk sudut $\alpha = 45^\circ$, jika element tidak mampu menahan gaya tarik dari kedua resultant (R).

5.5 Mengatasi Retak Geser

Retak miring (menyudut) yang terjadi pada balok terjadi akibat dari elemen balok tidak mampu menahan gaya geser yang terjadi pada daerah ujung balok, untuk mengantisipasi hal ini maka diperlukan tulangan geser. Retak miring pada balok dapat di tahan oleh 4 unsur yaitu sebagai berikut:

1. Bentuk dan kekasaran permukaan agregat beton (pasir dan kerikil). Agregat yang bentuknya tajam/ menyudut dan permukaannya kasar sangat kuat menahan gaya geser hal dikarenakan agregat saling mengunci, sehingga mempersulit terjadinya slip (tidak mudah retak). Jika agregat berbentuk bulat dan permukaanya halus tidak kuat menahan gaya geser, karena mudah terjadi slip (mudah retak).



2. Retak geser ditahan oleh gaya tarik dan gaya potong (*dowel action*) dari tulangan longitudinal.

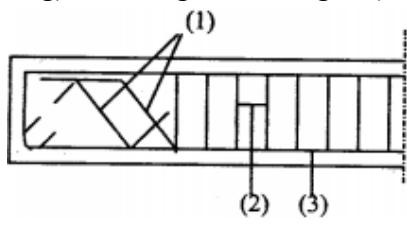


3. Retak geser ditahan oleh *strut* beton
4. Retak geser ditahan oleh gaya tarik tulangan geser, baik berupa tulangan miring maupun tulangan begel.



5.6 Pemasangan Tulangan Geser

Tulangan geser pada balok dapat di pasang dengan arah miring (tulangan miring atau tulangan serong) dan dengan arah tegak (begel atau sengkang).



Keterangan Gambar

- (1) = Tulangan geser miring.
- (2) = Tulangan sengkang (begel)
- (3) = Tulangan longitudinal

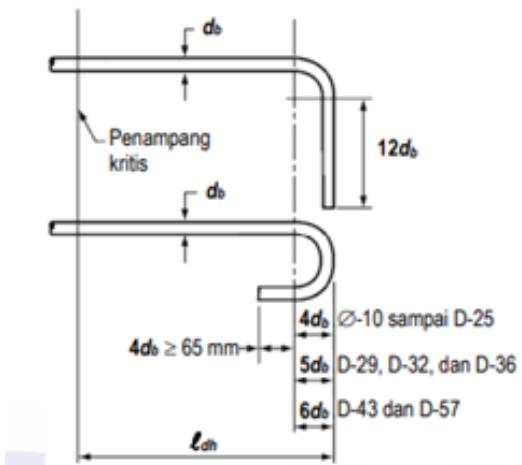
Gambar 5. 1 Tulangan Geser dan Tulangan Longitudinal Balok.

Jenis begel yang biasa dipakai dibedakan berdasarkan jumlah kakinya, yaitu: begel 2 kaki, begel 3 kaki, dan begel 4 kaki.



Gambar 5. 2 Jenis begel pada balok.

Penyaluran kait standar dalam kondisi tarik



Gambar 5. 3 Detail batang tulangan berkait untuk penyaluran kait standar.

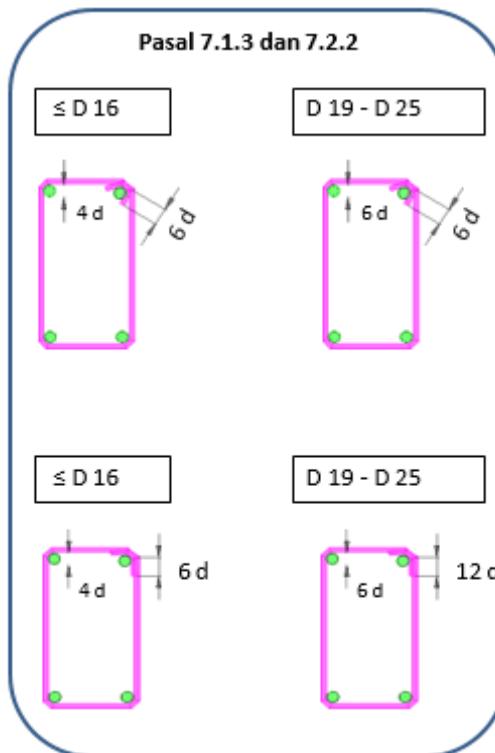
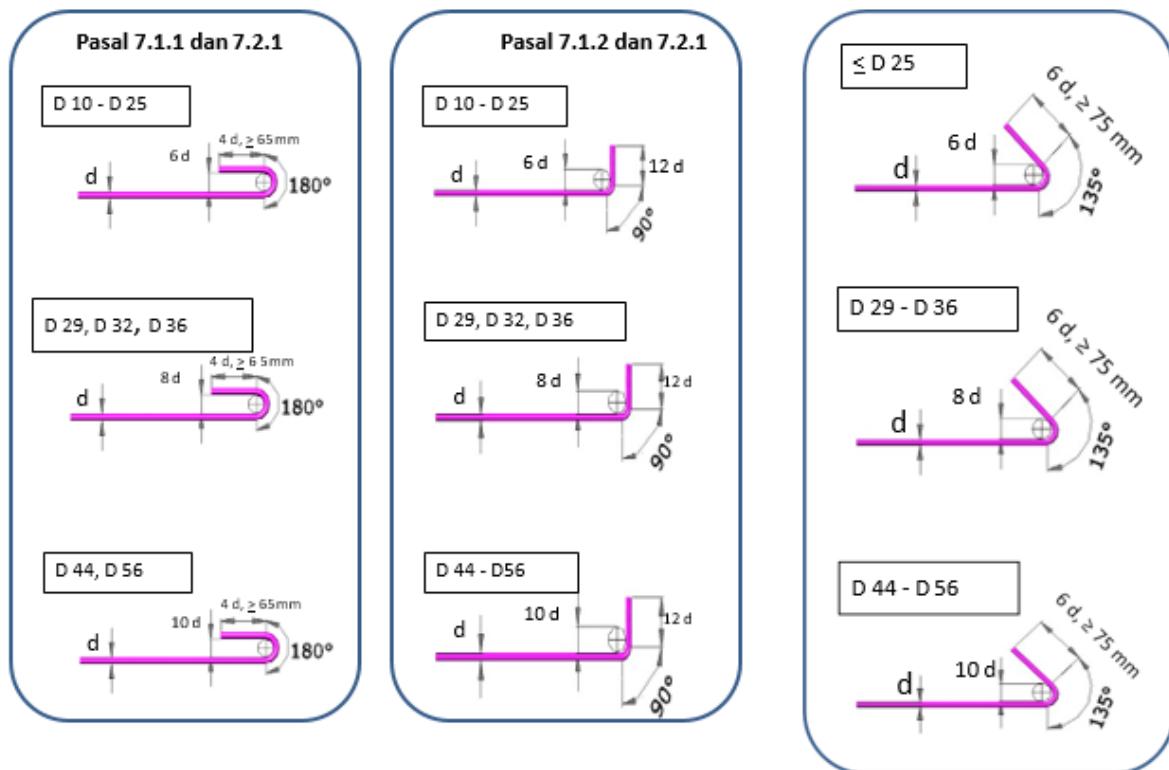
Kait Standar:

Dalam menggunakan “kait standar” dalam penulangan beton bertulang haruslah memenuhi/ mengikuti standar seperti di bawah ini:

1. Bengkokan 180 derajat ditambah perpanjangan $4d_b$, tapi tidak kurang dari 65 mm, pada ujung bebas batang tulangan.
2. Bengkokan 90 derajat ditambah perpanjangan $12d_b$ pada ujung bebas batang tulangan.

3. Untuk sengkang dan kait pengikat:

- Batang tulangan D-16 dan yang lebih kecil, bengkokan 90 derajat ditambah perpanjangan **6db** pada ujung bebas batang tulangan; atau
- Batang tulangan D-19, D-22, dan D-25, bengkokan 90 derajat ditambah perpanjangan **12db** pada ujung bebas batang tulangan; atau
- Batang tulangan D-25 dan yang lebih kecil, bengkokan 135 derajat ditambah perpanjangan **6db** pada ujung bebas batang tulangan.



Tabel 5. 1 Diameter minimum bengkokan.

Ukuran batang tulangan	Diameter minimum
D-10 sampai D-25	6db
D-29, D-32, dan D-36	8db
D-44 dan D-56	10db

Bengkokan standar pada batang tulangan dinyatakan dalam hubungan diameter sisi dalam bengkokan karena lebih mudah mengukurnya daripada radius bengkokan. Faktor utama yang berpengaruh pada diameter bengkokan minimum adalah kelayakan pembengkokan tanpa terputus dan pencegahan kehancuran beton sisi dalam bengkokan.

Tabel 5. 2 Geometri kait standar untuk penyaluran batang ulir pada kondisi Tarik.

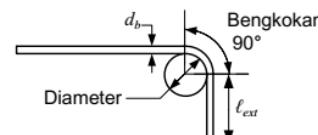
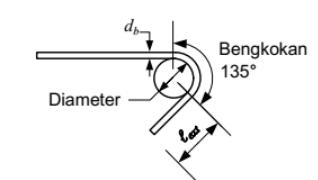
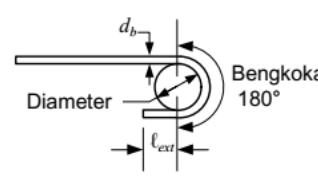
Tipe kait standar	Ukuran Batang	Diameter sisi dalam bengkokan minimum	Perpanjangan lurus ^[1] ℓ_{ext}, mm	Tipe kait standar
Kait 90 derajat	D-10 hingga D-25	6 _{db}	12 _{db}	
	D-29 hingga D-36	8 _{db}		
	D-43 hingga D-57	10 _{db}		
Kait 180 derajat	D-10 hingga D-25	6 _{db}	Terbesar dari 4 _{db} dan 65 mm	
	D-29 hingga D-36	8 _{db}		
	D-43 hingga D-57	10 _{db}		

[1] Kait standar untuk batang ulir pada kondisi tarik termasuk diameter sisi dalam bengkokan tertentu dan panjang perpanjangan lurus. Diizinkan untuk menggunakan perpanjangan lurus yang lebih besar pada ujung kaitnya. Penambahan perpanjangan lurus tidak diperkenankan untuk meningkatkan kapasitas pengangkuran pada kait.

Diameter sisi dalam bengkokan minimum untuk batang yang digunakan sebagai tulangan transversal dan kait standar untuk batang yang digunakan untuk angkur sengkang, ikat silang,

sengkang pengekang, dan spiral harus sesuai dengan Tabel 5.3. Kait standar harus menutup tulangan longitudinal. Standar sengkang, ikat silang, dan sengkang pengekang dibatasi pada batang D25 dan lebih kecil, dan kait 90 derajat dengan perpanjangan **6db** lebih terbatas pada batang D16 dan lebih kecil, sebagai hasil penelitian yang menunjukkan bahwa semakin besar ukuran batang dengan kait 90 derajat dan perpanjangan **6db** cenderung mengelupaskan selimut beton ketika penulangan diberi tegangan dan kait diluruskan. Minimal bengkokan **4db** untuk ukuran batang yang digunakan untuk sengkang, ikat silang, dan sengkang pengekang berdasarkan praktek yang diterima industri di Amerika Serikat. Penggunaan sengkang D-16 atau lebih kecil untuk kait sengkang standar 90° , 135° , atau 180° derajat akan mengizinkan beberapa kali bengkokan pada peralatan standar bengkokan sengkang. Masalah kemudahan konstruksi harus dipertimbangkan dalam pemilihan detail pengangkuran. Khususnya, penggunaan kait 180 derajat harus dihindari pada sengkang tertutup, ikat silang, dan sengkang pengekang yang dibuat pada penulangan yang menerus.

Tabel 5. 3 Diameter sisi dalam bengkokan minimum dan geometri kait standar untuk sengkang, ikat silang, dan sengkang pengekang.

Tipe kait standar	Ukuran Batang	Diameter sisi dalam bengkokan minimum	Perpanjangan lurus [1] ext, mm	Tipe kait standar
Kait 90 derajat	D-10 hingga D-16	4 _{db}	Terbesar dari 6 _{db} dan 75 mm	
	D-19 hingga D-25	6 _{db}	12 _{db}	
Kait 135 derajat	D-10 hingga D-16	4 _{db}	Terbesar dari 6 _{db} dan 75 mm	
	D-19 hingga D-25	6 _{db}		
Kait 180 derajat	D-10 hingga D-16	4 _{db}	Terbesar dari 4 _{db} dan 65 mm	
	D-19 hingga D-25	6 _{db}		

[1] Kait standar untuk sengkang, ikat silang, dan sengkang pengekang termasuk diameter sisi dalam bengkokan tertentu dan panjang perpanjangan lurus. Diizinkan untuk menggunakan perpanjangan lurus yang lebih besar pada ujung kaitnya. Penambahan perpanjangan lurus tidak diperkenankan untuk meningkatkan kapasitas pengangkuran pada kait.

Diameter sisi dalam bengkokan minimum untuk penulangan kawat las yang digunakan sebagai sengkang atau ikat silang tidak boleh kurang dari **4db** untuk kawat ulir yang diameternya lebih besar dari D6 dan **2db** untuk kawat lainnya. Diameter sisi dalam bengkokan yang kurang dari **8db** tidak boleh kurang dari **4db** dari perpotongan las terdekat. Kait seismik yang digunakan untuk mengangkur sengkang, sengkang ikat, sengkang pengekang, dan ikat silang harus mengikuti a) dan b):

- a) Bengkokan minimum adalah 90 derajat untuk sengkang pengekang lingkar dan 135 derajat untuk seluruh sengkang pengekang lainnya.
- b) Kait harus mengikat tulangan longitudinal dan pemanjangan ujungnya harus diarahkan ke bagian dalam sengkang atau sengkang pengekang.

5.7 Perencanaan Tulangan Geser pada Balok Beton Bertulang

1. Kemampuan akhir

Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari desain perencanaan penulangan geser untuk balok biasa bertulangan tunggal dan rangkap akibat lintang dan momen torsi adalah kemampuan di dalam menghitung dan merencanakan penulangan geser untuk balok biasa bertulangan tunggal dan rangkap akibat lintang dan momen torsi sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang 2019.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan desain/ perencanaan penulangan geser/ begel untuk balok biasa bertulangan tunggal dan rangkap akibat gaya geser (*shear force*), lintang, dan momen.

2.1 Perencanaan Tulangan Geser/ Begel Balok

Perencanaan Tulangan Geser/ Begel Balok dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut ini:

1. Gaya geser rencana, Gaya geser nominal, gaya geser yang ditahan oleh beton begel di rumuskan dengan:

$$V_r = \phi * V_n; \text{ dan } \phi * V_n \geq V_u$$

$$V_n = V_c + V_s$$

Dimana:

V_r = Gaya geser rencana, (kN)

V_n = Kuat Geser nominal, (kN)

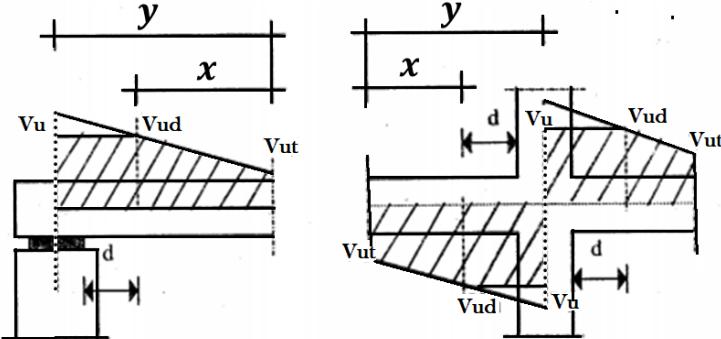
V_c = Gaya geser yang ditahan oleh beton, (kN)

V_s = Gaya geser yang ditahan oleh begel, (kN)

ϕ = Faktor reduksi geser = 0,75

2. Nilai dari V_u boleh diambil pada jarak d (menjadi V_{ud}) dari muka kolom yang di rumuskan sebagai berikut:

$$V_{ud} = V_{ut} + \frac{x}{y} * (V_u - V_{ut})$$



3. Gaya Geser yang di tahan oleh beton (V_c) dihitung dengan:

$$V_c = \frac{1}{6} * \sqrt{f_c} * b * d$$

4. Gaya geser yang di tahan oleh begel (V_s) dapat di hitung dengan persamaan:

$$V_s = \frac{(V_u - \phi * V_c)}{\phi}; \quad V_s = \frac{A_v * f_y * d}{s} \quad s = \text{jarak sengkang}$$

5. Untuk ketentuan jika:

$$V_s \text{ harus } \leq \frac{2}{3} * \sqrt{f_c} * b * d$$

Jika V_s ternyata $> \frac{2}{3} * \sqrt{f_c} * b * d$ maka ukuran balok di perbesar

6. SNI 03- 2847-2002, Luas tulangan geser per-meter panjang balok yang diperlukan (A_v , u) di hitung dengan memilih nilai terbesar:

$$\text{a. } A_{v,u} = \frac{(V_s * S)}{f_y * d}$$

dengan $S = \text{panjang balok } 1000 \text{ mm}$

$$\text{b. } A_{v,u} = \frac{(b * S)}{f_y * d}$$

dengan $S = \text{panjang balok } 1000 \text{ mm}$

$$\text{c. } A_{v,u} = \frac{75 * \sqrt{f_c} * b * S}{1200 * f_y * d}$$

dengan $S = \text{panjang balok } 1000 \text{ mm}$

7. Spasi begel (s) dapat dihitung dengan:

$$\text{a. } s = \frac{n * \frac{1}{4} * \pi * d * p^2 * S}{A_{v,u}}$$

dengan $S = \text{panjang balok } 1000 \text{ mm}$

$$b. Vs < \frac{1}{3} * \sqrt{f_c} * b * d ;$$

$$\text{maka } s \leq \frac{d}{2} \text{ dan } s \leq 600 \text{ mm}$$

$$c. Vs > \frac{1}{3} * \sqrt{f_c} * b * d ; \quad \text{maka } s \leq \frac{d}{4} \text{ dan } s \leq 300 \text{ mm}$$

Dengan:

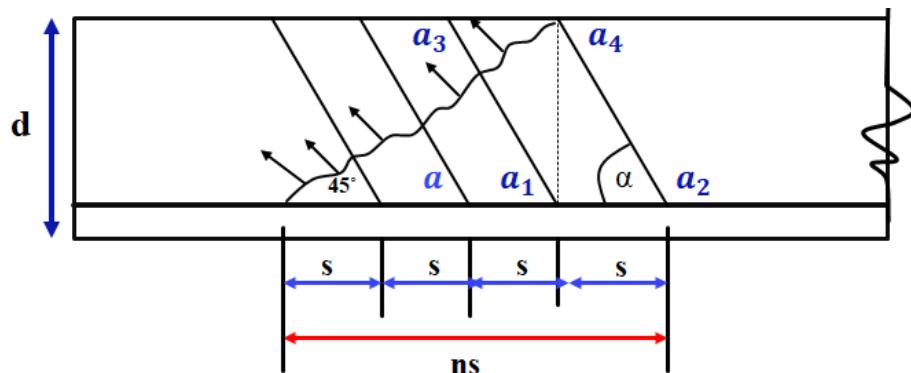
n = Jumlah kaki begel (2, 3, atau 4 kaki)

dp = Diameter begel dari tulangan polos (mm)

2.2 Perhitungan nilai Vs dengan analogi rangka batang

Dengan A_V adalah luas tulangan geser yang berjarak s , dan f_yt adalah kuat luluh dari tulangan geser, sedangkan ns didefinisikan sebagai jarak aa_1a_2 :

$$Vs = n * A_V * f_yt * \sin\alpha$$



Gambar 5. 4 Perhitungan nilai Vs dengan analogi rangka batang.

Dari gambar diatas, nilai dari ns dapat ditentukan dengan:

$$d = a_1 a_4 = aa_1 \tan 45^\circ \quad (\text{Lihat segitiga } aa_1a_4)$$

$$d = a_1 a_4 = a_1 a_2 \tan \alpha^\circ \quad (\text{Lihat segitiga } aa_2a_4)$$

$$ns = aa_1 + a_1 a_2 = d (\cot 45^\circ + \cot \alpha^\circ)$$

$$= d (1 + \cot \alpha^\circ)$$

$$n = \frac{d}{s} (1 + \cot \alpha^\circ)$$

Dengan mensubsitusikan nilai dari n , kepersamaan gaya geser $Vs = n * A_V * f_yt * \sin\alpha$

Maka diperoleh:

$$Vs = n * A_V * f_yt * \sin\alpha$$

$$Vs = \frac{d}{s} (1 + \cot \alpha^\circ) * A_V * f_yt * \sin\alpha$$

$$Vs = \frac{A_V * f_yt * d}{s} (\sin\alpha + \cos \alpha^\circ) *$$

Untuk sengkang Vertikal, Maka nilai $\alpha^\circ = 90^\circ$ Sehingga:

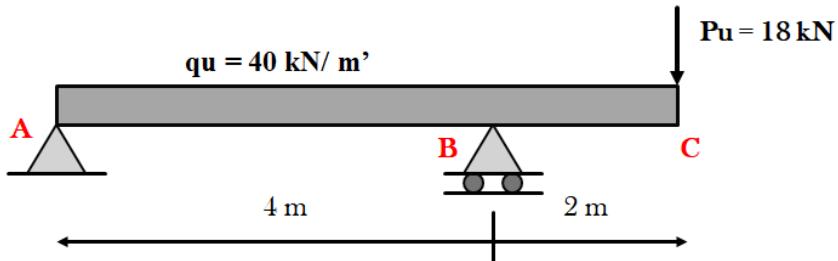
$$V_s = \frac{A_v * f_{yt} * d}{s} \quad \text{Atau } s = \frac{A_v * f_{yt} * d}{V_s}$$

Untuk sengkang Vertikal, Maka nilai $\alpha^\circ = 45^\circ$ Sehingga:

$$V_s = (1,4) * \frac{A_v * f_{yt} * d}{s} \quad \text{Atau } s = \frac{1,4 * A_v * f_y * d}{V_s}$$

Contoh Soal 1:

Balok berukuran (300/ 400) dengan bentang dan beban-beban seperti gambar diatas. Mutu beton ($f'c$) = 20 MPa, $f_y = 300$ MPa dan diameter tulangan utama D-16, sengkang $\Phi 8$ dan $\Phi 6$.



Soal:

Hitung dan gambarlah tulangan longitudinal serta begel balok tersebut.

Penyelesaian:

$$d_{s1} = 40 + 8 + \frac{16}{2} = 56 \text{ mm} \quad (\text{dipakai } d_{s1} = 60 \text{ mm})$$

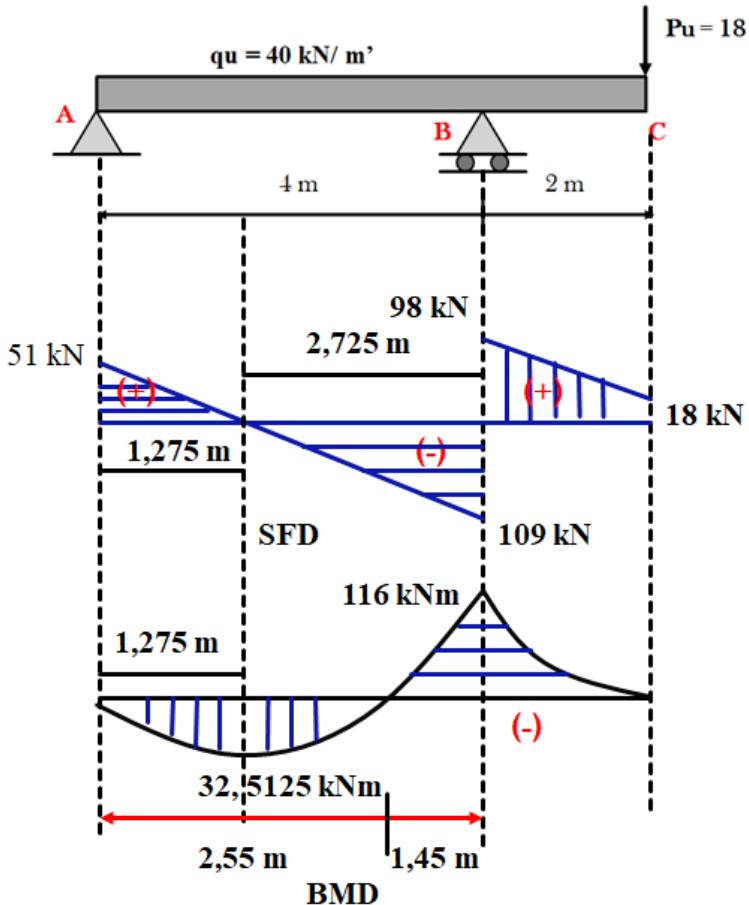
$$d_{s2} = D + S_{nv} = 16 + 25 = 41 \text{ mm} \quad (\text{dipakai } d_{s2} = 40 \text{ mm})$$

Jumlah tulangan maksimal perbaris (m):

$$m = \frac{b - 2 \cdot d_{s1}}{D + S_{nv}} + 1 = \frac{300 - 2 \cdot 60}{16 + 40} + 1 = 4,21 \sim \textbf{Maksimal 4 Batang}$$

$$\sum MB = 0; \text{ Diperoleh dari: } R_A = \frac{40 \cdot 6 \cdot (4 - \frac{5}{2}) - 18 \cdot 2}{4} = 51 \text{ kN}$$

$$\sum MA = 0; \text{ Diperoleh dari: } R_B = \frac{40 \cdot 6 \cdot (\frac{5}{2}) + 18 \cdot 6}{4} = 207 \text{ kN}$$



Penggambaran SFD:

$$\begin{aligned}
 D_A &= R_A = 51 \text{ kN} \\
 D_{B1} &= D_A - q_u \cdot L_1 \\
 &= 51 - 40.4 = -109 \text{ kN} \\
 D_{B2} &= D_{B1} - R_B \\
 &= -109 + 207 = 98 \text{ kN} \\
 D_{C1} &= D_{B2} - q_u \cdot L_2 \\
 &= 98 - 40.2 = 18 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Penggambaran BMD:

$$SF_x = 0$$

$$\begin{aligned}
 R_A - q_u \cdot x &= 0 \\
 X = R_A / q_u &= 51 / 40 = 1,275 \text{ m} \\
 M_{\max}^{(+)} &= R_A \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q_u \cdot x^2 \\
 &= 51 \cdot 1,275 - \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 1,275^2 \\
 &= 32,5125 \text{ kNm}.
 \end{aligned}$$

$$M_y = 0$$

$$\begin{aligned}
 51 \cdot y - \frac{1}{2} \cdot q_u \cdot y^2 &= 0 \\
 (51y - \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot y^2) &= 0 \\
 (51 - 20y) \cdot y &= 0 \\
 y_1 = 0 \text{ m} ; y_2 &= 51/20 = 2,55 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_B^{(+)} &= \frac{1}{2} \cdot q_u \cdot L_2^2 + P_u \cdot L_2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 2^2 + 18 \cdot 2 \\
 &= 116 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Tulangan Longitudinal:

Bentang AB: $f'c = 20 \text{ MPa}$, $f_y = 300 \text{ MPa}$, maka $K_{maks} = 5,6897 \text{ MPa}$ (Lihat Tabel dibawah ini). Dipasang tulangan 1 baris, jadi $ds = 60 \text{ mm}$, $d = 400 - 60 = 340 \text{ mm}$.

$$Mu^{(+)} = 32,5125 \text{ kNm}$$

Tabel 5. 4 Faktor momen pikul maksimal (K_{maks}) dalam MPa

Mutu Beton f'_c (MPa)	Mutu Baja Tulangan (f_y) (MPa)					
	240	300	350	400	450	500
15	4,4839	4,2673	4,1001	3,7987	3,7987	3,6627
20	5,9786	5,6897	5,4668	5,0649	5,0649	4,8836
25	7,4732	7,1121	6,8335	6,3311	6,3311	6,1045
30	8,9679	8,5345	8,2002	7,5973	7,5973	7,3254
35	10,1445	9,6442	9,2595	8,5682	8,5682	8,2573

$$K = \frac{Mn}{\phi \cdot b \cdot d^2} = \frac{32,5125 * 10^6}{0,8 * 300 * 340^2} = 1,1719 \text{ Mpa} < K_{maks}$$

Dihitung Tulangan Tunggal

$$a = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.K}{0,85.f'c}}\right).d = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1,1719}{0,85 \cdot 20}}\right) \cdot 340 = 24,307 \text{ mm}$$

Luas Tulangan Perlu $A_{s,u}$:

$$A_s = \frac{0,85.f'c.a.b}{f_y} = \frac{0,85 \cdot 20 \cdot 24,307 \cdot 300}{300} = 413,219 \text{ mm}^2; \rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{300} = 0,00467$$

Tabel 5. 5 Rasio Tulangan Minimal (ρ_{\min}) dalam persen (%).

Mutu Beton f'_c (MPa)	Mutu Baja Tulangan (f_y) (MPa)					
	240	300	350	400	450	500
$\leq 31,36$	0,583	0,467	0,400	0,35	0,311	0,280
35	0,616	0,493	0,423	0,370	0,329	0,296
40	0,659	0,527	0,452	0,395	0,351	0,316
45	0,699	0,559	0,479	0,419	0,373	0,335
50	0,737	0,589	0,505	0,442	0,393	0,354

$$A_{s \text{ minimum}} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d = 0,467\% \cdot 300 \cdot 340 = 476,34 \text{ mm}^2$$

Dipilih yang besar, Jadi $A_{s,u} = 476,34 \text{ mm}^2$

Jumlah Tulangan (n):

$$n = \frac{A_{s,u}}{\frac{1}{4} \cdot \pi d^2} = \frac{476,34}{\frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 16^2} = 2,369 \quad \text{Maka di gunakan 3 batang (3D-16)}$$

Jadi dipasang:

- Tulangan Tarik (A_s) = 3D-16 = 603,186 $\text{mm}^2 > A_{s,u}$ (**Ok**)
- Tulangan Tekan ($A_{s'}$) = 2D-16 = 402,124 mm^2 (ditambahkan)

Bentang BC: $M_u^{(-)} = 116 \text{ kNm}$ (Tulangan tarik di bagian atas di pasang 3 baris)

$$d_s = d_{s1} + \frac{2.d_{s2}}{2} = 60 + \frac{2 \cdot 40}{2} = 100 \text{ mm}; \quad d = 400 - 100 = 300 \text{ mm}$$

$$K = \frac{M_n}{\phi * b * d^2} = \frac{116 * 10^6}{0,8 * 300 * 300^2} = 5,3704 \text{ MPa} < K_{\max} \text{ (Dihitung Tulangan Tunggal)}$$

$$a = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.K}{0,85.f'c}}\right).d = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 5,3704}{0,85 \cdot 20}}\right) \cdot 300 = 117,964 \text{ mm}$$

Luas Tulangan perlu ($A_{s,u}$):

$$A_{s,u} = \frac{0,85 * f'c * b * a}{f_y} = \frac{0,85 * 20 * 300 * 117,964}{300} = 2005,388 \text{ mm}^2$$

$$A_s \min = \rho_{\min} * b * d = 0,467\% * 300 * 300 = 420,30 \text{ mm}^2$$

Dipilih yang besar, jadi $A_{s,u} = 2005,388 \text{ mm}^2$

Jumlah Tulangan (n):

$$n = \frac{A_{s,u}}{\frac{1}{4} \pi d^2} = \frac{2005,388}{\frac{1}{4} \pi \cdot 3,14 \cdot 16^2} = 9,974 \text{ Maka di gunakan 10 batang (10D-16) "Cukup dipasang 3 baris"}$$

Jadi dipasang:

- Tulangan Tarik (A_s) = 10D-16 = 2010,619 mm² > $A_{s,u}$ (**Ok**)
- Tulangan Tekan ($A_{s'}$) = 2D-16 = 402, 124 mm² (ditambahkan)
- a. Tulangan Geser/ Begel:

Tumpuan A:

$V_u = 51 \text{ kN}$, nilai $d = 340 \text{ mm} = 0,34 \text{ m}$

$$\begin{aligned} V_{ud1} &= V_{ut} + \left(\frac{x}{y}\right) \cdot (V_u - V_{ut}) \\ &= 0 + \left(\frac{1,275 - 0,34}{1,275}\right) \cdot (51 - 0) = 37,4 \text{ kN} = \mathbf{37400 \text{ N.}} \end{aligned}$$

Tumpuan B:

$V_{u,kiri} = 109 \text{ kN}$, nilai $d = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$

$$\begin{aligned} V_{ud2} &= V_{ut} + \left(\frac{x}{y}\right) \cdot (V_u - V_{ut}) \\ &= 0 + \left(\frac{2,725 - 0,3}{2,725}\right) \cdot (109 - 0) = 97 \text{ kN} = \mathbf{97000 \text{ N.}} \end{aligned}$$

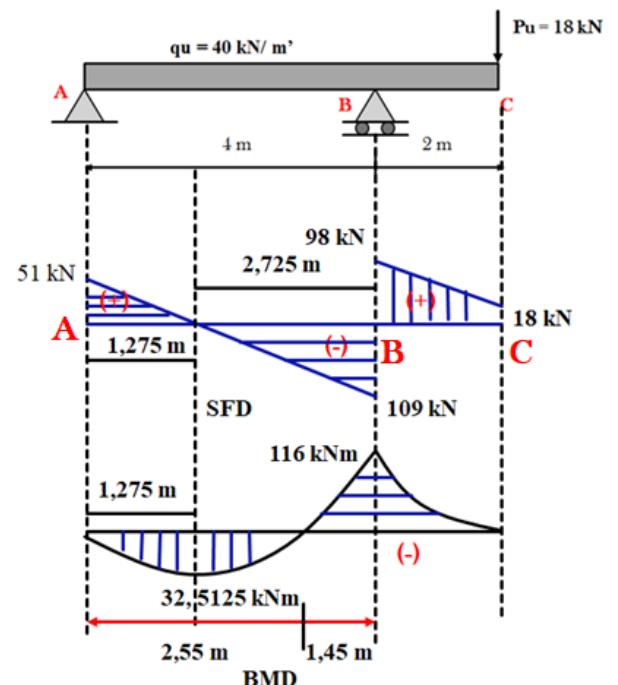
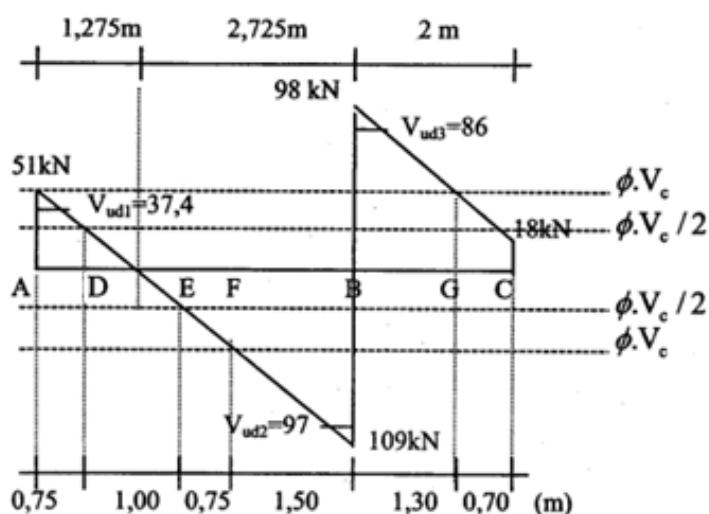
$V_{u,kanan} = 98 \text{ kN}$

$$\begin{aligned} V_{ud3} &= V_{ut} + \left(\frac{x}{y}\right) \cdot (V_u - V_{ut}) \\ &= 18 + \left(\frac{2 - 0,3}{2}\right) \cdot (98 - 18) = 86 \text{ kN} = \mathbf{86000 \text{ N.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi \cdot V_c &= \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d; \text{ dipilih } d = 300 \text{ mm (nilai } d \text{ yang kecil pada tumpuan B)} \\ &= \phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{20} \cdot 300 \cdot 300 = \mathbf{50311,529 \text{ N}} \end{aligned}$$

$$\phi \cdot \frac{V_c}{2} = \frac{50311,529 \text{ N}}{2} = \mathbf{25155,765 \text{ N}}$$

Penentuan Daerah Penulangan Geser:



➤ Bentang AD:

$$\frac{AD}{(51000 - \phi \cdot \frac{V_c}{2})} = \frac{1,275}{51000}$$

$$AD = 1,275 \cdot \left(\frac{51000 - 25155,765}{51000} \right) = 0,65 \text{ m (Dipakai } 0,75 \text{ m)}$$

➤ Bentang BF:

$$BF = 2,725 \cdot \left(\frac{109000 - \phi \cdot V_c}{109000} \right) = 1,47 \text{ m (Dipakai } 1,50 \text{ m)}$$

➤ Bentang EF:

$$BE = 2,725 \cdot \left(\frac{109000 - \phi \cdot \frac{V_c}{2}}{109000} \right) = 2,12 \text{ m (Dipakai } 2,25 \text{ m)}$$

$$EF = BE - BF = 2,25 - 1,50 = 0,75 \text{ m}$$

➤ Bentang DE:

$$= 4-1,50 - 0,75 - 0,75 = 1,0 \text{ m}$$

➤ Bentang BG:

$$\frac{BG}{BC} = \left(\frac{98000 - \phi \cdot V_c}{98000 - \phi \cdot \frac{V_c}{2}} \right)$$

$$BG = 2 \cdot \left(\frac{98000 - 50311,529}{98000 - 25155,765} \right) = 1,31 \text{ m (dipakai } 1,30 \text{ m)}$$

➤ Bentang GC = 2 - 1,30 = 0,70 m

Penulangan pada bentang AD, EF, dan GC:

Karena $\phi \cdot \frac{V_c}{2} < V_u < \phi \cdot V_c$, maka digunakan tulangan begel minimal dengan memilih yang besar dari nilai berikut:

$$Av,u = \frac{75 * \sqrt{f_c} * b * S}{1200 * f_y} = \frac{75 * \sqrt{20} * 300 * 1000}{1200 * 300} = 279,508 \text{ mm}^2$$

$$Av,u = \frac{(b * S)}{f_y * 3} = \frac{(300 * 1000)}{300 * 3} = 333,33 \text{ mm}^2 \text{ (yang dipilih)}$$

Dipilih begel 2 kaki berdiameter 8 mm

$$\text{Spasi begel, (s)} = \frac{n * \frac{1}{4} * \pi * d * p^2 * S}{Av,u} = \frac{2 * \frac{1}{4} * \pi * 8^2 * 1000}{333,33} = 301,596 \text{ mm}$$

$$s \leq \left(\frac{d}{2} \right) = \left(\frac{300}{2} \right) = 150 \text{ mm}$$

$$s \leq 600 \text{ mm}$$

Dipilih "s" paling kecil yaitu spasi begel "s" = 150 mm

Jadi pada bentang AD, EF, dan GC dipakai begel $\phi 8-150$ mm.

➤ **Penulangan Pada Bentang DE:**

Karena gaya geser perlu $< \phi \cdot \frac{V_c}{2}$ maka digunakan begel paling minimal ($\phi 6$). Spasi begel "s" = $(\frac{d}{2}) = (\frac{300}{2}) = 150 \text{ mm}$; Jadi dipakai begel $\phi 6$ - 150 mm

➤ **Penulangan Pada Bentang BF:**

$V_{ud2} > \phi \cdot V_c$, Maka:

$$V_s = \left(\frac{V_{ud2} - \phi \cdot V_c}{\phi} \right) = \left(\frac{97000 - 50311,529}{0,75} \right) = 62251,295 \text{ N}$$

$$V_{s,\text{maksimum}} = \frac{2}{3} * \sqrt{f_c} * b * d = \frac{2}{3} * \sqrt{20} * 300 * 300 = 268328,157 \text{ N}$$

$$\frac{1}{3} * \sqrt{f_c} * b * d = \frac{1}{3} * \sqrt{20} * 300 * 300 = 134164,079 \text{ N}$$

$V_s < V_{s,\text{maksimum}}$, Jadi ukuran balok dapat dipakai

$$V_s < \frac{1}{3} * \sqrt{f_c} * b * d; \text{ Jadi syarat spasi begel : } "s \leq (\frac{d}{2}) \text{ dan } s \leq 600 \text{ mm}".$$

Luas begel per meter:

$$A_{v,u} = \frac{(V_s * S)}{f_y * d} = \frac{(62251,295 * 1000)}{300 * 300} = 691,681 \text{ mm}^2$$

$$A_{v,u} = \frac{(b * S)}{f_y * 3} = \frac{(300 * 1000)}{300 * 3} = 333,33 \text{ mm}^2$$

$$A_{v,u} = \frac{75 * \sqrt{f_c} * b * S}{1200 * f_y} = \frac{75 * \sqrt{20} * 300 * 1000}{1200 * 300} = 279,508 \text{ mm}^2$$

Dipilih yang besar, jadi nilai $A_{v,u} = 691,681 \text{ mm}^2$

$$\text{Spasi begel, (s)} = \frac{n * \frac{1}{4} * \pi * d * p^2 * S}{A_{v,u}} = \frac{2 * \frac{1}{4} * \pi * 8^2 * 1000}{691,681} = 145,343 \text{ mm}$$

Syarat Spasi:

$$s = \frac{d}{2} = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm}$$

Dipilih spasi yang kecil, yaitu "s" = 145 mm

Jadi pada bentang BF dipakai begel $\phi 8$ - 145 mm

➤ **Penulangan Pada Bentang BG:**

$V_{ud3} > \phi \cdot V_c$, Maka:

$$V_s = \left(\frac{V_{ud3} - \phi \cdot V_c}{\phi} \right) = \left(\frac{86000 - 50311,529}{0,75} \right) = 47584,628 \text{ N}$$

$$V_s < \frac{1}{3} * \sqrt{f_c} * b * d; \text{ Jadi syarat spasi begel : } "s \leq (\frac{d}{2}) \text{ dan } s \leq 600 \text{ mm}".$$

Luas begel per-meter:

$$A_{v,u} = \frac{(V_s * S)}{f_y * d} = \frac{(47584,628 * 1000)}{300 * 300} = 528,718 \text{ mm}^2$$

$$A_{v,u} = \frac{(b * S)}{f_y * 3} = \frac{(300 * 1000)}{300 * 3} = 333,33 \text{ mm}^2$$

$$A_{v,u} = \frac{75 * \sqrt{f_c} * b * S}{1200 * f_y} = \frac{75 * \sqrt{20} * 300 * 1000}{1200 * 300} = 279,508 \text{ mm}^2$$

Dipilih yang besar, jadi nilai $A_{v,u} = 528,718 \text{ mm}^2$

$$\text{Spasi begel, } (s) = \frac{n \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot d p^2 \cdot S}{A_{v,u}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 8^2 \cdot 1000}{528,718} = 190,141 \text{ mm}$$

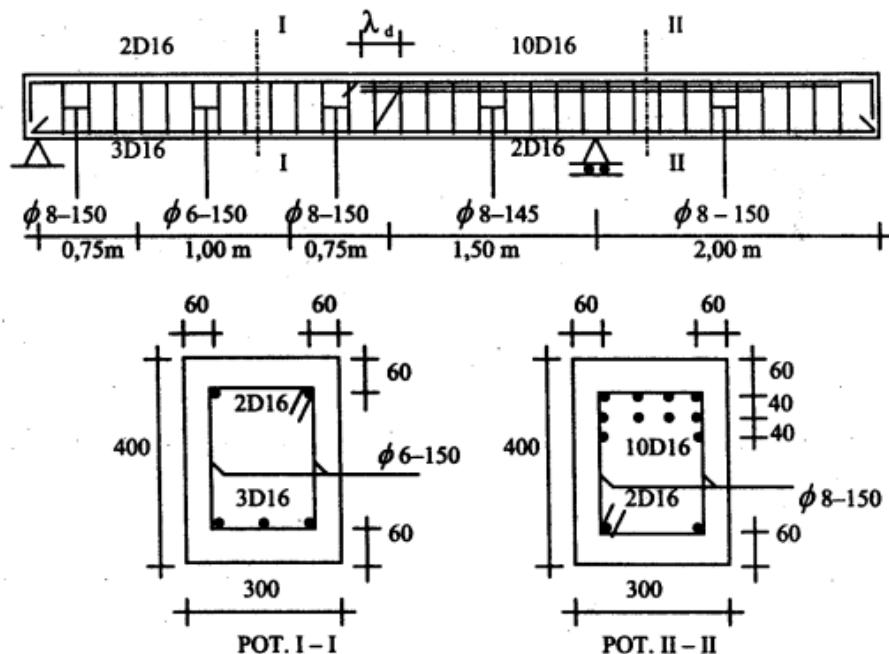
Syarat Spasi:

$$s = \frac{d}{2} = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm}$$

Dipilih spasi yang kecil, yaitu "s" = 150 mm

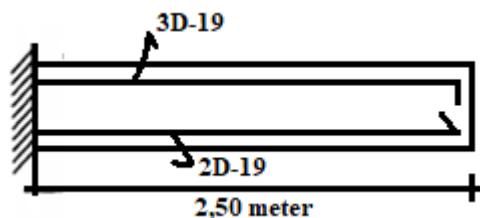
Jadi pada bentang BG dipakai begel $\phi 8-150 \text{ mm}$ (sama dengan bentang GC)

Gambar penulangan:



5.8 Latihan

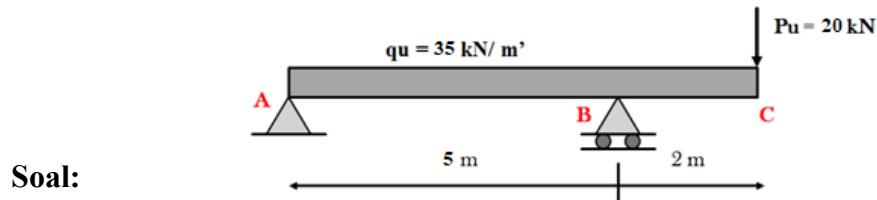
1. Diketahui Balok (300/450), $d_s = d_{s'} = 60 \text{ mm}$, dengan menggunakan Tulangan atas 3D-19 dan tulangan bawah 2D-19. Mutu bahan yang di gunakan $f'_c = 20 \text{ MPa}$, $f_y = 300 \text{ MPa}$, tulangan untuk begel $\phi 6$ dan $\phi 8$. Jika beban mati (termasuk berat sendiri balok) $q_D = 8 \text{ kN/m}$ dan beban hidup $q_L = 6 \text{ kN/m}$.



Tentukanlah:

- a. Jarak begel/ sengkang dan diameter tulangan geser yang digunakan.
- b. Gambarkan Penulangan sengkang dan juga tulangan tarik dan tekan.

2. Balok berukuran 300/ 300 dengan bentang dan beban-beban seperti gambar diatas. Mutu beton ($f'c$) = 30 Mpa, f_y = 325 Mpa dan diameter tulangan utama D-19, sengkang $\phi 8$ dan $\phi 6$.



Hitung dan gambarlah tulangan longitudinal serta begel balok tersebut.

BAB 6

ANALISIS DAN DESAIN BALOK T

6.1 Pendahuluan

Pada umumnya balok beton biasanya dicor *monolit* dengan pelat sehingga lendutan pada balok mengakibatkan bagian pelat yang bersebelahan dengan balok ikut melendut. Pada Kondisi ini dapat dianggap ada bagian pelat dan balok bekerja bersama-sama dalam memikul beban luar. Tegangan tekan terjadi pada bagian badan balok dan sambungan pelat. Dalam kondisi ini perlu diketahui berapa bagian lebar pelat yang efektif menerima distribusi gaya-gaya balok (berapa bagian lebar efektif *flens*). Untuk mengatasi hal tersebut sangatlah perlu dilakukan perencanaan tulangan tunggal dan rangkap pada balok T.

6.2 Kegiatan Pembelajaran: Analisa Penampang Balok T dengan Tulangan Tunggal

1. Kemampuan akhir

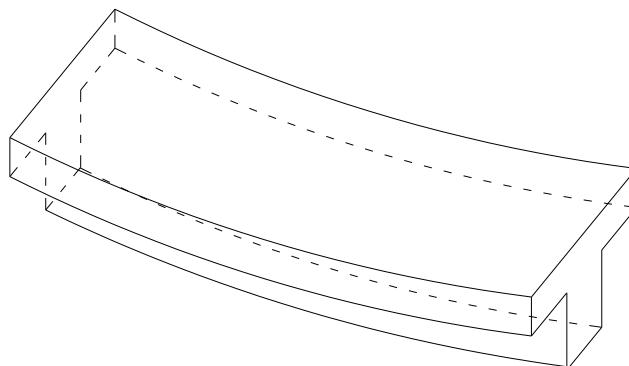
Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari analisa penampang balok T dengan tulangan tunggal adalah mampu menjelaskan tipe balok T bertulangan tunggal, mendesain/ menghitung dan merencanakan penulangan balok T bertulangan tunggal sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan tipe balok T bertulangan tunggal, analisa dan perencanaan balok T bertulangan tunggal.

6.3 Perencanaan Balok T/ Desain Balok T

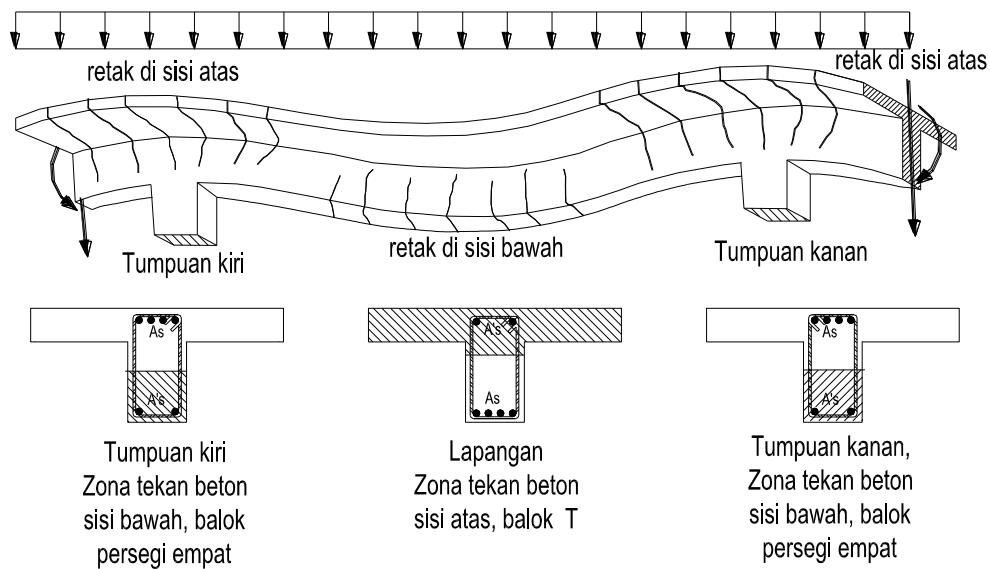
Umumnya balok dicor dengan pelat secara *monolit* agar terjadi satu-satuhan antara pelat dan balok. Gambar 6.1 menunjukkan perilaku lenturan yang terjadi dengan *flens* pada balok T.



Gambar 6. 1 Lenturan balok dengan *flens*.

Selain dari sistem portal, analisis balok T juga dilakukan pada sistem balok pra-cetak penampang T yang menerima beban pelat. Elemen pelat dapat terletak bebas diatas balok, seperti pelat lantai kendaraan pada jembatan. Analisis dan perencanaan balok T yang merupakan kesatuan *monolit* dengan pelat lantai atau atap, didasarkan pada tanggap pelat dengan balok yang berinteraksi saat menahan momen lentur positif. Pelat akan berlaku sebagai lapis sayap tekan (*flens*) dan balok sebagai badan. Selain sebagai bagian dari balok, *flens* balok T juga harus direncanakan dan diperhitungkan tersendiri terhadap lenturan arah

melintang, hal mana balok sebagai tumpuannya. Ini berarti pelat yang berfungsi sebagai *flens* berperilaku sebagai komponen struktur yang bekerja pada dua arah lenturan saling tegak lurus. Gambar 6.2 memperlihatkan balok T berdasarkan zona tekan beton.



Gambar 6. 2 Ketetapan analisis balok T berdasarkan zona tekan beton.

Lebar efektif *flens* (b_e) sesuai dengan SNI 03-2847-2002 Pasal 10.10 diambil sebagai nilai terkecil dari nilai-nilai berikut:

1. Untuk balok T :

Lebar efektif untuk lantai menerus Balok Tengah:

$$1. \quad b_E \leq b_w + \frac{L}{12}$$

$$b_E \leq b_w + 6t$$

$$2. \quad b_E \leq b_w + \frac{1}{2} * Ln$$

Balok Tepi:

$$b_E \leq \frac{1}{4} * L$$

$$b_E \leq b_w + 8t$$

$$b_E \leq Ln$$

Note:

Dari persamaan diatas diambil nilai terkecil.

Lebar efektif untuk lantai tidak menerus (balok berdiri sendiri)

$$b_E \leq 4 * b_w$$

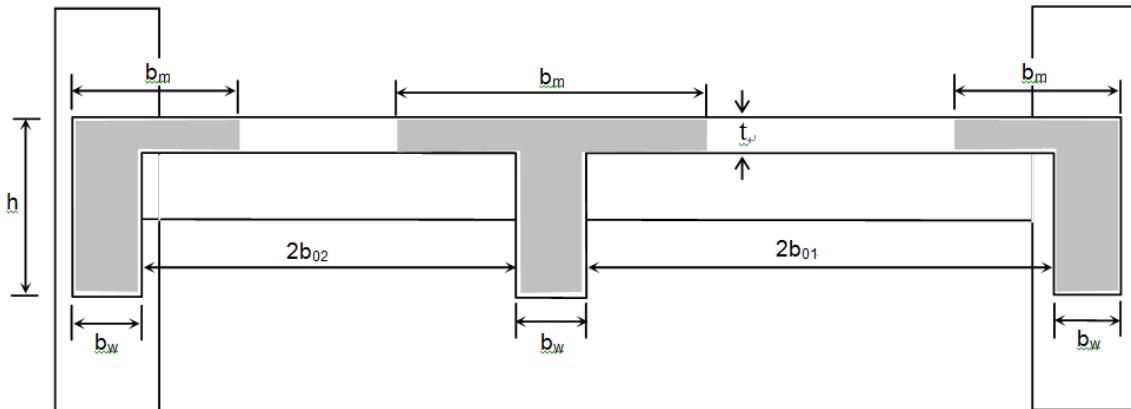
$$t \leq 0,5 * b_w$$

dengan t = tebal pelat

2. Untuk balok L : balok yang mempunyai *flens* hanya disatu sisi balok

$$b_e < b_w + b_3$$

dengan $b_3 = 1/12 L$ atau $6t_1$ atau $\frac{1}{2} L_1$



Gambar 6. 3 Lebar efektif *flens*.

6.4 Analisis Balok T

Sebuah balok dianggap sebagai balok T jika seluruh daerah *flens* mengalami tekan. Kemungkinan letak garis netral jika sebuah balok T menahan lentur Perencanaan/ Perhitungan Balok "T" dapat dibagi menjadi 2 macam:

1. Garis netral jatuh di sayap (*flens*)

Balok T dengan garis netral jatuh di sayap akan terjadi jika nilai $c < h_f$, proses perhitungan sama dengan balok persegi panjang, dengan lebar balok (b_c) sehingga sering disebut Balok T palsu.

2. Garis netral jatuh di badan (*Web*)

Balok T dengan garis netral jatuh di badan akan terjadi jika nilai $c > h_f$, dan disebut sebagai "Balok T asli" proses perhitungan dimulai dengan menghitung luas transformasi sayap (A_f).

Perencanaan/ Perhitungan Penulangan Balok "T" dapat dibagi menjadi 2 macam:

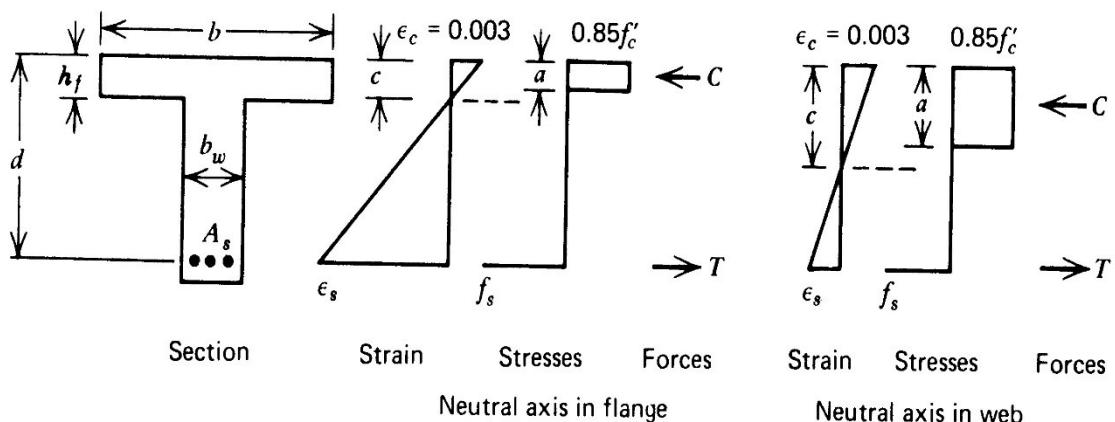
1. Balok "T" dengan tulangan tunggal

Balok T dengan tulangan tunggal yaitu Balok "T" hanya di pasang tulangan pada penampang tarik saja. Keaan ini terjadi jika faktor Momen Pikul ($K \leq K_{maks}$).

2. Balok "T" dengan tulangan Rangkap

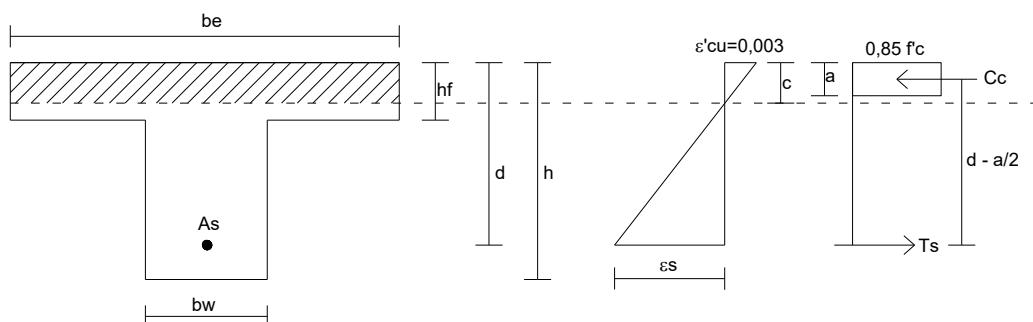
Balok T dengan tulangan rangkap yaitu Balok "T" di pasang tulangan pada penampang tarik dan tekan. Keaan ini terjadi jika faktor Momen Pikul ($K > K_{maks}$).

Gambar 6.4 memperlihatkan penampang dan diagram regangan dan tegangan balok T bertulangan tunggal, pada kondisi momen maksimum. Tinggi garis netral biasanya kecil, karena besarnya luas penampang flens, sehingga akan terjadi keruntuhan tarik ($f_s = f_y$). Pada kondisi ini dimana $a < h_f$, balok dapat dianalisis dengan analisis balok persegi dengan mengganti b (atau b_w) dengan b_e .



Gambar 6. 4 Penampang balok T bertulangan tunggal pada kondisi momen maksimum.

1. Garis netral jatuh dalam flens ($c \leq h_f$)



Gambar 6. 5 Garis netral jatuh di sayap (flens).

Keseimbangan gaya-gaya horisontal:

$$C_c = T_s$$

$$0,85 f'_c a b_e = A_s f_y$$

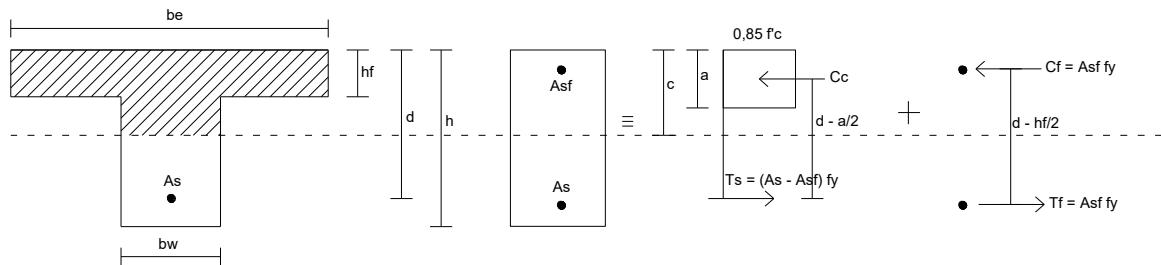
$$\text{Dimana } a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b_e}$$

$$\text{Momen nominal } M_n = A_s f_y (d - a/2)$$

2. Garis netral jatuh dalam badan ($c > h_f$)

Dalam kondisi ini bisa terjadi 2 (dua) kemungkinan yaitu :

- $c > h_f$ tetapi $a \leq h_f$: balok dianalisis dengan analisis balok persegi (sama seperti kasus 1).
- c dan $a > h_f$: balok dianalisis dengan analisis balok T.



Gambar 6. 6 Garis netral jatuh di badan (web).

Analisis balok T dapat diidentikan dengan analisis balok persegi dengan tulangan rangkap. Adanya *fleks* disisi kiri dan kanan badan balok yang mengalami tekan dapat dianalogikan adanya tulangan tekan imajiner seluas A_{sf} yang kapasitas gayanya ekivalen dengan kapasitas gaya *fleks* disisi kiri dan kanan balok (C_f).

Komponen gaya tekan: $c_f = 0,85 f'_c (b_e - b_w) h_f$

6.5 Faktor Momen Pikul “K”

Tulangan Longitudinal balok “T” dengan tulangan tunggal di hitung dengan:

1. Faktor Momen Pikul “K” dengan syarat: $K \leq K_{maks}$

$$K = \frac{Mu}{b_e * \phi * d^2}$$

$$K = \frac{382,5 * \beta_1 * (600 + f_y - 225 * \beta_1) * f'_c}{(600 + f_y)^2}$$

Jika $K > K_{maks}$, maka dihitung dengan menggunakan tulangan rangkap.

Dihitung tinggi blok tegangan beton tekan ekuivalen “a”:

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * K}{0,85 * f'_c}} \right\} * d$$

Jika $a < h_f$: Maka beton Tekan berada di sayap (Balok T palsu), dihitung sebagai balok persegi panjang dengan lebar balok = b_e . Jika $a > h_f$: Maka beton Tekan berada di sayap (Balok T asli), dihitung sebagai balok T, pertama dihitung nilai dari Luas sayap (A_f)

2. Untuk nilai $a < h_f$ dapat dihitung dengan:

- Luas tulangan perlu (A_s , u) dengan memilih nilai yang besar dari A_s atau A_{sf} , min pada persamaan berikut:

$$A_s = \frac{0,85 * f'_c * b_e * a}{f_y}$$

$$\text{Sni 2002: } f'_c \leq 31,36 \text{ Mpa} \quad ; A_s, \text{ min} = \frac{1,4 * b_e * d}{f_y}$$

$$\text{Sni 2002: } f'c > 31,36 \text{ MPa} ; \text{ As, min} = \frac{\sqrt{f'c}}{4 * f_y} * b_e * d$$

b. Dilanjutkan ke langkah 5

3. Untuk nilai $a > hf$ dapat di hitung dengan:

- a. Luas transformasi sayap Af dan momen nominal sayap Mnf:

$$Af = \frac{0,85 * f'_c * hf * (be - b)}{f_y}$$

$$Mnf = Af * f_y * \left(d - \frac{hf}{2}\right)$$

- b. Dihitung momen nominal badan Mnw dan faktor momen pikul Kw

$$Mnw = \left(\frac{Mu}{\Phi}\right) - Mnf$$

$$Kw = \left(\frac{Mnw}{b * d^2}\right)$$

Syarat $Kw \leq Kmax$

Jika $Kw > Kmax$, maka di hitung dengan tulangan rangkap.

- c. Di hitung tinggi blok beton tekan persegi ekuivalen (a) dan Luas tulangan A1:

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * Kw}{0,85 * f'_c}} \right\} * d$$

$$A1 = \frac{0,85 * f'_c * b * a}{f_y}$$

- d. Dihitung Luas tulangan perlu (As, u) dengan memilih yang besar dari nilai As, atau $As_{minimum}$ pada persamaan berikut:

$$A_s = A_1 + A_f$$

$$\text{Sni 2002: } f'c \leq 31,36 \text{ MPa} ; \text{ As, min} = \frac{1,4 * b_e * d}{f_y}$$

$$\text{Sni 2002: } f'c > 31,36 \text{ MPa} ; \text{ As, min} = \frac{\sqrt{f'c}}{4 * f_y} * b_e * d$$

Dilanjutkan ke langkah e.

- e. Dihitung Jumlah tulangan n berdiameter X:

$$n = \frac{As, u}{\frac{1}{4} * \pi * X^2}$$

Tulangan Tekan $As' = 2 * D * X$ (ditambahkan)

6.6 Perencanaan Balok "T" untuk Tulangan Tunggal

Tulangan Longitudinal balok "T" dengan tulangan tunggal di hitung dengan:

- Dihitung tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen a:

$$a_1 = \frac{(A_s - A_{s'}) * f_y}{0,85 * f_{c'} * b_e}$$

Jika $a_1 < h_f$: Maka beton Tekan berada di sayap (**Balok T palsu**), dihitung sebagai balok persegi panjang dengan lebar balok = b_e

Jika $a_1 > h_f$: Maka beton Tekan berada di sayap (**Balok T asli**), dihitung sebagai balok T, pertama di hitung nilai dari Luas sayap (A_f)

- Untuk nilai $a_1 < h_f$, maka rasio tulangan di hitung dengan:

a. Dikontrol rasio tulangan $\rho_1 \leq \rho_{max}$

$$\rho_1 = \frac{(A_s - A_{s'})}{b_e * d}$$

$$\rho_{max} = 0,75 * \rho_b = \frac{382,5 * \beta_1 * f'_c}{(600 + f_y) * f_y} * 100\%$$

Jika $\rho_1 > \rho_{max}$, Maka ukuran balok kurang besar

b. Dihitung nilai batas tulangan tekan leleh ($a_{maks,leleh}$):

$$a_{maks,leleh} = \frac{(600 * \beta_1 * d_d)}{600 - f_y}$$

d_d : Jarak antara titik berat tulangan tarik paling dalam dan tepi serat beton tekan.

Jika $a > a_{maks,leleh}$ maka ukuran balok kurang besar

c. Dihitung Momen Nominal (M_n) dan Momen rencana (M_r):

$$M_n = A_s * f_y * (d - \frac{a}{2})$$

$$M_r = \phi * M_n \text{ dengan nilai } \phi = 0,8$$

- Untuk nilai $a > h_f$:

a. Luas transformasi sayap A_f dan momen nominalnya (M_{nf}):

$$A_f = \frac{0,85 * f_{c'} * h_f * (b_e - b)}{f_y}$$

$$M_{nf} = A_f * f_y * (d - \frac{h_f}{2})$$

b. Dikontrol rasio tulangan $\rho_1 \leq \rho_{max}$

$$\rho_1 = \frac{(A_s - Af)}{b * d}$$

$$\rho_{\max} = 0,75 * \rho_b = \frac{382,5 * \beta_1 * f'_c}{(600 + f_y) * f_y} * 100\%$$

Jika $\rho_1 > \rho_{\max}$, Maka ukuran balok kurang besar

- c. Dihitung tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen a dengan syarat: $a \leq a_{maks,leleh}$

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

$$a_{maks,leleh} = \frac{(600 * \beta_1 * d_d)}{600 + f_y}$$

Jika $a > a_{maks,leleh}$ maka ukuran balok kurang besar

- d. Dihitung nilai dari Momen nominal (Mn) dan Momen rencana (Mr):

- $M_{nw} = 0,85 * f'_c * a * b * (d - \frac{a}{2})$
- $M_{nf} = Af * f_y * (d - \frac{h_f}{2})$
- $M_{ntotal} = M_{nw} + M_{nf}$
- $Mr = \phi * Mn$ dengan nilai $\phi = 0,8$

Contoh Soal 1:

Hitunglah besarnya kapasitas momen maksimum dari penampang balok T, dengan $b = 810$ mm, $bw = 200$ mm, $d = 310$ mm, $A_s = 1935$ mm², $E_s = 200.000$ MPa, $f_y = 400$ MPa dan $f'_c = 21$ MPa, jika : 1). $hf = 100$ mm

Solusi :

Tebal flens, $h_f = 100$ mm

Asumsi baja tulangan tarik sudah leleh, $f_s = f_y$ dan garis netral berada pada flens.

Tinggi blok tegangan :

$$a = \frac{A_s * f_y}{0,85 * f'_c * b} = \frac{1935 * 400}{0,85 * 21 * 810} = 53,53 \text{ mm}$$

$c = a/b_1 = 53,53/0,85 = 62,98$ mm < $h_f = 100$ mm: Garis netral berada di flens. ok!

Perhitungannya adalah balok persegi biasa dengan lebar "b", Kapasitas momen penampang

$$\begin{aligned} M_n &= A_s * f_y * (d - 0,5 * a) \\ &= 1935 * 400 * (310 - 0,5 * 53,53) = 219,22 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Check tulangan tarik sudah leleh atau belum:

$$\varepsilon_s = 0,003 \cdot \frac{d - c}{c} = 0,003 \cdot \frac{310 - 62,98}{62,98} = 0,01177$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200.000} = 0,002$$

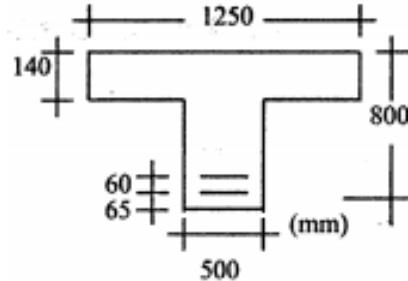
$\varepsilon_s > \varepsilon_y$ tulangan tarik sudah leleh.

Contoh Soal 2:

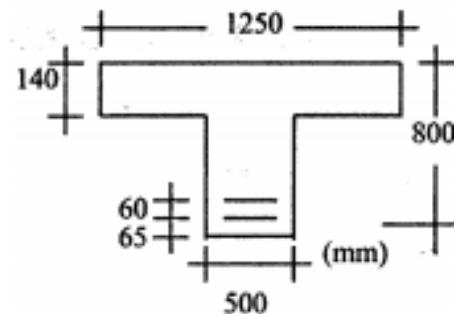
Diketahui:

Balok dengan ukuran seperti pada gambar di samping, dari mutu bahan $f'c = 20$ MPa, $f_y = 390$ MPa, serta tersedia tulangan D-29, mendukung Momen Mu⁽⁺⁾ = 1500 kN-m
Soal:

- Hitung dan gambarkan tulangan memanjang
- Hitung Momen rencana (Mr) balok.



Penyelesaian:



a. Perencanaan Tulangan Memanjang

Lebar efektif balok T:

$$b_e = 1250 \text{ mm (diketahui)}$$

$$b_e \leq (4 \cdot b = 4 \cdot 500 = 2000 \text{ mm})$$

$$b_e \leq (8 \cdot h_f = 8 \cdot 140 = 1120 \text{ mm})$$

Digunakan yang terkecil, yaitu $b_e = 1120 \text{ mm}$.

Jarak bersih antar tulangan: $S_n = 40 \text{ mm} (> D = 29 \text{ mm})$

Jumlah tulangan maksimal pada 1 baris:

$$m = \frac{b-2 \cdot d_{s1}}{D+S_n} + 1 = \frac{500-2 \cdot 65}{29+40} + 1 = 6,36 ; \text{ Maksimal 6 batang.}$$

Diperkirakan 2 baris tulangan, jadi $d_s = 65 + \frac{60}{2} = 95 \text{ mm}$; $d = 800 - 95 = 705 \text{ mm}$

$$K_{\max} = \frac{382,5 * \beta_1 * (600 + f_y - 225 * \beta_1) * f'_c}{(600 + f_y)^2} = \frac{382,5 * 0,85 * (600 + 390 - 225 * 0,85) * 20}{(600 + 390)^2} = 5,2993 \text{ MPa}$$

$$K = \frac{Mu}{be * \phi * d^2} = \frac{1500 \cdot 10^6}{1120 * 0,85 * 705^2} = 3,3683 \text{ MPa} < (K_{\max} 5,2993 \text{ MPa})$$

Karena $K < K_{\max}$, maka dihitung dengan tulangan tunggal:

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * K}{0,85 * f'_c}} \right\} * d = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 3,3683}{0,85 * 20}} \right\} * 705 = 157,215 \text{ mm} > h_f = 140 \text{ mm}$$

Karena $a > h_f$, maka garis netral jatuh di badan, jadi dihitung sebagai balok T asli:

$$Af = \frac{0,85 * f'_c * h_f * (be - b)}{f_y} = \frac{0,85 * 20 * 140 * (1120 - 500)}{390} = 3783,590 \text{ mm}^2$$

$$M_{nf} = Af * f_y * \left(d - \frac{h_f}{2} \right) = 3783,590 * 390 * \left(705 - \frac{140}{2} \right) = 937006063,5 \text{ N-mm}$$

$$M_{nw} = \left(\frac{Mu}{\phi} \right) - M_{nf} = \left(\frac{1500 \cdot 10^6}{0,8} \right) - 937006063,5 = 9379963936,5 \text{ N-mm}$$

$$K_w = \left(\frac{M_{nw}}{b * d^2} \right) = \left(\frac{9379963936,5}{500 * 705^2} \right) = 3,7744 \text{ MPa} < K_{\max}$$

Karena $K_w < K_{\max}$, maka dihitung sebagai balok T dengan tulangan Tunggal:

Dihitung tinggi blok beton tekan persegi ekuivalen a dan luas tulangan A_1 :

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * K}{0,85 * f'_c}} \right\} * d = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 3,7744}{0,85 * 20}} \right\} * 705 = 179,336 \text{ mm}$$

$$A_1 = \frac{0,85 * f'_c * b * a}{f_y} = \frac{0,85 * 20 * 500 * 179,336}{390} = 3908,605 \text{ mm}^2$$

$$A_s = A_1 + Af = 3908,605 \text{ mm}^2 + 3783,590 \text{ mm}^2 = 7692,195 \text{ mm}^2$$

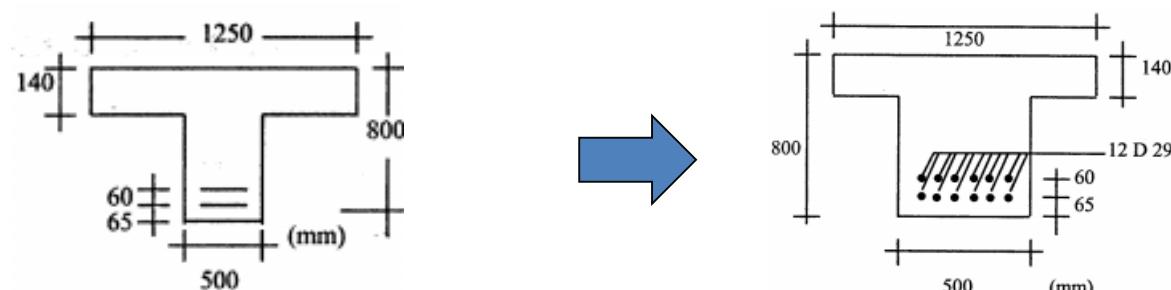
$$A_{s,\min} = \frac{1,4 * be * d}{f_y} = \frac{1,4 * 1120 * 705}{390} = 2834,462 \text{ mm}^2$$

Dari hasil perhitungan nilai dari A_s dan $A_{s,\min}$, digunakan nilai yang paling besar:

$$A_{s,u} = 7692,195 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Tulangan (n)} &= \frac{A_{s,u}}{\frac{1}{4} * \pi * X^2} \\ &= \frac{7692,195}{\frac{1}{4} * \pi * 29^2} = 11,65 \quad \rightarrow \text{Dipakai 12 batang} \end{aligned}$$

Digunakan tulangan tarik $A_s = 12 * D - 29 = 7926,238 \text{ mm}^2 \geq A_{s,u}$



Menghitung Momen Rencana:

$$As = 12D-29 = 12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 29^2\right) = 7926,238 \text{ mm}^2$$

$$d_s = 65 + \frac{60}{2} = 95 \text{ mm}$$

$$d_s = 800 - 95 = 705 \text{ mm}$$

$$a = \frac{(As * f_y)}{0,85 * f_{c'} * b_e} = \frac{7926,238 \text{ mm}^2 * 390}{0,85 * 20 * 1120} = 162,355 \text{ mm} > h_f = 140 \text{ mm}$$

Karena $a > h_f$, maka garis netral jatuh di badan, di hitung sebagai **balok T asli**:

$$Af = \frac{0,85 * f_c * h_f * (b-e-b)}{f_y} = \frac{0,85 * 20 * 140 * (1120-500)}{390} = 3783,590 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \rho_{max} &= 0,75 * \rho_b = \frac{382,5 * \beta_1 * f'_c}{(600+f_y)*f_y} * 100\% \\ &= \frac{382,5 * 0,85 * 20}{(600+390)*390} * 100\% = 1,684 \% \end{aligned}$$

$$\rho_1 = \frac{(As - Af)}{b * d} = \frac{(7926,238 - 3783,59)}{500 * 705} = 1,175\% < (\rho_{max} = 1,684 \%) \text{ OK}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{(As - Af) * f_y}{0,85 * f_{c'} * b} \\ &= \frac{(7926,238 - 3783,59) * 390}{0,85 * 20 * 500} = 190,074 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{maks,leleh} &= \frac{(600 * \beta_1 * d_d)}{600 + f_y} \\ &= \frac{(600 * 0,85 * (800-65-60))}{600 + 390} = 347,727 \text{ mm} \end{aligned}$$

karena $a < a_{maks,leleh}$ maka tulangan tarik sudah leleh

$$M_{nf} = Af * f_y * \left(d - \frac{h_f}{2}\right) = 3783,59 * 390 * \left(705 - \frac{140}{2}\right) = 936918890,7 \text{ N-mm}$$

$$M_{nw} = 0,85 * f'_c * a * b * \left(d - \frac{a}{2}\right) = 0,85 * 20 * 190,074 * 500 * \left(705 - \frac{190,074}{2}\right) = 985473911,7 \text{ N-mm}$$

$$M_{ntotal} = M_{nf} + M_{nw} = 19223392802,4 \text{ N-mm} = 1922,393 \text{ kN-m}$$

$$M_r = \Phi * M_n = 0,8 * 1922,393 \text{ kN-m} = 1537,914 \text{ kN-m} > M_u = 1500 \text{ kN-m (OK).}$$

6.7 Kegiatan Pembelajaran: Analisa Penampang Balok T dengan Tulangan Rangkap

1. Kemampuan akhir

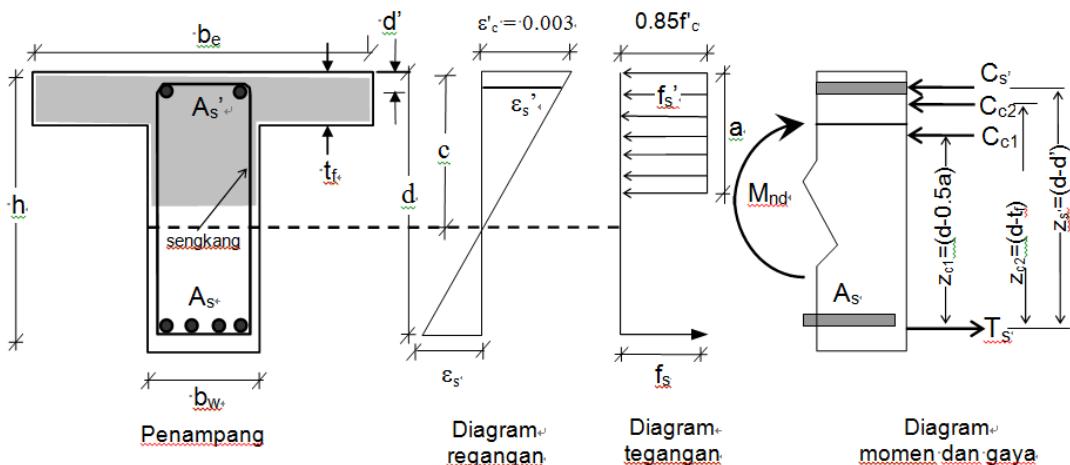
Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari analisa penampang balok T dengan tulangan rangkap adalah mampu menjelaskan tipe balok T bertulangan rangkap, mendesain/ menghitung dan merencanakan penulangan balok T bertulangan rangkap sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan tipe balok T bertulangan rangkap, analisa dan perencanaan balok T bertulangan rangkap.

2.1 Balok T dengan Tulangan Rangkap

Serupa dengan penampang balok persegi empat, pemasangan tulangan tekan pada penampang balok T adalah mengurangi lendutan balok akibat penyusutan dan rangkap bahan, disamping meningkatkan kapasitas penampang. Pada penampang yang menerima momen nominal rencana positif $M_{nd}^{(+)}$, tulangan tekan ditempatkan pada sisi atas, sedangkan bagi momen nominal rencana negatif (tumpuan) $M_{nd}^{(-)}$, penempatan tulangan tekan disisi bawah. Tulangan tekan tidak sama untuk momen lentur lapangan dengan momen negatif tumpuan. Gambar 6.7 menjelaskan dimensi, parameter, diagram regangan, tegangan dan gaya dalam penampang dengan tulangan rangkap. Jika rasio tulangan tekan $\rho' = \frac{A'_s}{bd}$ dan rasio tulangan tarik $\rho = \frac{A_s}{bd}$, akan dibahas beberapa kondisi dalam desain dan pemeriksaan penampang tulangan rangkap.



Gambar 6. 7 Diagram regangan, tegangan dan gaya balok T tulangan rangkap.

Analisis penampang kondisi seimbang (*balance*), dari diagram momen dan gaya (Gambar 6.7):

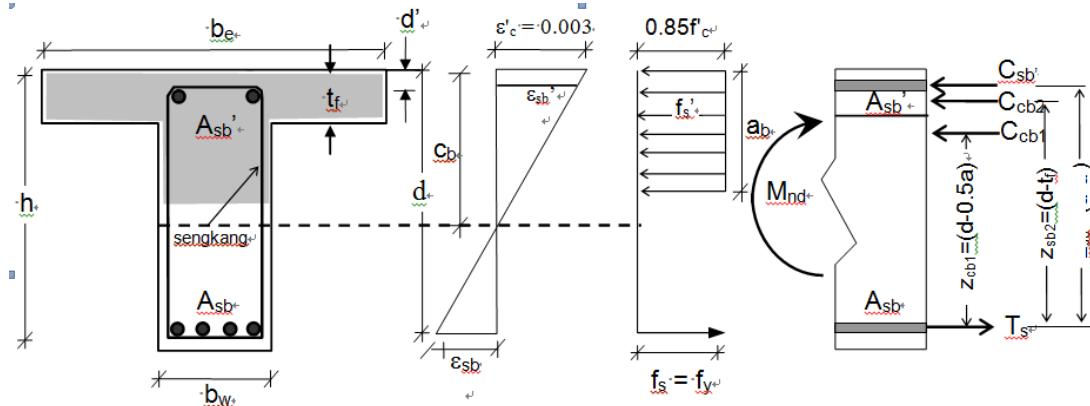
$$\begin{aligned} C_{sb'} &= A'_{sb} f'_s \\ C_{cb1} &= 0.85 f'_c [\beta_1 b_w c_b - A'_{sb}] \\ C_{cb2} &= 0.85 f'_c [\beta_1 (b_m - b_w) t_f]; \quad T_{ab} = A_{sb} f_y \end{aligned} \quad 1)$$

Dengan $\rho_b = \frac{A_{sb}}{bd}$, maka :

$$\begin{aligned} C_{sb'} &= A'_{sb} f'_s = \rho_b f'_s bd; \\ C_{cb1} &= 0.85 f'_c [\beta_1 b_w c_b - A'_{sb}] = 0.85 f'_c bd \left(\beta_1 \frac{b_w c_b}{bd} - \rho_b \right); \end{aligned} \quad 2)$$

$$C_{cb2} = 0.85 f'_c [\beta_1 (b_m - b_w) t_f] = 0.85 f'_c bd \left[\beta_1 \frac{((b_m - b_w) t_f)}{bd} \right]; \quad 3)$$

$$T_{ab} = \rho_b f_y bd$$



Gambar 6. 8 Diagram regangan, tegangan dan gaya balok T tulangan rangkap kondisi seimbang.

Dua kemungkinan tegangan yang terjadi pada tulangan tekan berdasarkan regangan

$$\varepsilon'_s = \frac{c_b - d'}{c_b} (0.003) :$$

$$a. \quad f'_s = f_y, \text{ jika } \varepsilon'_s \geq \varepsilon_y$$

$$b. \quad f'_s = E_s \varepsilon'_s, \text{ jika } \varepsilon'_s \leq \varepsilon_y$$

Dari keseimbangan gaya: $C_{sb} + C_{cb1} + C_{cb2} = T_{ab}$:

$$\rho_b' f'_s bd + 0.85 f'_c bd \left(\beta_1 \frac{b_w c_b}{bd} - \rho_b' \right) + 0.85 f'_c bd \left[\beta_1 \frac{((b_m - b_w) t_f)}{bd} \right] = \rho_b f_y bd \quad 4)$$

$$\rho_b = \rho_b' \frac{f'_s}{f_y} + m \left(\beta_1 \frac{b_w c_b}{bd} - \rho_b' \right) + m \left[\beta_1 \frac{((b_m - b_w) t_f)}{bd} \right] \quad 5)$$

SNI 03-2847-2002 menetapkan rasio tulangan ρ_{rencana} dengan pemasangan tulangan tekan

tidak boleh melampaui nilai maksimum $\rho = \frac{3}{4} \bar{\rho}_b + \rho_b' \frac{f'_s}{f_y}$ dimana:

$$\bar{\rho}_b = m \left(\beta_1 \frac{b_w c_b}{bd} - \rho_b' \right) + m \left[\beta_1 \frac{((b_m - b_w) t_f)}{bd} \right] \quad 6)$$

6.8 Prosedur desain balok T dengan tulangan rangkap

Merencanakan jumlah tulangan rangkap untuk momen nominal rencana M_{nd} dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

- Menetapkan nilai $M_n = \frac{M_u}{\phi}$
- Menetapkan rasio tulangan tekan terhadap tulangan utama (tarik) : $A_s' = \alpha A_s$; $0 < \alpha \leq 1$.
- Menghitung luas tulangan kritis $A_{s*} = 0.85 f_c' b_w t_f$. Periksa apakah $M_n < (A_s * f_y)' * (d - 0.5t_f) + (\alpha A_s * f_y)' * (d - d')$. Jika ya, analisis serupa dengan balok persegi dengan $b = b_m$.
- Dengan $M_n >$, berdasarkan kesetimbangan gaya (Gambar 6.8):

$$C_{c1} + C_{c2} + C_{s'} = T_a$$

$$0.85f_c' [\beta_1 b_w c - A_s'] + 0.85f_c' [\beta_1 (b_m - b_w) t_f] + A_s' f_s' = A_s f_y$$

$$0.85f_c' [\beta_1 b_w c - \alpha A_s] + 0.85f_c' [\beta_1 (b_m - b_w) t_f] + \alpha A_s f_s' = A_s f_y$$

$$0.85f_c' \{b_w a + [\beta_1 (b_m - b_w) t_f]\} = A_s [f_y + \alpha (0.85f_c' - f_s')]$$

$$A_s = \frac{0.85 \{b_w a + [\beta_1 (b_m - b_w) t_f]\}}{f_y + \alpha (0.85f_c' - f_s')} \quad 7)$$

Dari kesetimbangan momen:

$$C_{c1} z_{c1} + C_{c2} z_{c2} + C_{s'} z_{s'} = M_{nd}$$

$$0.85f_c' [\beta_1 b_w c - A_s'] * (d - 0.5a) + 0.85f_c' [\beta_1 (b_m - b_w) t_f] * (d - t_f) + A_s' f_s' * (d - d') = M_{nd} \quad 8)$$

Untuk mendapatkan nilai A_s , ditetapkan secara uji-coba terlebih dahulu a . Harga a berkisar antara $d' \leq a \leq a_b$. Nilai a memberikan harga $c = a/\beta_1$, sehingga regangan tulangan tekan

$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c} (0.003)$ diketahui. Apabila $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$, tegangan tekan baja $f_s' = E_s \varepsilon_s'$, sedangkan jika

$$\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y, f_s' = f_y$$

- Nilai a, f_y, f_c' , dan f_s' dimasukkan ke persamaan untuk mendapatkan A_s . Harga A_s , a , f_c' , dan f_s' kemudian disubsitusikan kedalam persamaan (7). Apabila nilai persamaan sebelah kiri tanda sama dengan, cocok dengan nilai M_n , berarti tulangan A_s merupakan desain kebutuhan tulangan tarik pada penampang. Bila tidak sama, proses uji-coba diulangi dengan menetapkan nilai a baru sampai terpenuhinya persamaan (8).
- Tulangan perlu A_s diperiksa terhadap batasan tulangan maksimum menurut (7).

Contoh Soal 1.

$$b_m = 900 \text{ mm}$$

$$t_f = 120 \text{ mm}$$

$$h = 650 \text{ mm}$$

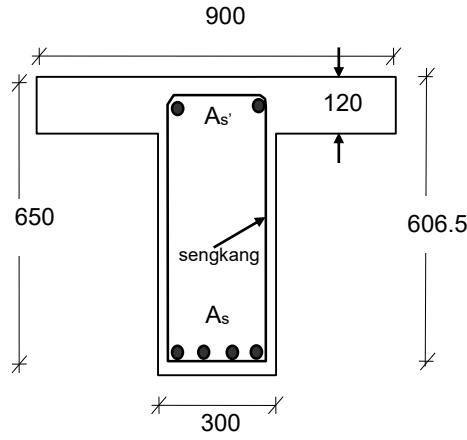
$$b_w = 300 \text{ mm}$$

$$f'_c = 22.5 \text{ MPa}$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'_c}$$

$$= \frac{360 \text{ MPa}}{0,85 \times 22,5 \text{ MPa}} = 18.82$$



$$\mathbf{Mud} = 115 \text{ kN-m}$$

Rencanakan tulangan balok T dengan tulangan rangkap

Penyelesaian:

Data-data:

Penampang beton: Lebar badan $b_w = 300 \text{ mm}$; Tinggi balok $h = 650 \text{ mm}$;

Lebar $b_m = 900 \text{ mm}$; Tebal flens $t_f = 120 \text{ mm}$

$Mud = 115 \text{ kN-m}$; Diameter tulangan (ϕ_{tul}) = 22 mm; $\phi_s = 10 \text{ mm}$; selimut beton = 22.5 mm;

$f'_c = 22.5 \text{ N/mm}^2$; $f_y = 360 \text{ N/mm}^2$

Rasio tulangan tekan = 0.2; Faktor reduksi $\phi = 0.8$

Perhitungan: Tinggi efektif penampang:

$$d = h - \text{selimut beton} - (\phi_s + 0.5 \times \phi_{\text{tul}}) \\ = 650 \text{ mm} - 22.5 \text{ mm} - 10 \text{ mm} - (0.5 \times 22 \text{ mm})$$

$$\mathbf{d = 606,50 \text{ mm}}$$

$$d' = \text{Selimut beton} + \phi_s + (0.5 \times \phi_{\text{tul}})$$

$$d' = 22.5 \text{ mm} + 10 \text{ mm} + (0.5 \times 22 \text{ mm})$$

$$\mathbf{d' = 43,50 \text{ mm}}$$

Momen retak:

$$M_r = 0.37 * b_w * d^2 * 0.3\sqrt{f'_c} = 58102806 \text{ N-mm}$$

Tulangan minimum:

$$A_{\min} = \left(0.85 * f'_c * \frac{b_w}{f_y} \right) * \left(d - \sqrt{d^2 - \frac{M_r}{0.425 f'_c * b_w}} \right) = 269.88 \text{ mm}^2$$

Tinggi garis netral pada kondisi berimbang :

$$c_b = \left[\frac{0.003}{\frac{0.003 + \frac{f_y}{200000}}{}} \right] * d = 379.06 \text{ mm}; a_b = 322.20 \text{ mm}$$

Regangan dan tegangan baja tulangan tekan:

$$\varepsilon_{s'} = \left[\frac{c_b - d'}{c_b} \right] * 0.003 = 0.0027; \varepsilon_y = 0.0018$$

$$f_{s'} = 360 \text{ N/mm}^2; \beta_1 = 0.85$$

Tulangan maximum:

$$A_{maks} = \frac{(0.85 * f'_c * \beta_1 * c_b * b_w) + 0.85 * f'_c * (b_m - b_w) * t_f}{f_y - 0.2 * f_{s'}}$$

$$A_{maks} = \frac{(0.85 * 22,5 * 0,85 * 379,06 * 300) + 0.85 * 22,5 * (900 - 300) * 120}{360 - 0.2 * 360} = 11200.14 \text{ mm}^2$$

$$M_{nmaks} = 0.2 A_{maks} * f_{s'} * (d - d') + (0.85 * f'_c * \beta_1 * c_b * b_w) * \left(d - \beta_1 * \frac{c_b}{2} \right) \\ + [0.85 * f'_c * (b_m - b_w) * t_f] * (d - 0.5 * t_f)$$

$$M_{nmaks} = 2029920949 \text{ N-mm}$$

Tulangan perlu:

$$M_{ud} = 115 \text{ kN-m}$$

$$M_{nd} = 1437500000 \text{ N-mm}$$

Coba-coba:

$$A = 122.00 \text{ mm}; c = 143.53 \text{ mm.}$$

$$\varepsilon_{s'} = 0.0021; \varepsilon_y = 0.0018$$

$$f_{s'} = 360 \text{ N/mm}^2$$

$$A_s = 7211.72 \text{ mm}^2$$

$$M_{nk} = 1437843319 \text{ N-mm} > 1437500000 \text{ N-mm (memenuhi)}$$

$$\text{Jumlah tulangan utama } A_s = 19 \text{ } \phi 22 \text{ mm} = 7222.52 \text{ mm}^2.$$

$$\text{Tulangan tekan } A_{s'} = 4 \text{ } \phi 22 \text{ mm} = 1444.50 \text{ mm}^2.$$

Pemeriksaan Kapasitas Penampang Balok T Tulangan Rangkap.

Data-data:

a. Penampang beton

$$\text{Lebar } b_w = 30 \text{ cm}$$

$$\text{Tinggi } h = 65 \text{ cm}$$

Lebar $b_m = 90$ cm

Tebal flens $t_f = 12$ cm

b. Penulangan

$A_s = 19 \odot 22 \text{ mm} = 72 \text{ cm}^2; A_{s'} = 4 \odot 22 \text{ mm} = 15 \text{ cm}^2;$

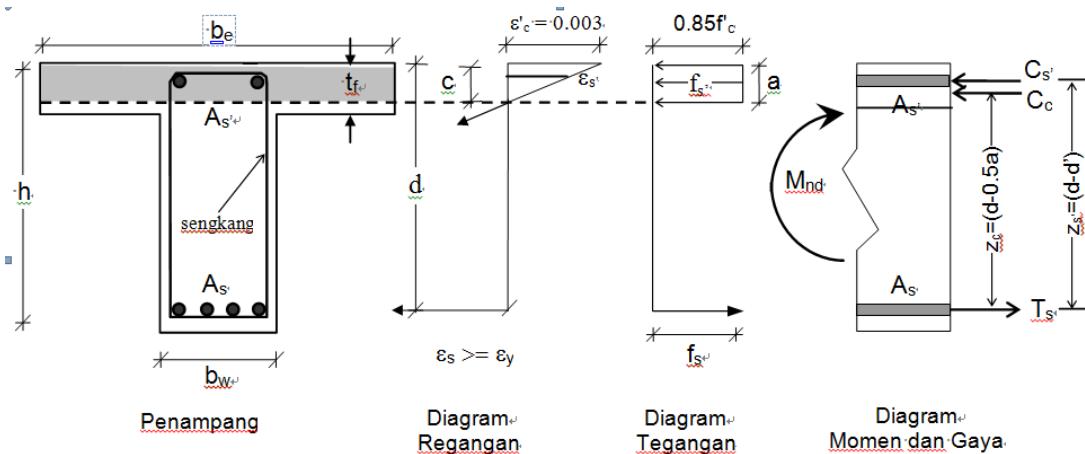
\odot sengkang = 10 mm,

selimut beton = 2.25 cm;

$f'_c = 225 \text{ kg/cm}^2; f_y = 3600 \text{ kg/cm}^2;$

Rasio tulangan tekan = 0.2;

Faktor reduksi = 0.8; $\beta_1 = 0.85;$



Gambar 6. 9 Penampang balok T dan diagram tegangan-regangan.

Pemeriksaan tipe balok:

Tinggi efektif penampang $d = 60.65$ cm

$d' = 4.35$ cm; $T_a = 260$ ton; $\epsilon_{s'} = 0.0021$; $\epsilon_y = 0.0017$; $f_{s'} = 3600 \text{ kg/cm}^2$

$$C_c + A_{s'} * f_y = 261 \text{ ton}$$

$$a_b = 38.60 \text{ cm}$$

$T_a < C_{c2}$: Analisis balok persegi empat ekivalen

$$a = 11.90 < a_b; x = 14.00 \text{ cm}$$

$$\epsilon_{s'} = 0.0021; \epsilon_y = 0.0017$$

$$f'_s = 3600 \text{ kg/cm}^2$$

$$(C_c + A_{s'} * f'_s) = 260 = T_a = 260 \text{ ton}$$

$$z_c = 54.70 \text{ cm}; z_{s'} = 56.30 \text{ cm.}$$

$$M_{nk} = 142.86 \text{ ton-m} = 1428.59 \text{ kN-m}; M_{uk} = 114.29 \text{ ton-m} = 1142.88 \text{ kN-m.}$$

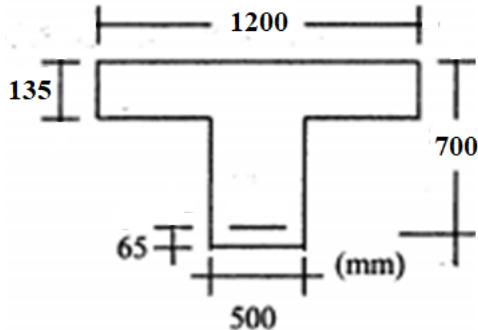
6.9 Latihan

1. Balok dengan ukuran seperti pada gambar di bawah ini, dari mutu bahan $f'c = 25 \text{ MPa}$, $f_y = 350 \text{ MPa}$, serta tersedia tulangan D-22, mendukung Momen $\text{Mu}^{(+)} = 1450 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Soal:

- a. Hitung dan gambarkan tulangan memanjang

- b. Hitung Momen rencana (M_r) balok.

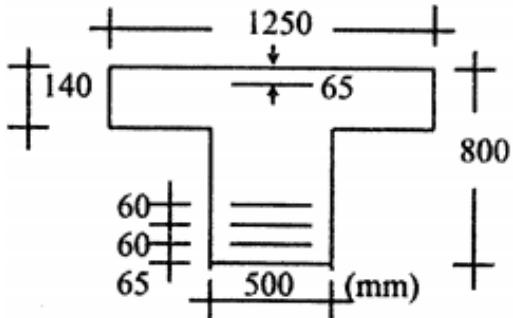


2. Balok dengan ukuran seperti pada gambar di samping, dari mutu bahan $f'c = 15 \text{ MPa}$, $f_y = 300 \text{ MPa}$, serta tersedia tulangan D-29, Balok tersebut menahan Momen $\text{Mu}^{(+)} = 1380 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Soal:

- a. Hitung dan gambarkan tulangan memanjang

- b. Hitung Momen tersedia pada balok tersebut



BAB 7

ANALISIS DAN DESAIN TULANGAN TORSI BALOK

7.1 Pendahuluan

Pada pembelajaran analisis dan desain tulangan torsi balok akan dipelajari bagaimana merencanakan/ mendesain tulangan horisontal dan tulangan sengkang (*stirrups*) pada balok beton bertulangan tunggal, rangkap dan balok T. Akibat torsi/ puntir yang terjadi pada struktur akan mengakibatkan struktur memerlukan tulangan horisontal dan tulangan geser untuk mampu menahan torsi/ puntir yang terjadi pada balok yang didesain dan direncanakan. Dengan pemasangan tulangan horisontal dan tulangan geser pada balok beton bertulang akan meminimalis keruntuhan maupun kegagalan yang terjadi pada balok yang direncanakan/ didesain, sehingga struktur yang direncanakan aman.

7.2 Kegiatan Pembelajaran: Analisis dan Desain Tulangan Torsi Balok

1. Kemampuan akhir

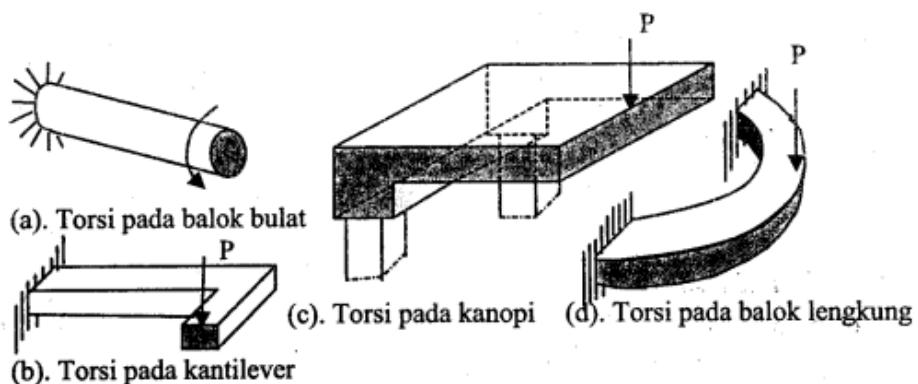
Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari analisis dan desain tulangan torsi balok adalah mampu menjelaskan torsi yang terjadi pada balok dan perencanaan penulangan balok akibat torsi yang terjadi sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan tipe torsi yang terjadi pada bangunan struktur dan analisa/ perencanaan penulangan balok akibat torsi yang terjadi.

7.3 Defenisi Torsi

Torsi (*twist*) atau momen puntir adalah momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal balok/ elemen struktur. Adanya beban eksentrik yang bekerja pada balok mengakibatkan terjadinya torsi.



Gambar 7. 1 Torsi pada beberapa bangunan akibat gaya aksial dan momen.

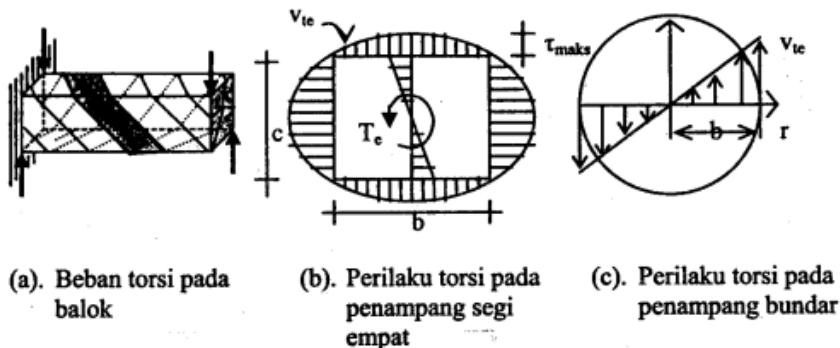
- Jenis Beban Torsi

Beban torsi dapat dapat dibedakan atas 2 jenis yaitu:

1. Torsi Keseimbangan adalah momen torsi yang timbul karena dibutuhkan untuk keseimbangan struktur.
2. Torsi Kompatibilitas adalah momen torsi yang timbul karena kompatibilitas deformasi antara elemen-elemen struktur yang bertemu pada sambungan.

7.4 Tegangan Geser akibat Torsi

Torsi yang terjadi pada penampang struktur dapat menimbulkan tegangan geser yang berlebihan dan menyebabkan keretakan pada penampang yang tidak diberi tulangan secara khusus. Tegangan geser yang terjadi akibat torsi pada penampang struktur diperlihatkan gambar di bawah ini.



Gambar 7. 2 Tegangan geser akibat torsi.

Perilaku elastik pada **penampang bundar** yang dibebani torsi, menimbulkan tegangan geser v_{te} yang dirumuskan sebagai berikut:

$$v_{te} = \frac{T_e \cdot r}{J}$$

Distribusi tegangan geser untuk penampang persegi dapat dihitung dengan:

$$\tau_{maks} = \frac{T_e}{\alpha \cdot b \cdot c^2}$$

Dimana:

$$J = \text{Momen Inersia Polar} (= \frac{\pi \cdot r^4}{2} \text{ untuk penampang bundar}), \text{ mm}^4$$

T_e = Momen Torsi elastik, Nmm.

7.5 Perilaku torsi sebelum terjadi retak

Retak torsi diagonal akan terjadi pada saat tegangan tarik utama mencapai kekuatan tarik beton (f_{cr}). Besarnya tegangan geser yang dapat menyebabkan retak diagonal (v_{cr}) pada beton adalah:

$$f_{cr} = v_{cr}; \quad \text{dan} \quad f_{cr} = 0,33 \times \sqrt{f'c}$$

Untuk **penampang pipa dinding tipis** tegangan geser torsi (v) dapat dihitung dengan:

$$v = \frac{T}{2 \cdot A_0 \cdot t}$$

Dengan:

v = Tegangan geser torsi, MPa

T = Momen torsi, Nmm.

A_0 = Luasan yang dibatasi oleh garis pusat (*centerline*) dinding pipa, mm²

t = Tebal dinding pipa, (mm)

Pasal 13.6.1 SNI 03-2847-2002 menyatakan, bahwa pengaruh punter (torsi) pada balok dapat diabaikan jika momen punter berfaktor T_u lebih kecil daripada 25% kali T_r dengan mempertimbangkan faktor reduksi kekuatan ϕ . Dengan demikian diperoleh persamaan berikut:

$$T_u \leq \frac{\phi \cdot \sqrt{f'_c}}{12} \cdot \left[\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right] \text{ dengan } \phi = 0,75 \text{ (untuk geser dan torsi)}$$

Dengan:

t_c = Tebal dinding pipa ekivalen, mm

$$t_c = \left[\frac{3 \cdot A_{cp}}{4 \cdot P_{cp}} \right]$$

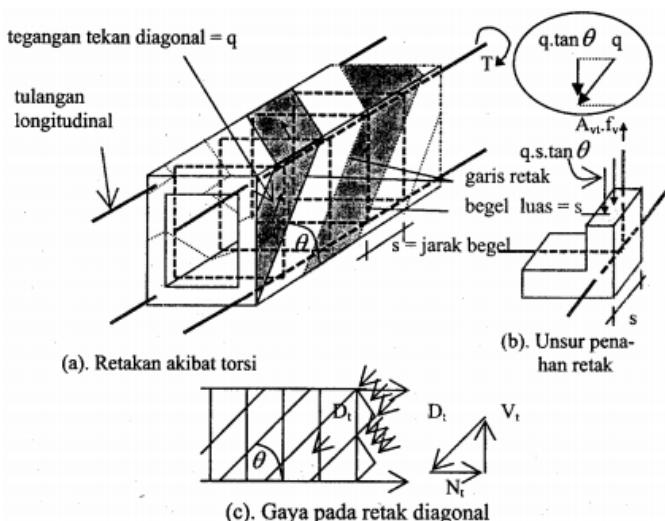
A_{cp} = Luasan yang dibatasi oleh tepi luar penampang, mm²

P_{cp} = Keliling penampang, mm

Setelah terjadi retak, torsi akan ditahan oleh tegangan tekan diagonal beton yang mengelilingi balok dengan sudut θ . Komponen tangensial dari tegangan ini merupakan aliran geser (*shear flow*) q , yang diperlukan untuk menahan/ menyeimbangi gaya torsi, diperoleh q dengan persamaan:

$$q = \frac{T}{2 \cdot A_0}$$

Keseimbangan gaya vertikal pada elemen (Gambar b), menghasilkan gaya tarik begel ($A_{vt} \cdot f_v$) dan gaya berat elemen ($q \cdot \tan\theta \cdot s$) sebagai berikut:



$$\begin{aligned} A_{vt} \cdot f_v &= q \cdot s \cdot \tan \theta \\ A_{vt} \cdot f_v &= \frac{T}{2 \cdot A_0} \cdot s \cdot \tan \theta \\ \frac{A_{vt} \cdot f_v}{s} &= \frac{T}{2 \cdot A_0} \cdot \tan \theta \end{aligned}$$

Gambar 7. 3 Retak Akibat Torsi Menurut Analogi Rangka Ruang.

Kebutuhan tulangan sengkang tambahan untuk torsi dapat di rumuskan dengan:

$$\frac{A_{vt}}{s} = \frac{T_n}{2 \cdot A_0 \cdot f_{yv} \cdot \cot\theta} ; A_0 = 0,85 \cdot A_{0h}$$

Dengan:

f_{yv} = tegangan leleh tulangan sengkang, MPa

θ = sudut retak = 45° untuk non prategang

Tulangan longitudinal tambahan yang di butuhkan untuk menahan torsi di hitung dengan rumus:

$$A_t = \frac{A_{vt}}{s} \cdot p_h \cdot \left(\frac{f_{yv}}{f_{yl}} \right) \cdot \cot^2 \theta$$

Dengan:

A_t = Luas Tulangan longitudinal torsi, mm^2

p_h = Keliling daerah yang dibatasi oleh sengkang tertutup, mm^2

f_{yl} = Tegangan leleh tulangan longitudinal, MPa

Beberapa pertimbangan yang perlu diperhatikan untuk torsi pada balok adalah sebagai berikut:

1. Tulangan yang dibutuhkan untuk torsi harus ditambahkan pada tulangan yang dibutuhkan untuk menahan momen lentur (tulangan longitudinal) dan untuk menahan geser (begel). Jadi tulangan torsi berupa tulangan longitudinal dan begel tertutup yang ditambahkan.
2. Pasal 13.6.1 SNI 03-2847-2002, pengaruh puntir dapat diabaikan jika momen puntir terfaktor Tu memenuhi syarat sebagai berikut:

$$T_u \leq \frac{\Phi \cdot \sqrt{f'_c}}{12} \cdot [\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}] \text{ dengan } \Phi = 0,75$$

A_{cp} = Luas penampang keseluruhan termasuk rongga pada penampang berrongga (daerah yang diarsir), mm^2

P_{cp} = Keliling penampang keseluruhan (keliling batas terluar daerah yang diarsir), mm

3. Kekuatan leleh tulangan torsi (f_y): f_y harus ≤ 400 MPa.
4. Dimensi penampang melintang harus memenuhi syarat sebagai berikut:
 - a. Penampang Solid:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \cdot d} \right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 \cdot A^2 \cdot 0h} \right)^2} \leq \Phi \cdot \left(\frac{V_c}{b \cdot d} \right) + \frac{2 \cdot \sqrt{f'_c}}{3}$$

- b. Penampang berongga:

$$\sqrt{\left(\frac{v_u}{b.d}\right)^2 + \left(\frac{T_{n,h}}{1,7 \cdot A^2 \cdot 0_h}\right)^2} \leq \phi \cdot \left(\frac{v_c}{b.d}\right) + \frac{2 \cdot \sqrt{f'_c}}{3}$$

5. Kebutuhan tulangan sengkang tambahan untuk torsi per- meter panjang balok ($s= 1000$ mm)

$$A_{vt} = \frac{T_n \cdot s}{2 \cdot A_0 \cdot f_{yv} \cdot \cot \theta} \text{ dengan } A_0 = 0,85 \cdot A_{0h}$$

Dengan:

$$A_{vt} = \text{Luas tulangan torsi (sengkang) per meter, mm}^2$$

$$S = \text{Bentang balok yang dipasang sengkang torsi} = 1000 \text{ mm.}$$

$$f_{yv} = \text{Tegangan leleh tulangan sengkang, MPa}$$

$$\theta = \text{Sudut retak} = 45^\circ \text{ untuk non-prategang}$$

6. Luas tulangan torsi total minimal:

- a. Pasal 13.6.1 SNI 03-2847-2002, luas total begel (untuk geser dan torsi) per meter panjang balok ($S= 1000$ mm):

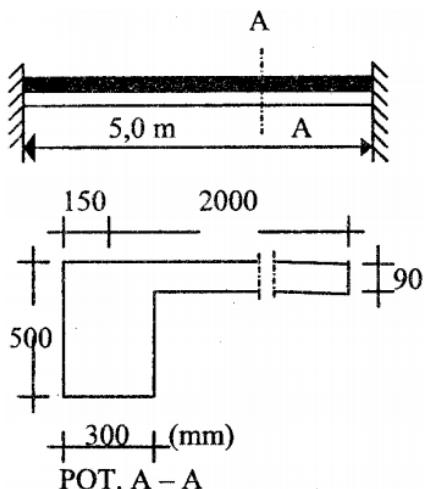
$$(A_{vs} + A_{st}) \geq \frac{75 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot S}{1200 \cdot f_{yv}} \text{ dan } (A_{vs} + A_{st}) \geq \frac{b \cdot S}{3 \cdot f_{yv}}$$

- b. Pasal 13.6.1 SNI 03-2847-2002, luas total tulangan longitudinal (untuk tulangan lentur dan torsi):

$$(A_t + A_{st}) \geq \left\{ \frac{5 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_{cp}}{12 \cdot f_{y1}} - \left(\frac{A_{vt}}{s} \right) \cdot ph \cdot \frac{f_{yv}}{f_{y1}} \right\} \text{ dan } \frac{A_{vt}}{s} \geq \frac{b}{6 \cdot f_{yv}}$$

Contoh Soal 1:

Diketahui Balok $(300/500)$ dengan bentang 5m. Mendukung pelat dengan tebal 90 mm, dengan panjang 2m. Beban hidup diatas pelat adalah 1kN/m^2 . Jika pada Momen balok diketahui:



$$- \quad \text{Ujung } M^{(+)} = \frac{1}{16} \cdot q \cdot L^2$$

$$- \quad \text{Lapangan } M^{(+)} = \frac{1}{11} \cdot q \cdot L^2$$

Tersedia tulangan yang digunakan adalah D-16, $\phi 8$ dan $\phi 6$. Mutu beton yang digunakan (f'_c) = 20 MPa, $f_y = 300$ MPa. Dengan kondisi struktur terlindung (tidak berhubungan dengan keadaan cuaca). Berat Beton $\gamma_c = 24$ kN/m³.

Tentukanlah:

1. Kontrol apakah dimensi penampang balok memenuhi persyaratan/ tidak terhadap beban puntir.
2. Hitung penulangan balok, baik tulangan lentur, geser maupun puntir.
3. Gambarkan penulangan lengkap dengan potongan penampang pada ujung dan lapangan balok.

Penyelesain:

$$d_s = 40 + 8 + 16/2 = 56 \text{ mm}, d = 500 - 56 = 444 \text{ mm}$$

Jumlah tulangan longitudinal maksimal perbaris:

$$m = \frac{b-2 \cdot d_{s1}}{D+Sn} + 1 = \frac{300-2 \cdot 56}{16+40} + 1 = 4,36 ; \text{ Maksimal } 4 \text{ batang.}$$

- **Momen Puntir (*torsi*) Balok:**

Momen puntir ini diakibatkan oleh beban yang bekerja diatas pelat. Besar momen puntir

$$Tu = \frac{1}{2} \cdot q_{upelat} \cdot a^2, \text{ dan ditahan oleh } 2 \text{ tumpuan jepit.}$$

Diambil bentang pelat 1m, maka diperoleh analisa perhitungan sebagai berikut:

- $q_D \text{ pelat} = 0,09 \text{ m} \cdot 5\text{m} \cdot 24 \text{ kN/m}^3 = 10,8 \text{ kN/m}$
- $q_L \text{ pelat} = 5,1 \text{ kN/m}$

$$\text{Maka: } q_u \text{ pelat} = 1,2DL + 1,6LL = 1,2(10,8 \text{ kN/m}) + 1,6(5,1 \text{ kN/m}) = 20,216 \text{ kN/m}$$

$$\text{Untuk } 2 \text{ Tumpuan, } Tu = \frac{1}{2} \cdot 20,216 \text{ kN/m} \cdot (2\text{m})^2 = 40,432 \text{ kN.m}$$

$$\text{Untuk } 1 \text{ Tumpuan, } Tu = \frac{40,432 \text{ kNm}}{2} = 20,216 \text{ kN.m}$$

- **Momen Lentur Balok:**

a. **Beban Mati:**

$$\text{Berat pelat } 90 \text{ mm} = 0,09 \cdot 2,15 \cdot 24 = 4,644 \text{ kN/m}$$

$$\text{Berat Balok } (300/500) = 0,3 \cdot (0,5-0,09) \cdot 24 = 2,952 \text{ kN/m}$$

+

$$q_D = 7,596 \text{ kN/m}$$

$$\text{Beban hidup per meter } q_L = 1 \cdot 2,15 = 2,15 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban perlu } q_u &= 1,2 q_D + 1,6 q_L = 1,2 (7,596 \text{ kN/m}) + 1,6 (2,15 \text{ kN/m}) \\ &= 12,555 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Momen Balok:

- Ujung M $(\cdot) = \frac{1}{16} \cdot q \cdot L^2 = \frac{1}{16} \cdot (12,555 \text{ kN/m}) \cdot 5^2 = 19,617 \text{ kN.m}$

- Lapangan $M^{(+)} = \frac{1}{11} \cdot q \cdot L^2 = \frac{1}{11} \cdot (12,555 \text{ kN/m}) \cdot 5^2 = 28,534 \text{ kN/m}$

b. **Gaya Lintang/ Gaya geser balok:**

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot q \cdot L^2 = \frac{1}{2} \cdot (12,555 \text{ kN/m}) \cdot 5^2 = 31,3875 \text{ kN} = 31387,5 \text{ N}$$

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{20} \cdot 300 \cdot 444 = 99281,418 \text{ N.}$$

1. **Kontrol Dimensi Balok terhadap Puntir:**

A_{0h} = Luas batas daerah begel terluar, dan p_h = Keliling batas begel terluar.

$$A_{0h} = (300 - 2 \cdot 40) \cdot (500 - 2 \cdot 40) = 92400 \text{ mm}^2.$$

$$p_h = 2 \cdot (300 - 2 \cdot 40) \cdot (500 - 2 \cdot 40) = 1280 \text{ mm}^2$$

Dimensi penampang melintang harus memenuhi syarat sebagai berikut:

a. **Penampang Solid:**

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot p_h}{1,7 \cdot A^2 \cdot 0h}\right)^2} \leq \phi \cdot \left(\frac{V_c}{b \cdot d}\right) + \frac{2 \cdot \sqrt{f'_c}}{3}$$

$$\sqrt{\left(\frac{31387,5}{300 \cdot 400}\right)^2 + \left(\frac{20,216 \cdot 10^6 \cdot 1280}{1,7 \cdot 92400^2}\right)^2} \leq 0,75 \cdot \left(\frac{99281,418 \text{ N}}{300 \cdot 444}\right) + \frac{2 \cdot \sqrt{20}}{3}$$

$1,798 \text{ MPa} \leq 2,795$ (Maka dimensi balok sudah memenuhi syarat)

b. **Penulangan Balok:**

1. **Tulangan Longitudinal Balok:**

Tulangan Ujung $M^{(+)}$ = 19,617 kN.m. Direncanakan 1 baris tulangan tarik.

$f'_c = 20 \text{ MPa}, f_y = 300 \text{ MPa}$, Maka $K_{\max} = 5,6897 \text{ MPa}$;

dan nilai dari $\rho_{\min} = 0,467\%$.

$$K = \frac{Mu}{b * \phi * d^2} = \frac{19,617 \cdot 10^6}{300 * 0,8 * 444^2} = 0,4146 \text{ MPa} < (K_{\max} 5,6897 \text{ MPa})$$

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * K}{0,85 * f'_c}} \right\} * d = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 0,4146}{0,85 * 20}} \right\} * 444 = 10,964 \text{ mm}$$

2. **Luas Tulangan Perlu (Asu):**

$$A_s = \frac{0,85 * f'_c * b * a}{f_y} = \frac{0,85 * 20 * 300 * 10,964}{300} = 186,388 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\min} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d = 0,467\% \cdot 300 \cdot 444 = 622,044 \text{ mm}^2$$

Digunakan Area tulangan yang paling besar = 622,044 mm²

Jumlah Tulangan (n):

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Tulangan (n)} &= \frac{As, u}{\frac{1}{4} * \pi * D^2} \\
 &= \frac{622,044 \text{ mm}^2}{\frac{1}{4} * \pi * 16^2} = 3,094 \quad \longrightarrow \quad \text{Dipakai 4 batang (4D-16)}
 \end{aligned}$$

Jadi digunakan tulangan tarik 4D-16 = 804,248 mm² > Asu (OK)

Tulangan tekan 2D-16 = 402,124 mm² (ditambahkan).

Tulangan Lapangan M⁽⁺⁾ = **28,534 kNm**. Direncanakan 1 baris tulangan tarik.

$$K = \frac{Mu}{b * \phi * d^2} = \frac{28,534 \cdot 10^6}{300 * 0,8 * 444^2} = 0,6031 \text{ MPa} < (K_{\text{maximum}} 5,6897 \text{ MPa})$$

$$a = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2*K}{0,85*f'c}} \right\} * d = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2*0,6031}{0,85*20}} \right\} * 444 = 16,041 \text{ mm}$$

Luas Tulangan perlu (As, u):

$$A_s = \frac{0,85 * f'c * b * a}{f_y} = \frac{0,85 * 20 * 300 * 16,041}{300} = 272,697 \text{ mm}^2$$

$$A_{s, \text{minimum}} = \rho_{\text{minimum}} \cdot b \cdot d = 0,467\% \cdot 300 \cdot 444 = 622,044 \text{ mm}^2$$

Dipilih Luas tulangan yang paling besar, jadi As, u = **622,044 mm²** (sama dengan tulangan Mu⁽⁺⁾). Dari hasil perhitungan yang sudah dilakukan maka dapat disimpulkan:

- Tulangan Tarik 4D-16 = 804,248 mm² > As, u (Ok)
- Tulangan Tekan 2D-16 = 402,124 mm² (ditambahkan).

3. Begel Geser Balok:

$$Vu = \frac{1}{2} \cdot qu \cdot L^2 = \frac{1}{2} \cdot (12,555 \text{ kN/m}) \cdot 5^2 = 31,3875 \text{ kN} = 31387,5 \text{ N}$$

$$Vud = \frac{(2,5 - 0,444) \cdot (31387,5)}{2,5} = 25813,08 \text{ N.}$$

$$\Phi \cdot Vc = \Phi \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 0,75 \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{20} \cdot 300 \cdot 444 = 74461,064 \text{ N.}$$

$$\Phi \cdot \frac{Vc}{2} = \frac{74461,064 \text{ N}}{2} = 37230,532 \text{ N.}$$

Karena gaya geser Vud < $\Phi \cdot \frac{Vc}{2}$, maka digunakan begel paling minimal ($\Phi 6$).

$$\text{Spasi begel } s = \frac{d}{2} = \frac{444}{2} = 222 \text{ mm, Jadi dipakai begel } \Phi 6-220.$$

4. Penulangan Torsi

$$Tu = 20,216 \text{ kNm} = 20216000 \text{ Nmm}$$

$$Tn = \frac{T_u}{\Phi} = \frac{20216000}{0,75} = 26954666,67 \text{ Nmm}$$

$$Acp = \text{Luas penampang bruto} = 300 \cdot 500 = 150000 \text{ mm}^2$$

$$pcp = \text{Keliling penampang bruto} = 2 \cdot (300+500) = 1600 \text{ mm}$$

$$\frac{\phi \cdot \sqrt{f'_c}}{12} \cdot \left[\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right] = \frac{0,75 \cdot \sqrt{20}}{12} \cdot \left[\frac{150000^2}{1600} \right] = 3930588,242 \text{ Nmm.}$$

$$Tu > \frac{\phi \cdot \sqrt{f'_c}}{12} \cdot \left[\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right]$$

20216000 Nmm > 3930588,242 Nmm, maka perlu tulangan torsi.

$$A_{0h} = \text{Luas batas sengkang luar} = (300 - 2 \cdot 40) \cdot (500 - 2 \cdot 40) = 92400 \text{ mm}^2.$$

$$A_0 = 0,85 \cdot A_{0h} = 0,85 \cdot 92400 \text{ mm}^2 = 78540 \text{ mm}^2$$

5. Begel Torsi

Luas begel torsi,

$$\frac{Avt}{s} = \frac{T_n}{2 \cdot A_0 \cdot f_{yv} \cdot \cot \theta} = \frac{26954666,67}{2 \cdot 78540 \cdot 300 \cdot \cot 45^\circ} = 0,5720 \text{ mm}$$

Luas begel torsi per meter (1m = 1000 mm), Avt:

$$Avt = \frac{T_n \cdot s}{2 \cdot A_0 \cdot f_{yv} \cdot \cot \theta} = 0,5720 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 572 \text{ mm}^2$$

Pada begel geser balok digunakan begel $\phi 6-220$, maka:

$$\text{Luas begel geser per meter, } Avt = \frac{(n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot dp^2 \cdot s)}{s} = \frac{(2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 6^2 \cdot 1000)}{220} = 257,039 \text{ mm}^2$$

6. Kontrol Luas Begel Geser dan Torsi (Avs + Avt):

$$\text{Luas Total Begel} = Avs + Avt = 257,039 \text{ mm}^2 + 572 \text{ mm}^2 = 829,039 \text{ mm}^2$$

$$\frac{75 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot S}{1200 \cdot f_{yv}} = \frac{75 \cdot \sqrt{20} \cdot 300 \cdot 1000}{1200 \cdot 300} = 279,508 \text{ mm}^2$$

$$\frac{b \cdot S}{3 \cdot f_{yv}} = \frac{300 \cdot 1000}{3 \cdot 300} = 333,333 \text{ mm}^2$$

Jadi:

$$Avs + Avt > \frac{75 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot S}{1200 \cdot f_{yv}}$$

$$829,039 \text{ mm}^2 > 279,508 \text{ mm}^2 \text{ (Ok)}$$

$$Avs + Avt > \frac{b \cdot S}{3 \cdot f_{yv}}$$

$$829,039 \text{ mm}^2 > 333,333 \text{ mm}^2 \text{ (Ok)}$$

$$\text{Jarak Begel total, } s = \frac{(n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot dp^2 \cdot s)}{Avs + Avt} = \frac{(2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 6^2 \cdot 1000)}{829,039 \text{ mm}^2} = 68,21 \text{ mm}$$

$$s = \frac{ph}{8} = \frac{1280}{8} = 160 \text{ mm}$$

$$s \leq 300 \text{ mm}$$

Maka digunakan yang paling kecil, yaitu $s = 65 \text{ mm}$. **Jadi digunakan begel $\phi 6-65$.**

7. Tulangan Lentur Torsi:

$$A_t = \frac{A_{vt}}{s} \cdot p_h \cdot \left(\frac{f_{yv}}{f_{yl}} \right) \cdot \cot^2 \theta = 0,572 \cdot 1280 \cdot \left(\frac{300}{300} \right) \cdot \cot^2 45^\circ = 732,16 \text{ mm}^2.$$

Tulangan lentur, $A_{st} = 4D-16 + 2D-16 = 6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2 = 1206,372 \text{ mm}^2$.

$$\frac{b}{6 \cdot f_{yv}} = \frac{300}{6 \cdot 300} = 0,167 \text{ mm}.$$

$\frac{A_{vt}}{s} = 0,5720 \text{ mm}$, jadi $\frac{A_{vt}}{s} > \frac{b}{6 \cdot f_{yv}}$ (Memenuhi syarat).

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_{cp}}{12 \cdot f_{y1}} - \left(\frac{A_{vt}}{s} \right) \cdot p_h \cdot \frac{f_{yv}}{f_{y1}} \right\} \\ & = \left\{ \frac{5 \cdot \sqrt{20} \cdot 150000}{12 \cdot 300} - 0,572 \cdot 1280 \cdot \frac{300}{300} \right\} = 199,535 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Jadi:

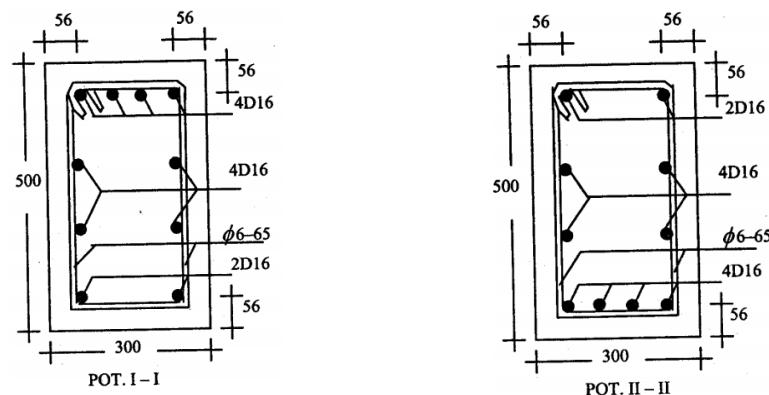
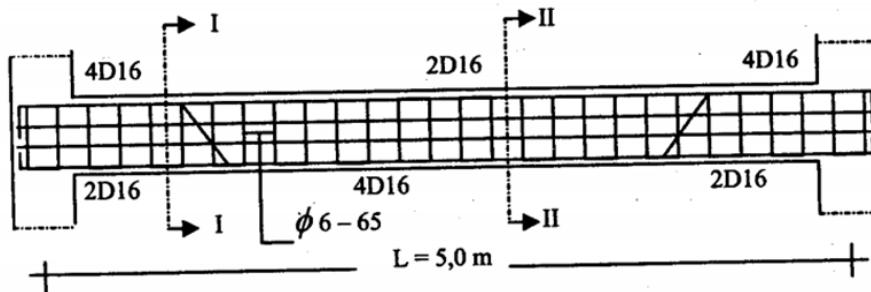
$$(A_t + A_{st}) \geq \left\{ \frac{5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_{cp}}{12 \cdot f_{y1}} - \left(\frac{A_{vt}}{s} \right) \cdot p_h \cdot \frac{f_{yv}}{f_{y1}} \right\}$$

($732,16 \text{ mm}^2 + 1206,372 \text{ mm}^2 \geq 199,535 \text{ mm}^2$) (Memenuhi Syarat).

Jumlah tulangan longitudinal torsi:

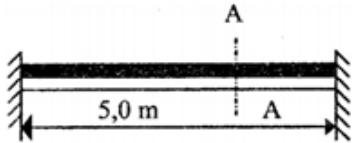
$$(n) = \frac{A_t}{\frac{1}{4} * \pi * D^2} = \frac{732,16 \text{ mm}^2}{\frac{1}{4} * \pi * 16^2} = 3,64 \text{ (Digunakan 4D-16 di kanan-kiri Balok).}$$

8. Gambar Penulangan Balok

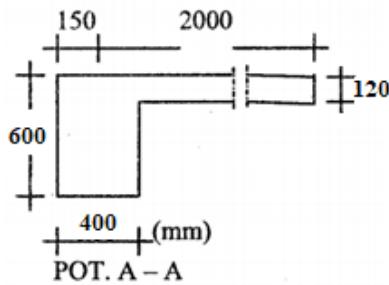


7.6 Latihan

- Diketahui Balok ($400/600$) dengan bentang 5m. Mendukung pelat dengan tebal 120 mm, dengan panjang 2m. Beban hidup diatas pelat adalah 2 kN/m^2 . Jika pada Momen balok diketahui:



- Ujung $M^{(-)} = \frac{1}{16} \cdot q \cdot L^2$
- Lapangan $M^{(+)} = \frac{1}{12} \cdot q \cdot L^2$



Tersedia tulangan yang digunakan adalah D-19, $\phi 10$ dan $\phi 8$. Mutu beton yang digunakan (f'_c) = 25 MPa, f_y = 350 MPa. Dengan kondisi struktur terlindung (tidak berhubungan dengan keadaan cuaca). Berat Beton γ_c = 24 kN/m³.

Tentukanlah:

1. Kontrol apakah dimensi penampang balok memenuhi persyaratan/ tidak terhadap beban puntir.
2. Hitung penulangan balok, baik tulangan lentur, geser maupun puntir.
3. Gambarkan penulangan lengkap dengan potongan penampang pada ujung dan lapangan balok.

BAB 8

DESAIN PERENCANAAN PELAT BETON

8.1 Pendahuluan

Pada pembelajaran perencanaan pelat beton bertulang akan dipelajari bagaimana merencanakan/ mendesain tebal pelat serta penulangan pelat beton satu arah (*one way*) dan pelat dua arah (*two way*). Dalam perencanaan tebal pelat satu arah dan pelat dua arah haruslah direncanakan sesuai dengan Standard Nasional Indonesia (SNI) untuk dapat memastikan desain/ pelat yang kita rencanakan sesuai dengan wilayah kita Indonesia yang rawan dengan gempa. Dalam perencanaan tulangan pelat satu arah dan pelat dua arah sangatlah diperlukan perhitungan momen tumpuan dan lapangan yang terjadi, dengan memperoleh momen yang terjadi pada tumpuan arah x, y dan lapangan arah x, y maka tulangan pelat akan dapat direncanakan/ didesain dan dilakukan evaluasi perhitungan penulangan dan dimensi.

8.2 Kegiatan Pembelajaran: Perencanaan Pelat Satu Arah (*One Way Slab*)

1. Kemampuan akhir

Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari perencanaan pelat satu arah (*one way slab*) adalah mampu menjelaskan jenis/ tipe pelat satu arah, desain/ perencanaan pembebanan pelat satu arah, dan analisa perencanaan/ perhitungan penulangan pelat satu arah sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan tipe pelat satu arah, tumpuan pelat, dan analisa/ perencanaan penulangan pada pelat satu arah

8.3 Defenisi Pelat Beton

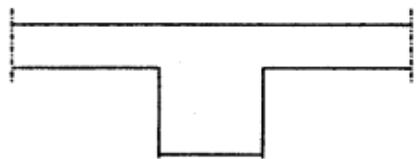
Pelat Beton Bertulang adalah struktur tipis yang dibuat dari beton bertulang dengan bidang yang arahnya horizontal, dan beban yang bekerja tegak lurus pada bidang struktur tersebut. Pelat Beton Bertulang banyak digunakan pada bangunan sipil baik sebagai:

- Lantai Bangunan
- Lantai atap dari suatu gedung
- Lantai Jembatan/ Lantai pada Dermaga
- Cor Jalan

8.4 Tumpuan Pelat

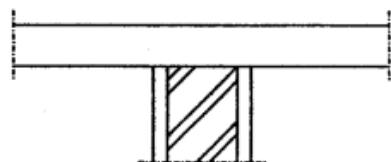
Untuk merencanakan pelat beton bertulang perlu diperhatikan jenis perlakuan dan jenis penghubung di tempat tumpuan. Kekakuan hubungan antara pelat dan tumpuan akan menentukan besar momen lentur yang terjadi pada pelat. Untuk bangunan Gedung, umumnya pelat di tumpu oleh balok-balok secara:

1. *Monolit*, yaitu pelat dan balok dicor bersamaan sehingga menjadi satu kesatuan seperti pada gambar berikut.



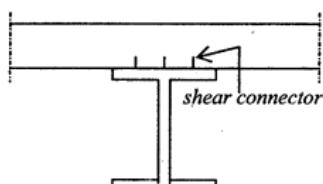
Gambar 8. 1 Pelat ditumpu balok (*monolit*).

2. Ditumpu oleh dinding-dinding bangunan.



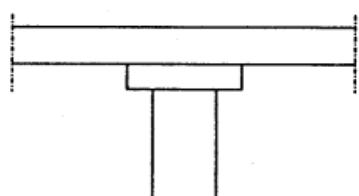
Gambar 8. 2 Pelat ditumpu dinding/ tembok.

3. Pelat didukung oleh balok-balok baja dengan sistem Komposit.



Gambar 8. 3 Pelat ditumpu balok baja dengan sistem komposit.

4. Pelat didukung oleh Kolom secara langsung tanpa Balok



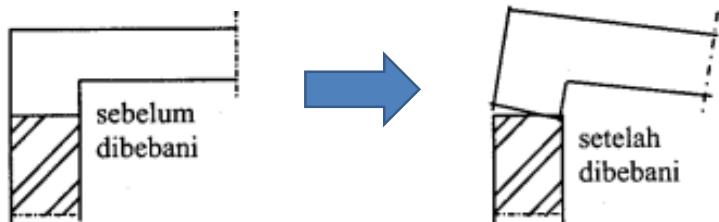
Gambar 8. 4 Pelat ditumpu kolom secara langsung (pelat cendawan).

8.5 Jenis Perletakan Pelat pada Balok

Ada 3 Jenis Perletakan Pelat pada Balok, yaitu sebagai berikut:

1. Terletak Bebas

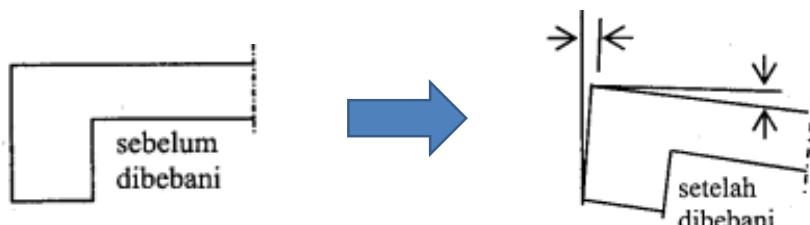
Keadaan ini terjadi jika pelat diletakkan begitu saja diatas balok, atau antara pelat dan balok tidak dicor bersamaan, sehingga pelat dapat berotasi bebas pada tumpuan tersebut. **Pelat ditumpu oleh tembok** juga termasuk dalam kategori terletak Bebas.



Gambar 8. 5 Pelat terletak bebas.

2. Terjepit Elastis

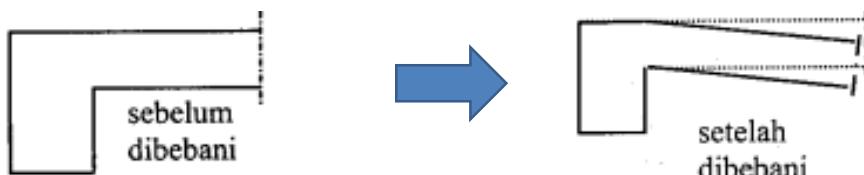
Keadaan ini terjadi Jika Pelat dan Balok dicor bersamaan secara monolit, tetapi ukuran balok cukup kecil, sehingga balok tidak cukup kuat untuk mencegah terjadinya rotasi.



Gambar 8. 6 Pelat terjepit elastis.

3. Terjepit Penuh

Keadaan ini terjadi Jika Pelat dan Balok dicor bersamaan secara monolit, ukuran balok cukup besar, sehingga mampu untuk mencegah terjadinya rotasi pelat.

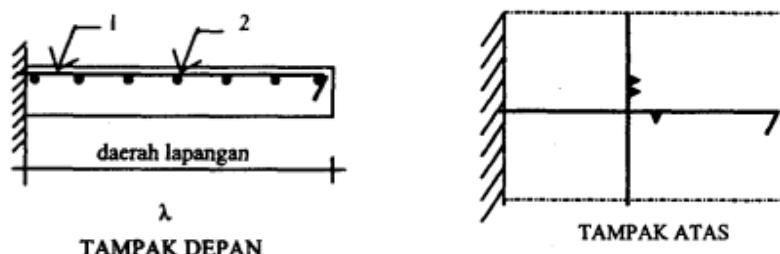


Gambar 8. 7 Pelat terjepit penuh.

8.6 Jenis-Jenis Pelat Beton Bertulang

1. Pelat Satu Arah (*One Way Slab*)

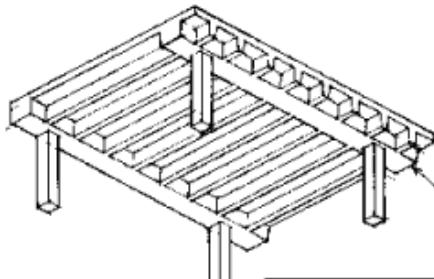
- Jika sistem pelat hanya ditumpu di kedua sisinya, maka pelat tersebut akan melentur atau mengalami lendutan dalam arah tegak lurus dari sisi tumpuan, beban didistribusikan oleh pelat dalam satu arah saja yaitu kearah tumpuan.
- Cocok digunakan pada bentangan (3-6) m, dengan beban hidup 2,5 – 5 kN/m²



Gambar 8. 8 Pelat Kantilever

a. **Sistem Pelat Rusuk (*Joist Construction*)**

- Sistem pelat rusuk terdiri dari pelat beton dengan ketebalan 50 hingga 100 mm, yang ditopang oleh sejumlah rusuk dengan jarak beraturan.
- Rusuk mempunyai lebar minimum 100 mm dan mempunyai tinggi tidak lebih dari 3,5 kali lebar minimumnya. Rusuk biasanya bersisi miring dan disusun dalam jarak tertentu yang tidak melebihi 750 mm.
- Rusuk ditopang oleh balok induk utama yang langsung menumpu pada kolom.
- Sistem pelat rusuk cocok digunakan untuk struktur pelat dengan bentangan 6-9 m serta memikul beban hidup sebesar 3,5 – 5,5 kN/m².

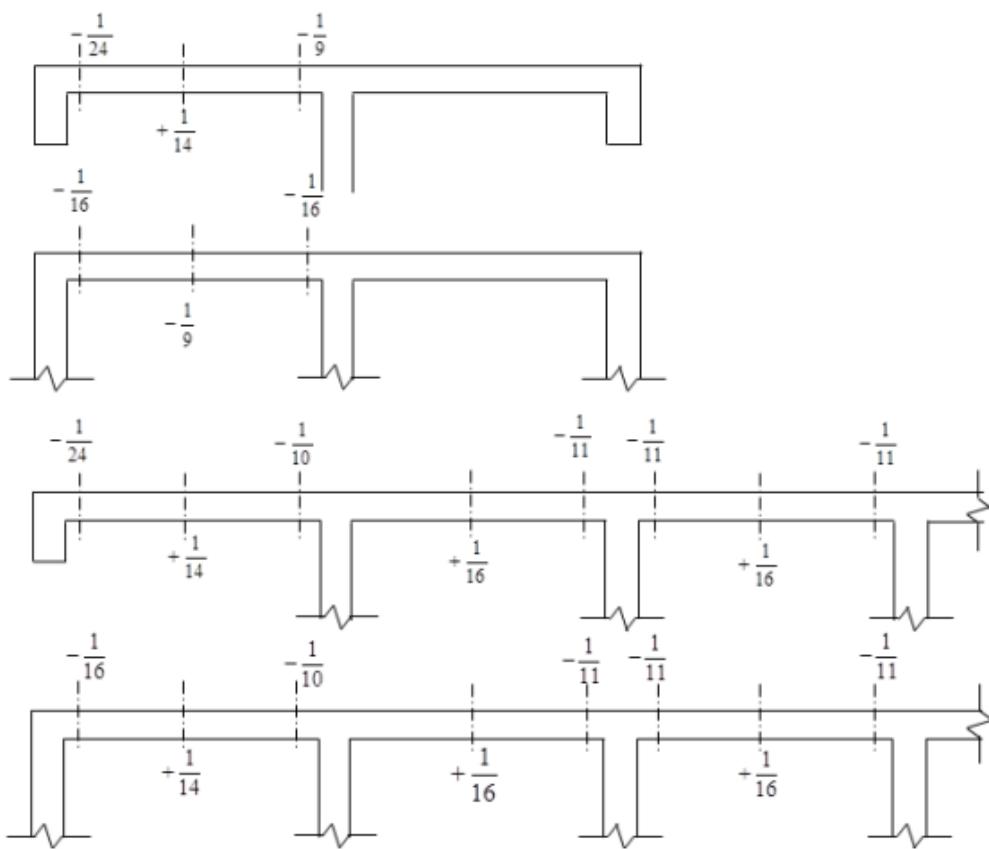


Gambar 8. 9 Sistem Pelat Rusuk (*Joist Construction*)

8.7 Desain Pelat Satu Arah

Dalam merencanakan pelat satu arah ada beberapa hal yang perlu diperhatikan diantaranya sebagai berikut:

- Pelat beton yang memiliki perbandingan panjang antara bentang panjang terhadap bentang pendek lebih atau sama dengan 2, dikategorikan sebagai pelat satu arah. ($L_{panjang}/L_{pendek} > 2,0$).
- Pada sistem pelat satu arah, hampir seluruh beban dilimpahkan dalam arah pendek.
- Desain pelat satu arah pada umumnya dapat dilakukan seperti halnya struktur balok yang dianggap memiliki lebar 1 m.
- Jika pelat hanya terdiri dari satu bentangan saja, dengan anggapan tertumpu sederhana di kedua sisinya, maka momen lentur yang timbul akibat beban q yang terdistribusi merata, adalah $M = qL^2/8$, dengan L adalah panjang bentang antara kedua tumpuan.
- Bila pelat yang sama tertumpu pada beberapa tumpuan, maka akan timbul momen positif dan momen negatif pada pelat yang dapat dihitung melalui prosedur analisis struktur, atau dapat juga menggunakan koefisien momen yang diberikan dalam SNI 2847:2013, pasal 8.3.3.



Gambar 8. 10 Koefisien Momen untuk Balok dan Pelat Menerus.

Batasan dalam Desain Pelat Satu Arah

Tabel 8. 1 Tebal minimum pelat.

Jenis Komponen Struktur	Tertumpu Sederhana	Satu Ujung Menerus	Kedua Ujung Menerus	Kantilever
Pelat Satu Arah	$\frac{L}{20}$	$\frac{L}{24}$	$\frac{L}{28}$	$\frac{L}{10}$
Pelat Rusuk	$\frac{L}{16}$	$\frac{L}{18,5}$	$\frac{L}{21}$	$\frac{L}{8}$

Untuk f_y selain 400 MPa, maka tabel harus dikalikan dengan $(0,4 + \frac{f_y}{700})$.

Tabel 8. 2 Batasan Lendutan Pelat.

Jenis Struktur Pelat	Lendutan yang Diperhitungkan	Batas Lendutan
Atap datar yang tidak menahan atas tidak disatukan dengan komponen nonstructural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar.	Lendutan seketika akibat beban hidup (L)	$\frac{L}{180}$
Lantai yang tidak menahan atau tidak disatukan dengan komponen	Lendutan seketika akibat beban hidup (L)	$\frac{L}{360}$

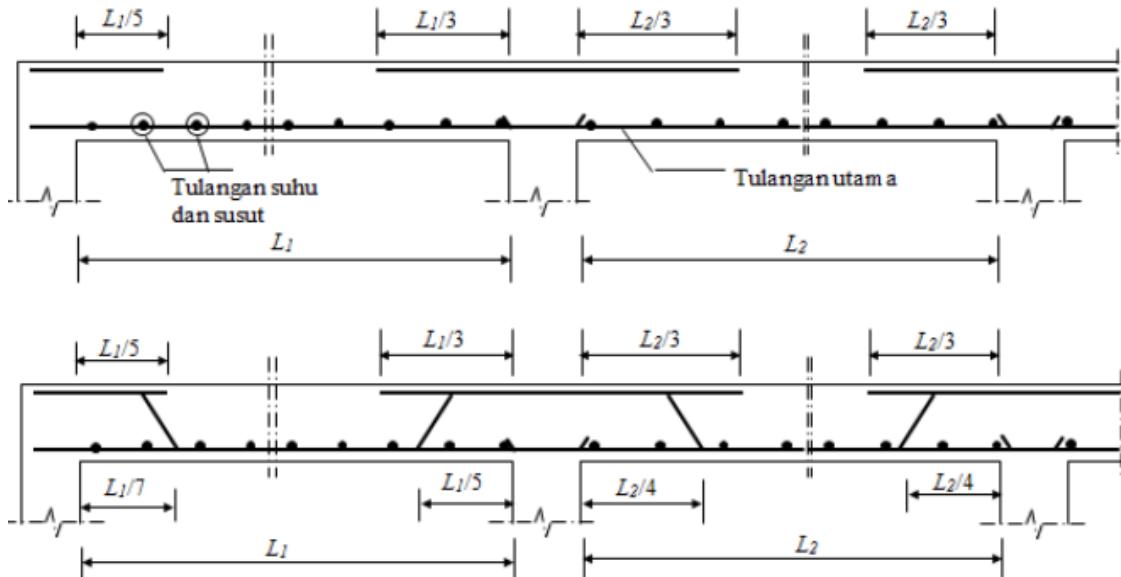
nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar.		
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar.	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen nonstruktural (jumlah dari lendutan jangka panjang, akibat semua beban tetap yang bekerja, dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup).	$\frac{L}{480}$
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar.		$\frac{L}{240}$

Dalam pengecoran dilapangan maka harus diperhatikan ketebalan selimut beton yang digunakan sesuai dengan kegunaan, cuaca, dan fungsi tanahnya. Berikut ini beberapa ketentuan yang digunakan diantaranya:

- Selimut beton untuk struktur pelat tidak boleh kurang dari 20 mm, untuk pelat yang tidak berhubungan langsung dengan cuaca dan tanah.
- Struktur pelat satu arah, harus disediakan tulangan susut dan suhu yang memiliki arah tegak lurus terhadap tulangan lentur. Persyaratan ini diatur dalam SNI 2847:2013 pasal 7.12. Tulangan susut dan suhu harus paling sedikit memiliki rasio luas tulangan terhadap luas bruto penampang beton seperti ditunjukkan tabel di bawah ini, namun tidak kurang dari 0,0014.
- Kecuali untuk pelat rusuk, maka jarak antar tulangan utama pada pelat tidak boleh lebih dari 3 kali ketebalan pelat atau tidak lebih dari 450 mm (SNI.2847:2013, pasal 7.6.5).

Tabel 8. 3 Persyaratan Tulangan Susut dan Suhu Untuk Pelat.

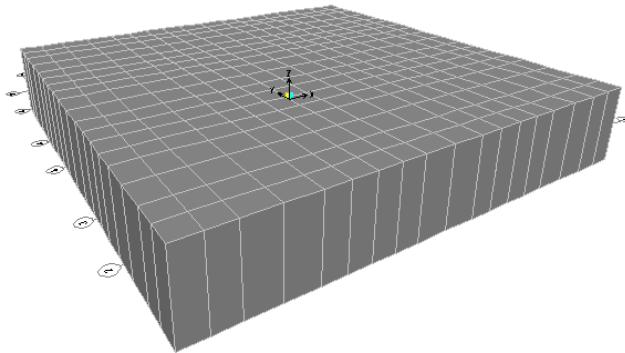
Pelat yang menggunakan tulangan ulir dengan mutu $f_y = 280$ MPa atau 350 MPa	0,0020
Pelat yang menggunakan tulangan ulir atau jarring kawat las dengan mutu $f_y = 420$ MPa.	0,0018
Pelat yang menggunakan tulangan dengan tegangan luluh melebihi 420 MPa yang diukur pada regangan leleh sebesar 0,35%	$0,0018 \times \frac{420}{f_y}$



Gambar 8. 11 Detail Penulangan Pelat Satu Arah.

Contoh Soal 1.

Hitunglah kuat momen rencana dari sistem pelat satu arah yang memiliki tebal, $h = 150$ mm dengan penulangan D-19 dan jarak antar tulangan, $s = 175$ mm. Gunakan $f'c = 20$ MPa dan $f_y = 400$ MPa.



Penyelesaian:

1. Tentukan tinggi efektif (d):

$$d = h - 20\text{mm} (\text{selimut beton}) - \frac{1}{2} \text{ diameter tulangan}$$

$$d = 150 - 20\text{mm} - \frac{1}{2} (19) = 120,5 \text{ mm}$$

2. Tentukan Luas Tulangan (D-19, $Ab = 283 \text{ mm}^2$), maka:

$$As = \frac{1000 * Ab}{s} = \frac{1000 * 283}{175} = 1617,14 \text{ mm}^2$$

3. Bandingkan Rasio Tulangan, ρ_{\max} , ρ_{\min} , untuk $f'c = 20$ MPa, $f_y = 400$ Mpa:

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y}$$

$$\rho_b = \frac{\beta_1 \times 0.85 \times f'c}{f_y} \left[\frac{600}{600+f_y} \right] = \frac{0.8 \times 0.85 \times 28}{400} * \left[\frac{600}{600+400} \right]$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \times \rho_b / \quad \rho_{\max} = \frac{As}{b \times d}$$

$$\rho = 0.5 * \rho_{\max}$$

$$\rho_{\min} = 0,004$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \times \rho_b / \quad \rho_{\max} = \frac{As}{b \times d} = 0,01355$$

4. Tentukan, $\Phi M_n = \Phi * As * f_y (d - \frac{a}{2})$:

$$a = \frac{As * f_y}{0,85 f' c * b} = \frac{1617,14 * 400}{0,85 * 20 * 1000} = 35,05 \text{ mm}$$

$$\Phi M_n = \Phi * As * f_y (d - \frac{a}{2})$$

$$= 0,9 * 1617,14 * 400 (120,5 - \frac{35,05}{2}) = 59075741,34 \text{ Nmm} = \mathbf{59,075 \text{ kN.m}}$$

Contoh Soal 2

Tentukan besarnya beban hidup merata yang diperbolehkan pada pelat satu arah berikut ini jika, $\Phi M_n = 59,075 \text{ kN.m}$, panjang bentang pelat diantara dua tumpuan adalah 4,85 m, dan memikul beban mati 4,8 kN/m².

Penyelesaian:

1. Kuat Momen Rencana Pelat adalah 59,075 kN.m per m'lebar pelat:

$$Mu = \Phi M_n = 59,075 = \frac{q_u * L^2}{8} = \frac{q_u * 4,85^2}{8}$$

$$q_u = 20,09 \text{ kN/ m}^2$$

2. Beban Mati merata yang bekerja:

$$q_D = 4,8 + \text{berat sendiri pelat} = 4,5 + 0,15 (24) = 8,4 \text{ kN/m}$$

Maka:

$$q_u = 1,2 q_D + 1,6 q_L > 20,09 = 1,2 (8,4) + 1,6 q_L$$

$$q_L = 6,26 \text{ kN/ m}^2$$

8.8 Kegiatan Pembelajaran: Perencanaan Pelat Dua Arah (*Two Way Slab*)

1. Kemampuan akhir

Kemampuan akhir yang diharapkan setelah mempelajari perencanaan pelat dua arah (*two way slab*) adalah mampu menjelaskan jenis/ tipe pelat dua arah, desain/ perencanaan pembebanan pelat dua arah, dan analisa perencanaan/ perhitungan penulangan pelat dua arah sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Beton Bertulang.

2. Uraian Materi

Pada pembelajaran ini akan dijelaskan tipe pelat dua arah, tumpuan pelat, dan analisa/ perencanaan penulangan pada pelat dua arah.

2.1 Pelat Dua Arah (*Two Way Slab*)

Peraturan SNI memberikan dua buah metode Pendekatan dalam melakukan analisis dan desain suatu sistem struktur pelat dua arah yaitu:

1. Metode Perencanaan Langsung (*Direct Design Method*, DDM) Dirumuskan dalam SNI 2847:2013 pasal 13.6, merupakan prosedur pendekatan untuk analisis dan desain pelat dua arah. Metode ini dibatasi untuk sistem pelat yang dibebani oleh beban terdistribusi merata, serta tertumpu oleh kolom-kolom dalam jarak yang sama atau hampir sama. Metode perencanaan langsung ini menggunakan sejumlah koefisien untuk menentukan besarnya momen rencana pada lokasi-lokasi kritis.
2. Metode Rangka Ekivalen (*Equivalent Frame Method*, EFM), Dirumuskan dalam SNI 2847:2013 pasal 13.7. Struktur Bangunan 3 dimensi dibagi-bagi menjadi beberapa rangka ekivalen dua dimensi, pembagian tersebut dilakukan dengan cara membuat potongan sepanjang garis tengah di antara kedua kolom. Struktur rangka dianalisis secara terpisah lantai per lantai dalam arah memanjang dan melintang.

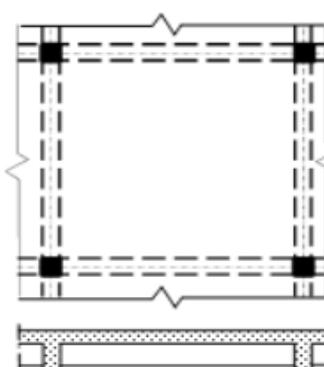
2.2 Jenis/ Tipe Pelat Dua Arah (*Two Way Slab*)

Apabila struktur pelat beton ditopang di keempat sisinya, dan rasio antara bentang panjang terhadap bentang pendeknya kurang dari 2, maka pelat tersebut dikategorikan sebagai sistem pelat dua arah

Jenis Pelat Dua Arah

1. Sistem balok-pelat dua arah

- Pada sistem struktur ini pelat beton ditumpu oleh balok di keempat sisinya.
- Beban dari pelat ditransfer ke keempat balok penumpu yang selanjutnya mentransfer bebannya ke kolom.
- Sistem pelat dua arah dengan balok ini dapat digunakan untuk bentangan 6-9 meter, dengan beban hidup sebesar $2,5 - 5,5 \text{ kN/m}^2$.
- Balok akan meningkatkan kekakuan pelat, sehingga lendutan yang terjadi akan relatif kecil.



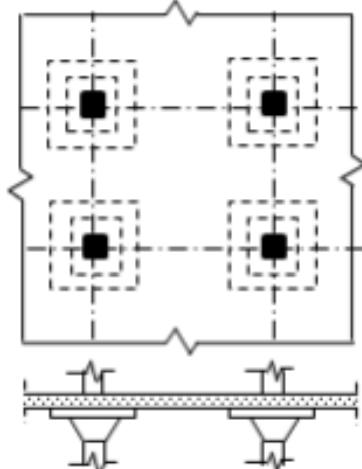
Gambar 8. 12 Pelat Dua Arah.

2. Sistem Slab datar (*flat slab*)

Merupakan sistem struktur pelat beton dua arah yang tidak memiliki balok penumpu di masing-masing sisinya. Beban pelat ditransfer secara langsung ke kolom. Kolom cenderung akan menimbulkan kegagalan geser pons pada pelat, yang dapat dicegah dengan beberapa alternatif:

- Memberikan penebalan setempat pada pelat (*drop panel*) serta menyediakan kepala kolom (*column capital*).

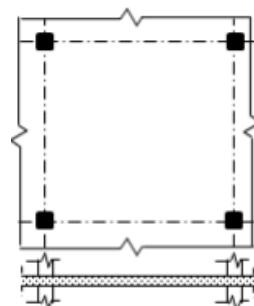
- Menyediakan penebalan panel namun tanpa kepala kolom, panel di sekitar kolom harus cukup tebal untuk memikul terjadinya tegangan tarik diagonal yang muncul akibat geser pons.
- Menggunakan kepala kolom tanpa ada penebalan panel, namun hal ini jarang diaplikasikan.
- Sistem pelat datar dapat digunakan untuk bentangan 6-9 meter, dengan beban hidup sebesar 4 – 7 kN/ m².



Gambar 8. 13 Slab Datar (*flat slab*).

3. Sistem Pelat datar (*flat plate*)

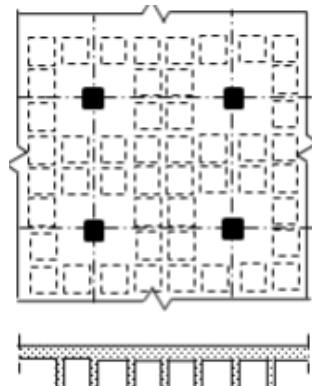
- ❖ Terdiri dari pelat yang tertumpu langsung ke kolom tanpa adanya penebalan panel dan kepala kolom.
- ❖ Potensi kegagalan struktur terbesar akan timbul akibat geser *pons*, yang akan menghasilkan tegangan tarik diagonal.
- ❖ Sebagai akibat tidak adanya penebalan panel dan kepala kolom, maka dibutuhkan ketebalan pelat yang lebih besar atau dengan memberikan penulangan ekstra di area sekitar kolom.
- ❖ Sistem lantai datar dapat digunakan untuk struktur pelat dengan bentangan 6 – 7,5 m dan beban hidup sebesar 2,5 – 4,5 kN/ m².



Gambar 8. 14 Pelat Datar (*flat plate*).

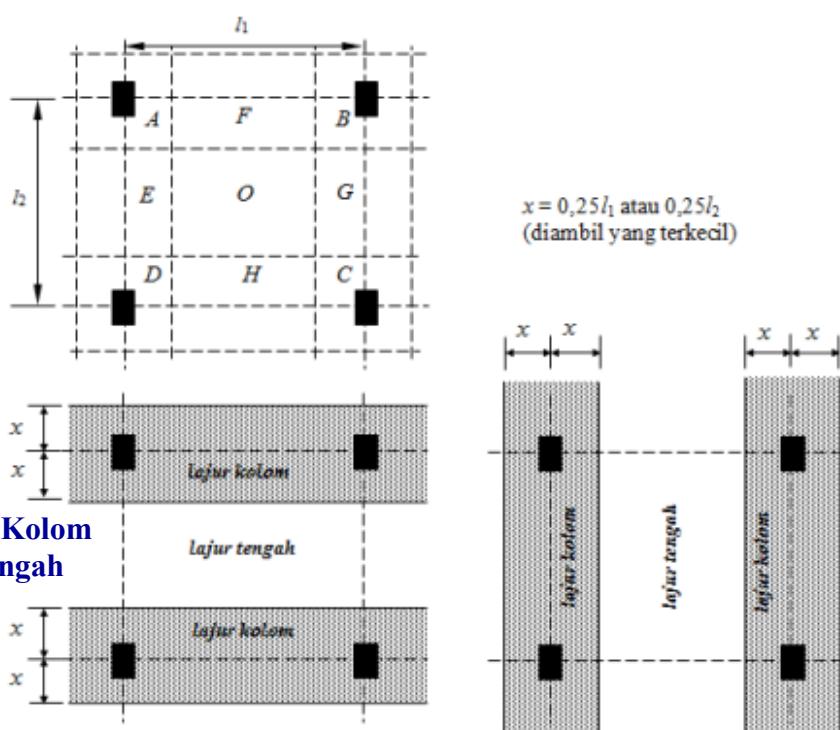
4. Pelat dua arah berusuk dan pelat waffle

- ✓ Merupakan sistem pelat dua arah dengan ketebalan pelat antara 50 mm hingga 100 mm yang ditumpu oleh rusuk-rusuk dalam dua arah.
- ✓ Jarak antar rusuk berkisar antara 500 mm hingga 750 mm.
- ✓ Tepi-tepi pelat dapat ditopang oleh balok, atau dapat juga pelat langsung menumpu pada kolom dengan memberikan penekanan pada pelat di sekitar kolom.
- ✓ Sistem pelat yang disebutkan terakhir sering disebut dengan istilah pelat *waffle*.



Gambar 8. 15 Pelat dua arah berusuk dan pelat *waffle*.

Lajur Kolom dan Lajur Tengah



Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah

- Untuk $0,2 < \alpha_{fm} < 2,0$

$$h = \frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta (\alpha_{fm} - 0,2)}$$

- Untuk $\alpha_{fm} > 2,0$

$$h = \frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta}$$

Namun tidak kurang dari 90 mm.

- Untuk $\alpha_{fm} < 0,2$

h = Ketebalan minimum pelat tanpa balok pada tabel di bawah ini.

Tabel 8. 4 Minimum Pelat Tanpa Balok Dalam.

f_y (MPa)	Tanpa Penebalan Panel			Dengan Penebalan Panel		
	Panel Luar		Panel Dalam	Panel Luar		Panel Dalam
	Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi		Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi	
280	$\frac{l_n}{33}$	$\frac{l_n}{36}$	$\frac{l_n}{36}$	$\frac{l_n}{36}$	$\frac{l_n}{40}$	$\frac{l_n}{40}$
420	$\frac{l_n}{30}$	$\frac{l_n}{33}$	$\frac{l_n}{33}$	$\frac{l_n}{33}$	$\frac{l_n}{36}$	$\frac{l_n}{36}$
520	$\frac{l_n}{28}$	$\frac{l_n}{31}$	$\frac{l_n}{31}$	$\frac{l_n}{31}$	$\frac{l_n}{34}$	$\frac{l_n}{34}$

Dengan:

- l_n = Panjang bentang bersih dalam arah memanjang dari konstruksi dua arah, di ukur dari muka ke muka tumpuan pada pelat tanpa balok, dan muka ke muka balok atau tumpuan lain pada kasus lainnya (mm).
- β = Rasio bentang bersih dalam arah panjang terhadap arah pendek dari pelat dua arah.
- α_{fm} = Nilai rata-rata α_f untuk semua balok pada tepi-tepi dari suatu pelat.
- α_f = Rasio kekakuan lentur penampang balok ($E_{cb}I_b$) terhadap kekakuan lentur pelat ($E_{cs}I_s$), yang dibatasi secara lateral oleh garis-garis sumbu tengah dari pelat-pelat yang bersebelahan pada tiap sisi balok.

$$\alpha_f = \frac{E_{cb}I_b}{E_{cs}I_s}$$

- I_b = Momen inersia brutto dari penampang balok terhadap sumbu berat, penampang balok mencakup pula bagian pelat pada setiap sisi balok sebesar proyek balok yang berada di atas atau di bawah pelat, namun tidak lebih dari empat kali tebal pelat.
- I_s = Momen inersia brutto dari penampang pelat.

Berikut ini merupakan syarat ketebalan Minimum pelat dua arah sesuai dengan SNI.2847.2013 antara lain:

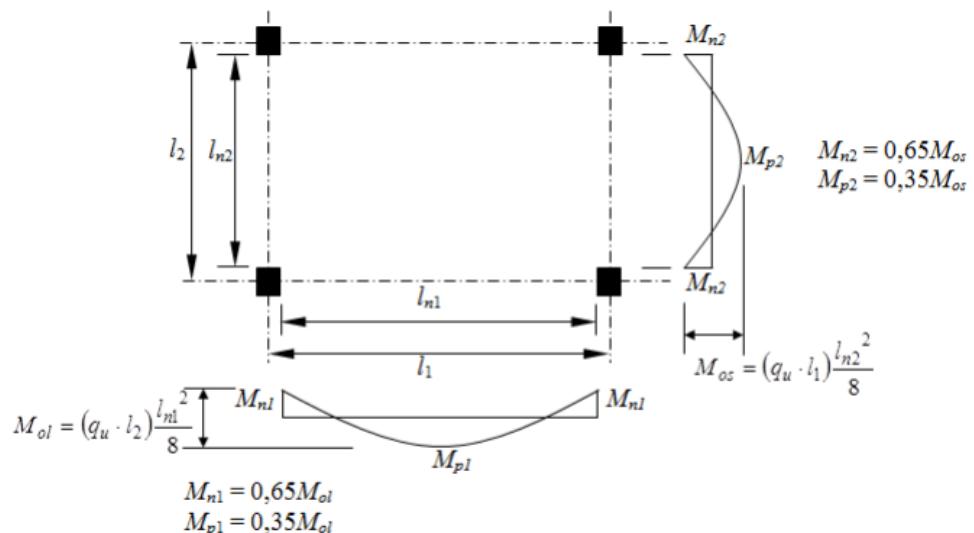
- Tebal minimum pelat tanpa balok dalam seperti ditentukan dalam Tabel diatas tidak boleh kurang dari 120 mm (untuk pelat tanpa penebalan panel), atau tidak kurang dari 100 mm (untuk pelat dengan penebalan panel).
- Dalam SNI. 2847. 2013 pasal 9.5.3.3. (d) diisyaratkan bahwa untuk panel dengan tepi yang tidak menerus, maka balok tepi harus mempunyai rasio kekakuan α yang tidak kurang dari 0,8.
- Atau sebagai alternatif, maka ketebalan maksimum yang di hitung dari syarat 1 dan 2 harus dinaikkan minimal 10%.

8.9 Metode Perencanaan Langsung Pelat Dua Arah

Untuk menggunakan metode perencanaan langsung pada sistem pelat dua arah, maka SNI 2847:2013 pasal 13.6.1 memberikan beberapa batasan sebagai berikut:

- Paling sedikit ada 3 bentang menerus dalam setiap arah.
- Pelat berbentuk persegi, dengan perbandingan antara bentang panjang terhadap bentang pendek diukur sumbu ke sumbu tumpuan, tidak lebih dari 2.
- Panjang bentang yang bersebelahan, diukur antara sumbu ke sumbu tumpuan, dalam masing-masing arah tidak berbeda lebih dari sepertiga bentang terpanjang.
- Posisi kolom boleh menyimpang maksimum sejauh 10% panjang bentang dari garis-garis yang menghubungkan sumbu-sumbu kolom yang berdekatan.
- Beban yang diperhitungkan hanyalah beban gravitasi dan terbagi merata pada seluruh panel pelat. Sedangkan beban hidup tidak boleh melebihi 2 kali beban mati.
- Untuk suatu panel pelat dengan balok di antara tumpuan pada semua sisinya, kekakuan relatif balok dalam dua arah yang tegak lurus.

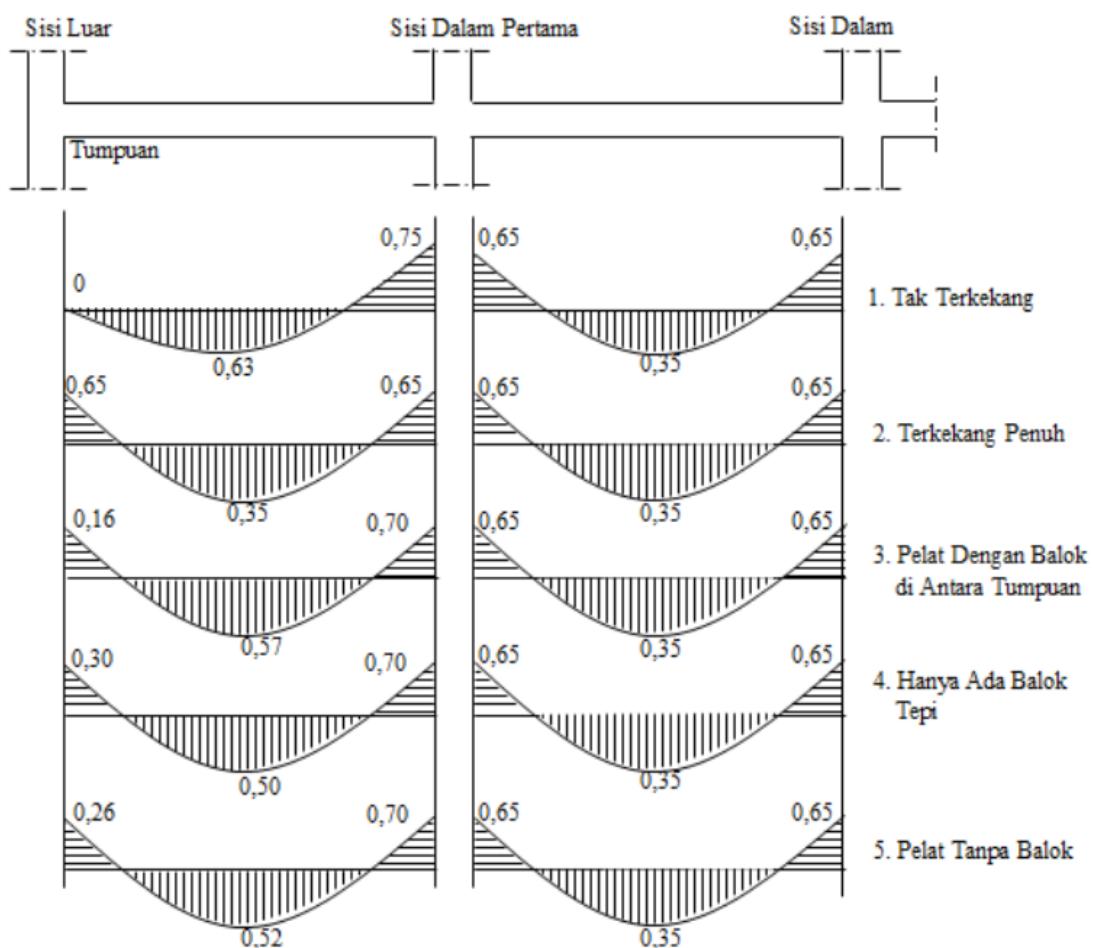
$$0,2 < \frac{\alpha_{f1} l_2^2}{\alpha_{f2} l_2^2} < 5,0$$



Gambar 8. 16 Distribusi Momen Pada suatu pelat dalam.

Tabel 8. 5 Distribusi Momen Pada Pelat Ujung.

Tepi Luar Tak Terkekang	Pelat Dengan Balok di Antara Semua Tumpuan	Pelat Tanpa Balok di Antara Tumpuan-tumpuan Dalam		Tepi Luar Terkekang Penuh
		Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi	
Momen Terkator Negatif Dalam	0,75	0,70	0,70	0,65
Momen Terkator Positif	0,63	0,57	0,52	0,35
Momen Terkator Negatif Luar	0	0,16	0,26	0,30



Gambar 8. 17 Distribusi Momen Statik Total Menjadi Momen Positif dan Negatif.

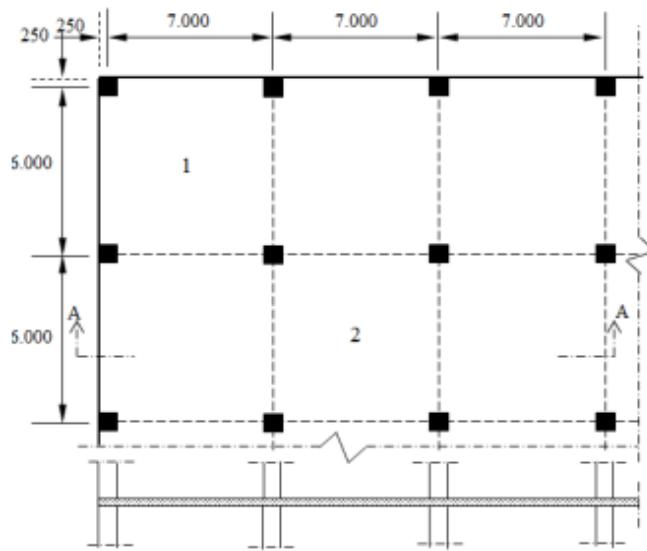
Tabel 8. 6 Analisa perhitungan momen pada pelat 2 arah.

Tipe Pelat	Momen	ly / lx																
		1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
I	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	44	52	59	66	73	78	84	88	93	97	100	103	106	108	110	112	125
	$Ml_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	44	45	45	44	44	43	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	25
II	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	21	25	28	31	34	36	37	38	40	40	41	41	42	42	42	42	
	$Ml_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	21	21	20	19	18	17	16	14	13	12	12	11	11	10	10	8	
III	$Mt_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	52	59	64	69	73	76	79	81	82	83	83	83	83	83	83	83	
	$Mt_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	52	54	56	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	
IVA	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	28	33	38	42	45	48	51	53	55	57	58	59	59	60	61	61	63
	$Ml_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	28	28	28	27	26	25	23	23	22	21	19	18	17	17	16	16	13
IVB	$Mt_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	68	77	85	92	98	103	107	111	113	116	118	119	120	121	122	122	125
	$Mt_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	68	72	74	76	77	77	78	78	78	78	79	79	79	79	79	79	79
VA	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	22	28	34	42	49	55	62	68	74	80	85	89	93	97	100	103	125
	$Ml_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	32	35	37	39	40	41	41	41	40	39	38	37	36	35	35	35	25
VB	$Mt_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	70	79	87	94	100	105	109	112	115	117	119	120	121	122	123	123	125
	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	32	34	36	38	39	40	41	41	42	42	42	42	42	42	42	42	42
VIA	$Mt_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	22	20	18	17	15	14	13	12	11	10	10	10	9	9	9	9	8
	$Mt_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	70	74	77	79	81	82	83	84	84	84	84	83	83	83	83	83	83
VIB	$Mt_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	31	38	45	53	60	66	72	78	83	88	92	96	99	102	105	108	125
	$Mt_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	37	39	41	41	42	42	41	41	40	39	38	37	36	35	34	33	25
VB	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	84	92	99	104	109	112	115	117	119	121	122	122	123	123	124	124	125
	$Ml_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	37	41	45	48	51	53	55	56	58	59	60	60	60	61	61	62	63
VIA	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	31	30	28	27	25	24	22	21	20	19	18	17	17	16	16	15	13
	$Mt_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	84	92	98	103	108	111	114	117	119	120	121	122	122	123	123	124	125
VIB	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	21	26	31	36	40	43	46	49	51	53	55	56	57	58	59	60	63
	$Ml_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	26	27	28	28	27	26	25	23	22	21	21	20	20	19	19	18	13
VIA	$Mt_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	55	65	74	82	89	94	99	103	106	110	114	116	117	118	119	120	125
	$Mt_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	60	65	69	72	74	76	77	78	78	78	78	78	78	78	78	79	79
VIB	$Ml_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	26	29	32	35	36	38	39	40	40	41	41	42	42	42	42	42	42
	$Ml_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	21	20	19	18	17	15	14	13	12	12	11	11	10	10	10	10	8
VIB	$Mt_x = + 0.001 qL_x^2 \cdot X$	60	66	71	74	77	79	80	82	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	$Mt_y = + 0.001 qL_y^2 \cdot X$	55	57	57	57	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
Keterangan :		= Terletak bebas																
		= Terjepit penuh																

- $Mlx = 0.001 \cdot qu \cdot Lx^2 \cdot X$
 $Mtx = -0.001 \cdot qu \cdot Lx^2 \cdot X$
 $Mly = 0.001 \cdot qu \cdot Lx^2 \cdot X$
 $Mty = -0.001 \cdot qu \cdot Lx^2 \cdot X$
 $Mlx = \text{Momen lentur pelat per-satuan panjang di lapangan di arah bentang lx.}$
 $Mly = \text{Momen lentur pelat per-satuan panjang di lapangan di arah bentang ly.}$
 $Mtx = \text{Momen lentur pelat per-satuan panjang di tumpuan di arah bentang lx.}$
 $Mty = \text{Momen lentur pelat per-satuan panjang di tumpuan di arah bentang ly.}$

Contoh Soal 1.

Suatu sistem lantai datar (*flat-plate*) dengan ukuran pelat $7 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ditumpu oleh kolom persegi berukuran $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$. Tentukan ketebalan minimum pelat yang disyaratkan dalam peraturan SNI 2847:2013 untuk pelat dalam dan pelat sudut seperti dalam Gambar. Pada struktur ini tidak digunakan balok tepi. Gunakan $f'c = 20 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$.



Penyelesaian:

- Untuk pelat sudut (1), tebal minimum adalah $(\frac{l_n}{30})$ maka:

$$l_n = 700 - 2(\frac{500}{2}) = 6500 \text{ mm}$$

$$h_{minimum} = (\frac{l_n}{30}) = (\frac{6500}{30}) = 216,67 \text{ mm.}$$

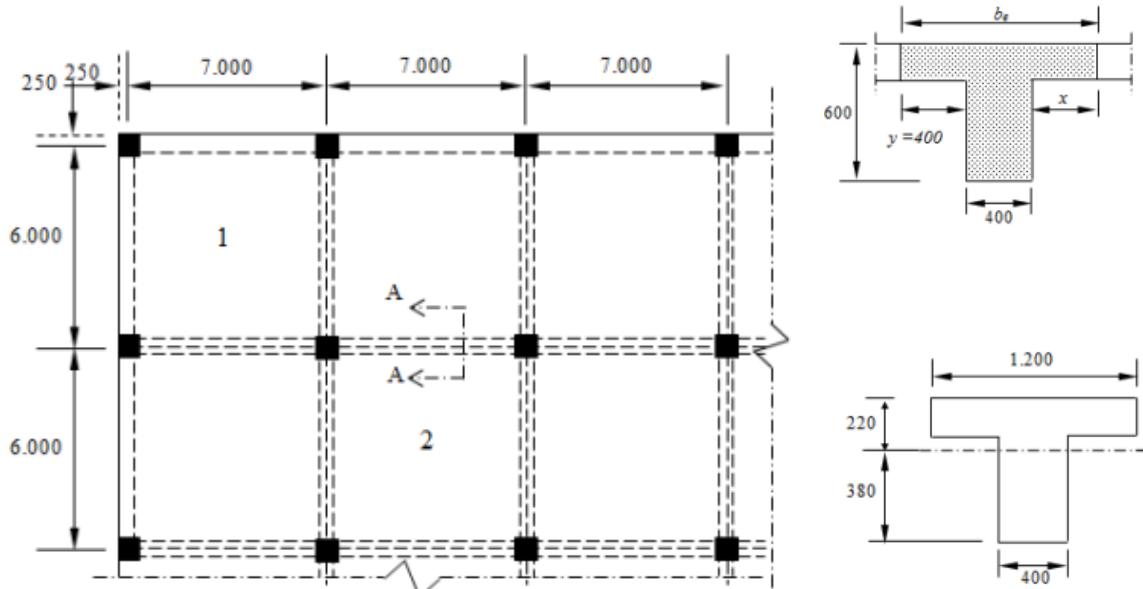
- Untuk pelat dalam (2), tebal minimum adalah $(\frac{l_n}{33})$ maka:

$$h_{minimum} = (\frac{6500}{33}) = 196,97 \text{ mm.}$$

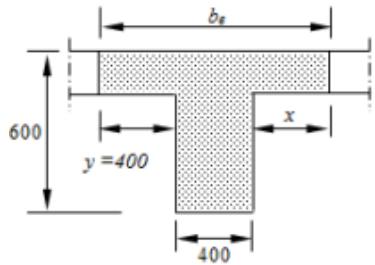
Maka digunakan tebal pelat Betonnya adalah **216,67 mm.**

Contoh Soal 2.

Suatu sistem pelat lantai dua arah dengan balok ditunjukkan dalam Gambar di bawah ini. Pelat dan balok ditopang oleh kolom berukuran $(500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm})$. Ukuran balok diperlihatkan dalam gambar tersebut. Tentukan ketebalan minimum yang diperlukan untuk suatu pelat dalam. Gunakan $f'c = 20 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$.



Penyelesaian:



1. Asumsikan Tebal Pelat = 200 mm

Maka:

$$x = y - e = 400 - 200 = 200 \text{ mm} < (4 * 200 = 800 \text{ mm})$$

Lebar Balok Sayap T adalah:

$$b_e = 400 + (2 * 400) = 1200 \text{ mm.}$$

2. Menentukan Titik Berat Penampang:

- Luas bagian sayap = $200 * 1200 = 240000 \text{ mm}^2$

- Luas bagian badan = $400 * 400 = 160000 \text{ mm}^2$

Luas Total = 400000 mm^2

$$\bar{y} = \frac{(240000 * 100) + (160000 * 400)}{400000} = 220 \text{ mm}$$

$$I_b = \left[\frac{1}{12} * 1200 * 200^3 + 240000 * 120^2 \right] + \left[\frac{1}{12} * 400 * 400^3 + 160000 * 180^2 \right] \\ = 11573,33 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

3. Momen Inersia PELAT dalam arah panjang adalah:

$$I_l = \frac{1}{12} * 6000 * 200^3 = 4000 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_{fl} = \frac{EI_b}{EI_l} = \frac{11573,33 \times 10^6 \text{ mm}^4}{4000 \times 10^6 \text{ mm}^4} = 2,893$$

4. Momen Inersia PELAT dalam arah pendek adalah:

$$I_s = \frac{1}{12} * 7000 * 200^3 = 4666,67 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_{fs} = \frac{EI_b}{EI_l} = \frac{11573,33 \times 10^6 \text{ mm}^4}{4666,67 \times 10^6 \text{ mm}^4} = 2,48$$

5. Nilai α_{fm} Diperoleh dari rata-rata α_{fl} dan α_{fs}

$$\alpha_{fm} = \frac{\alpha_{fl} + \alpha_{fs}}{2} = 2,687$$

$$\beta = \frac{7000 - 500}{6000 - 500} = 1,182$$

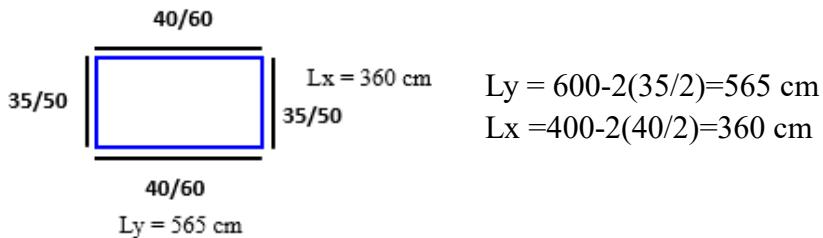
6. Karena nilai $\alpha_{fm} > 2$ Maka nilai h_{min} Dicari dengan:

$$h = \frac{I}{n(0,8 + \frac{fy}{1400})} = \frac{(7000 - 500)(0,8 + \frac{400}{1400})}{36 + 9(1,182)} = 151,32 \text{ mm}$$

Nilai Sudah > dari 90 mm, Maka Tebal pelat 200 mm dapat digunakan.

Contoh Soal 3.

Pelat Atap tipe 1 Ukuran (4 m x 6 m) dengan tebal pelat 12 cm, nilai $q = 1609 \text{ kg/m}$, $f_y = 350 \text{ MPa}$, $f'c = 35 \text{ MPa}$. Tentukan nilai dari M_{lx} , M_{tx} , M_{ly} , M_{ty} dan penulangannya.



Dari Tabel perhitungan Momen didapat persamaan momen sebagai berikut : $(\frac{Ly}{Lx} = 1,6)$; (
 $b=1000\text{mm}$)

$$M_{lx} \rightarrow \text{nilai } X = 37$$

$$M_{tx} \rightarrow \text{nilai } X = 79$$

$$M_{ly} \rightarrow \text{nilai } X = 16$$

$$M_{ty} \rightarrow \text{nilai } X = 57$$

$$M_{lx} = 0,001 \cdot q \cdot Lx^2 \cdot X = 0,001 \times 1609 \times 3,6^2 \times 37 = 772 \text{ kgm}$$

$$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot Lx^2 \cdot X = -0,001 \times 1609 \times 3,6^2 \times 79 = -1648 \text{ kgm (+)}$$

$$M_{ly} = 0,001 \cdot q \cdot Lx^2 \cdot X = 0,001 \times 1609 \times 3,6^2 \times 16 = 334 \text{ kgm}$$

$$M_{ty} = -0,001 \cdot q \cdot Lx^2 \cdot X = -0,001 \times 1609 \times 3,6^2 \times 57 = -1189 \text{ kgm (+)}$$

Momen arah x:

➤ Lapangan

$$M_{nx} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{772}{0,8} = 965 \text{ kgm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \times dx^2} = \frac{965 \text{ kgm}}{1 \times 0,094^2} = 109212 \text{ kg/m}^2 = 1,1 \text{ N/mm}^2 = 1,1 \text{ MPa}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'c} = \frac{350}{0,85 \times 35} = 11,76$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{350} = 0,004$$

$$\rho_{max} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 \times \left(\beta_1 \times \frac{0,85 \times f'c}{f_y} \times \frac{600}{600+f_y} \right)$$

$$= 0,75 \times \left(0,85 \times \frac{0,85 \times 35}{350} \times \frac{600}{600+350} \right) = 0,04$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \times Rn}{f_y}} \right) = \frac{1}{11,76} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 11,76 \times 1,1}{350}} \right) = 0,0032$$

Dari hasil perhitungan diperoleh:

$$\rho_{min} = 0,004 > \rho_{perlu} = 0,0032, \text{ Digunakan } \mathbf{0,004}$$

$$A_{spesial} = \rho_{perlu} \times b \times dx = 0,004 \times 1000 \times 94 = 376 \text{ mm}^2$$

Jarak Tulangan:

$$s = \frac{\frac{1}{4} \pi \times d^2 \times s}{\text{Asperlu}} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times 12^2 \times 1000}{376} = 300,6 \text{ mm}$$

$$s \leq (2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm})$$

Maka digunakan s yang terkecil yaitu 240 mm

$$\text{Luas Tulangan} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times d^2 \times s}{s} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times 12^2 \times 1000}{240} = 471 \text{ mm}^2 > 376 \text{ mm}^2. (\text{Ok})$$

Jadi digunakan Tulangan Pokok:

$$A_s = D12-240.$$

➤ Tumpuan

$$M_{nx} = \frac{M_u}{\Phi} = \frac{1648}{0,8} = 2060 \text{ kgm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \times dx^2} = \frac{2060 \text{ kgm}}{1 \times 0,094^2} = 233137 \text{ kg/m}^2 = 2,3 \text{ N/mm}^2 = 2,3 \text{ MPa}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'c} = \frac{350}{0,85 \times 35} = 11,76$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{350} = 0,004$$

$$\rho_{max} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 \times \left(\beta_1 \times \frac{0,85 \times f'c}{f_y} \times \frac{600}{600+f_y} \right)$$

$$= 0,75 \times \left(0,85 \times \frac{0,85 \times 35}{350} \times \frac{600}{600+350} \right) = 0,04$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \times Rn}{f_y}} \right) = \frac{1}{11,76} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 11,76 \times 2,3}{350}} \right) = 0,007$$

Dari hasil perhitungan diperoleh:

$$\rho_{min} = 0,004 < \rho_{perlu} = 0,007, \text{ digunakan } 0,007$$

$$A_s = \rho_{perlu} \times b \times dx = 0,007 \times 1000 \times 94 = 658 \text{ mm}^2.$$

Jarak Tulangan:

$$s = \frac{\frac{1}{4} \pi \times d^2 \times s}{\text{Asperlu}} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times 12^2 \times 1000}{658} = 171,8 \text{ mm}$$

$$s \leq (2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm})$$

Maka digunakan s yang terkecil yaitu 170 mm

$$\text{Luas Tulangan} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times d^2 \times s}{s} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times 12^2 \times 1000}{170} = 665 \text{ mm}^2 > 658 \text{ mm}^2. (\text{Ok})$$

Jadi digunakan Tulangan Pokok:

As = D12-170.

Momen arah y:

➤ Lapangan

$$M_{nx} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{334}{0,8} = 418 \text{ kgm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \times dx^2} = \frac{418 \text{ kgm}}{1 \times 0,094^2} = 62281 \text{ kg/m}^2 = 0,6 \text{ N/mm}^2 = 0,6 \text{ MPa}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'c} = \frac{350}{0,85 \times 35} = 11,76$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{350} = 0,004$$

$$\rho_{max} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 \times \left(\beta_1 \times \frac{0,85 \times f'c}{f_y} \times \frac{600}{600+f_y} \right)$$

$$= 0,75 \times \left(0,85 \times \frac{0,85 \times 35}{350} \times \frac{600}{600+350} \right) = 0,04$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \times Rn}{f_y}} \right) = \frac{1}{11,76} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 11,76 \times 0,6}{350}} \right) = 0,0017$$

Dari hasil perhitungan diperoleh:

$\rho_{min} = 0,004 > \rho_{perlu} = 0,0017$, Digunakan **0,004**

$$As_{perlu} = \rho_{perlu} \times b \times dx = 0,004 \times 1000 \times 94 = 376 \text{ mm}^2.$$

Jarak Tulangan:

$$s = \frac{\frac{1}{4} \pi \times d^2 \times s}{As_{perlu}} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times 12^2 \times 1000}{376} = 300,6 \text{ mm}$$

$$s \leq (2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm})$$

Maka digunakan s yang terkecil yaitu 240 mm

$$\text{Luas Tulangan} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times d^2 \times s}{s} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times 12^2 \times 1000}{240} = 471 \text{ mm}^2 > 376 \text{ mm}^2. (\text{Ok})$$

Jadi digunakan Tulangan Pokok:

As = D12-240.

➤ Tumpuan

$$M_{nx} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{1189}{0,8} = 1487 \text{ kgm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \times dx^2} = \frac{2060 \text{ kgm}}{1 \times 0,094^2} = 221314 \text{ kg/m}^2 = 2,2 \text{ N/mm}^2 = 2,2 \text{ MPa}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'c} = \frac{350}{0,85 \times 35} = 11,76$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{350} = 0,004$$

$$\rho_{max} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 \times \left(\beta_1 \times \frac{0,85 \times f'c}{f_y} \times \frac{600}{600+f_y} \right)$$

$$= 0,75 \times \left(0,85 \times \frac{0,85 \times 35}{350} \times \frac{600}{600+350} \right) = 0,04$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \times Rn}{f_y}} \right) = \frac{1}{11,76} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 11,76 \times 2,2}{350}} \right) = 0,0066$$

Dari hasil perhitungan diperoleh:

$$\rho_{min} = 0,004 < \rho_{perlu} = 0,0066, \text{ Digunakan } \mathbf{0,0066}$$

$$A_{sperlu} = \rho_{perlu} \times b \times dx = 0,0066 \times 1000 \times 94 = 620,4 \text{ mm}^2.$$

Jarak Tulangan:

$$s = \frac{\frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times s}{A_{sperlu}} = \frac{\frac{1}{4} \times \pi \times 12^2 \times 1000}{620,4} = 182,2 \text{ mm}$$

$$s \leq (2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm})$$

Maka digunakan s yang terkecil yaitu 180 mm

$$\text{Luas Tulangan} = \frac{\frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times s}{s} = \frac{\frac{1}{4} \times \pi \times 12^2 \times 1000}{180} = 628 \text{ mm}^2 > 620,4 \text{ mm}^2. (\text{Ok})$$

Jadi digunakan Tulangan Pokok:

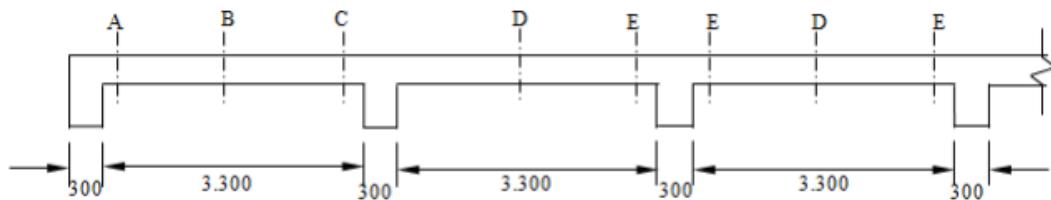
$$A_s = D12-180.$$

Dari hasil analisa perhitungan maka dapat disimpulkan:

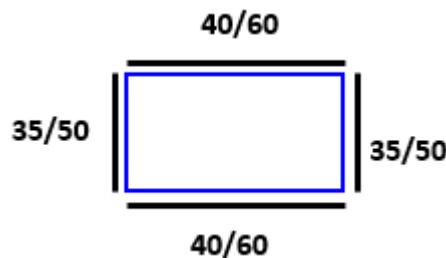
Deskripsi	Penulangan
Penulangan Lapangan Arah "x"	D-12@240.
Penulangan Tumpuan Arah "x"	D-12@170.
Penulangan Lapangan Arah "y"	D-12@240.
Penulangan Tumpuan Arah "y"	D-12@180.

8.10 Latihan

1. Hitunglah kuat momen rencana dari sistem pelat satu arah yang memiliki tebal, $h = 200$ mm dengan penulangan D13 dan jarak antar tulangan, $s = 185$ mm. Gunakan $f'c = 30$ MPa dan $f_y = 400$ MPa.
2. Desainlah sebuah pelat tertumpu sederhana dengan bentang 3,5 m, yang memikul beban mati merata (di luar berat sendiri pelat) sebesar $5,8 \text{ kN/m}^2$ dan beban hidup merata sebesar $4,8 \text{ kN/m}^2$. Gunakan $f'c=20$ MPa, $f_y=400$ MPa.
3. Penampang melintang dari sebuah pelat satu arah ditunjukkan dalam Gambar di bawah ini. Pelat tersebut tertumpu sederhana pada balok, dengan jarak antar tumpuan 3,6 m. Pelat memikul beban mati merata (termasuk berat sendiri pelat) sebesar $3,6 \text{ kN/m}^2$ dan beban hidup merata sebesar 10 kN/m^2 . Desainlah tulangan lentur yang diperlukan dengan menggunakan $f'c = 20$ MPa, $f_y = 400$ MPa.



4. Pelat Atap Type 1 Ukuran ($5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$) dengan tebal pelat 12 cm, nilai $q = 1820 \text{ kg/m}$, $f_y = 325 \text{ MPa}$, $f'c = 30 \text{ MPa}$. Tentukan nilai dari M_{lx} , M_{tx} , M_{ly} , M_{ty} dan penulangannya.



Daftar Pustaka

1. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete*. 2014.
2. Agus Setiawan., Perencangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847: 2013.
3. Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2012). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2012). *Sni 1726:2012*.
4. Chu-kia Wang, Charles G. Salmon, Binsar Hariandja “Desain Beton Bertulang”,’1995’
5. Dept. Kimpraswil, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Bertulang Untuk Bangunan Gedung*, SNI 03-2847-2002.
6. Dipohusodo, I., 1994, *Struktur Beton Bertulang (Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03)*, Gramedia, Jakarta
7. J. Thambah sembiring Gurki “Beton Bertulang”: ‘2010’.
8. MacGregor, J. G., dan Wight, J., K., 2005, *Reinforced Concrete Structure*, Prentice- Hall,Inc, New Jersey.
9. Priyosulistyo, Hrc., 2010, Perancangan dan Analisis Struktur Beton Bertulang I, Biro Penerbit UGM, Yogyakart.
10. PBI 1971, “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung,” *Badan Standar Nas. Indones.*, 1971.
11. Perencangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847 : 2013, Agus Setiawan
12. SNI 03 2834, “Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal,” *Badan Standar Nas. Indones.*, 2000.
13. SNI-1726. (2002). Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.
14. SNI 03-2847-2002. (2002). Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung. *Badan Standardisasi Nasional*.
15. SNI 2847 : 2013, “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung,” *Bandung Badan Stand. Indones.*, 2013.
16. SNI 03-2847-2019, “Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung,” *Bandung Badan Stand. Indones.*, 2019.
17. SNI 1726-2019. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. *Bandung: Badan Standardisasi Indonesia*.
18. S.S. Ray “Reinforced Conncrete Analysis and Design”, “1995”.
19. S. P. Tampubolon, C. Y. Wang, and R. Z. Wang, “Numerical simulations of the bond stress-slip effect of reinforced concrete on the push over behavior of interior beam-column joint,” 2020, doi: 10.1088/1757-899X/725/1/012028.
20. TAMPUBOLON, Sudarno. Analisa Perilaku Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Simulasi VecTor2. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, 2020, 3.2: 55-64.
21. TAMPUBOLON, Sudarno P.; WANG, Chung-Yue; WANG, Ren-Zuo. Numerical simulations of the bond stress-slip effect of reinforced concrete on the push over behavior of interior beam-column joint. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. p. 012028.

22. TAMPUBOLON, Sudarno P. ANALISA PERBANDINGAN HASIL PENGUJIAN LABORATORIUM DAN SIMULASI PADA BALOK BETON BERTULANG. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 2021, 10.1: 195-210.
23. Vis, W. C., Kusuma, G., 1995, *Dasar-dasar Perencanaan Beton Bertulang (Berdasarkan SKSNI T-15-1991-03)*, Seri Beton 1, Erlangga, Jakarta.

BIODATA PENULIS



Sudarno P. Tampubolon, S.T., M.Sc lahir di Lumbanjulu, Kabupaten Humbang-Hasundutan, Sumatera Utara, 11 April 1989, anak dari Bapak M. Tampubolon, S.Pd dengan Ibu S. M. Togatorop, SPd., dan merupakan anak ke-4 dari 4 bersaudara dan memiliki istri Deviana Pratiwi Munthe, SST., M. Kes.

Pendidikan. Menyelesaikan pendidikan formal: SD Negeri 173326 Sigompul (1995-2001); SMP Negeri 2 Lintongnihuta (2001-2004); SMA Negeri 1 Lintongnihuta (2004-2007); Program Sarjana Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia (2008-2012); Program Magister *Civil Engineering National Central University (NCU)*, Taiwan (2016-2018).

Pekerjaan. Pada tahun 2013 bekerja sebagai Quantity Surveyor (QS) PT. Rider Levett Bucknall. Tahun 2014 sd sekarang sebagai Dosen Tetap Universitas Kristen Indonesia (UKI), Jakarta. Tahun 2020 s/d Sekarang sebagai Training of Trainer (TOT) Instruktur Pembekalan Sertifikasi SDM Lulusan S1 dan DIV Perguruan Tinggi Bidang Konstruksi

Publikasi Karya Ilmiah empat tahun terakhir: (1) Numerical Simulations of the Bond Stress-Slip Effect of Reinforced Concrete on the Pushover Behavior of Wall, International Journal of Modern Research in Engineering and Technology (IJMRET) www.ijmret.org Volume 3 Issue 11 | November 2018; (2) Numerical Simulations of the Bond Stress-Slip Effect of Reinforced Concrete on the Pushover Behavior of Interior Beam-Column Joint, 3rd NICTE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 725 (2020) 012028 doi:10.1088/1757-899X/725/1/012028; (3) The Best Angle in Intersection Method, International Journal of Modern Research in Engineering and Technology (IJMRET) www.ijmret.org Volume 5 Issue 3 | May 2020.; (4) Analisa Perilaku Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Simulasi VecTor2, JURNAL REKAYASA KONSTRUKSI MEKANIKA SIPIL (JRKMS) Vol. 03 No. 02 September 2020 p-ISSN 2614-5707 e-ISSN 2715-1581, (5) Era Otomatisasi Pemetaan dengan GPS, UKI Press; (6) Analisis Kekuatan Geser Pada Hubungan Balok-Kolom Interior Beton Bertulang, JCEBT (Journal of Civil Engineering, Building and Transportation), <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jcebt>, JCEBT, 5(1) Maret, 2021 ISSN 2549-6379 (Print) ISSN 2549-6387 (Online); (7) Analisa Perbandingan Hasil Pengujian Laboratorium dan Simulasi Pada Balok Beton Bertulang. PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa, 10(1), 195-210, Tampubolon, S. P. (2021), <https://doi.org/10.22225/pd.10.1.2632.195-210>; (8) Analysis and calculation of wooden framework structure by using Structural Analysis Program (SAP)-2000 and method of joint. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 878, No. 1, p. 012042). IOP Publishing. Tampubolon, S. P., & Mulyani, A. S. (2021, October).; (9) Evaluation of the performance of high-rise building structures with plan ‘H’ shaped for earthquake with height increase (Case study: Apartment Urban Sky-Bekasi). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 878, No. 1, p. 012053). IOP Publishing. Nehe, E., Simanjuntak, P., & Tampubolon, S. P. (2021, October).; (10) The effect of bagasse fibers material with

pumice as a partial substitution of coarse aggregate to increase compressive strength and tensile strength on lightweight concrete. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 878, No. 1, p. 012046). IOP Publishing. Samosir, F., Hutabarat, L. E., Purnomo, C. C., & Tampubolon, S. P. (2021, October).; (11) Optimizing Empty Fruit Bunch (EFB) of palm and glass powder as a partial substitution material of fine aggregate to increase compressive and tensile strength of normal concrete. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 878, No. 1, p. 012047). IOP Publishing. Siregar, R. A., Hutabarat, L. E., Tampubolont, S. P., & Purnomo, C. C. (2021, October).; (12) Utilization of copper fiber waste to increase compressive strength and split tensile strength of rigid pavement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 878, No. 1, p. 012052). IOP Publishing. Ndruru, H., Simanjuntak, R. M., & Tampubolon, S. P. (2021, October).; (13) Studi Perbandingan Analisa Ketelitian Tinggi Menggunakan Total Station dan Sipat Datar. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran, dan Ilmu Kesehatan*, 5(2), 259-268. Mulyani, A. S., & Tampubolon, S. P. (2021).; (14) Analisa Perilaku Pushover pada Pengujian Balok Beton Bertulang. *Bentang: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 10(1), 77-88. Tampubolon, S. P. (2022).



UKI PRESS

Pusat Penerbit dan Pencetakan
Universitas Kristen Indonesia
Jl. Mayjen Sutoyo No.02 Cawang
Jakarta Timur 13630

ISBN 978-623-6963-76-0

A standard linear barcode representing the ISBN number 978-623-6963-76-0. The number 9 is on the far left, followed by the ISBN digits, and the number 963760 is on the right.